

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.

№ 4 2012 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ФИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ

- И.Р. Суслов, И.В. Тормышев, К.Г. Мельников*  
Преобразование групповых макроскопических сечений для использования  
в программах метода Монте-Карло ..... 5
- А.А. Безбородов, Е.В. Долгов, Д.А. Клинов, В.В. Колесов, В.Ю. Стогов, И.Р. Суслов, В.И. Фоломеев*  
Граничные резонансные эффекты в быстром реакторе с гетерогенной активной зоной ..... 13
- О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, Р.В. Фомин*  
Оценка энерговыделения в мишени с ураносодержащим материалом при производстве  
<sup>99</sup>Mo с использованием мишеней усовершенствованной конструкции на реакторе ВВР-ц ..... 23
- В.А. Хрячков, И.П. Бондаренко, П.А. Дворников, Б.В. Журавлев, С.Н. Ковтун, Т.А. Хромылева,  
А.В. Павлов, Н.Г. Роцин*  
Метод генерации <sup>16</sup>N для проверки радиационных каналов контроля на АЭС типа ВВЭР ..... 30

### БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

- П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.А. Бударин, В.П. Полионов, Н.Н. Титаренко, Д.М. Швецов, Н.Г. Роцин,  
А.Л. Матвеев, Е.Л. Матвеев*  
Расчетное обоснование алгоритма контроля течи трубопроводов по влажности воздуха ..... 35
- Н.В. Плешакова, А.Н. Анохин*  
Анализ ошибок, допускаемых операторами БЩУ АЭС при использовании  
эксплуатационных процедур ..... 45

### ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

- В.А. Шилин, А.Б. Гордиенко, А.С. Шилина, В.К. Милинчук*  
Адсорбция молекулярного йода из газоаэрозольных сред и водных растворов новым  
типом алюмосиликатного сорбента ..... 58

### АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

- С.Е. Белов, М.Н. Боровков, Н.Г. Кодочигов, Э.Г. Новинский*  
Экспериментальные исследования конструкции страховочных подшипников вертикальной  
турбомашины ..... 67
- Ю.А. Мусихин*  
Об электродной поляризации электрохимического датчика кислорода в жидкометаллических  
теплоносителях ..... 75

## ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

<i>В.М. Абдулкадыров, Г.П. Богословская, В.А. Грабежная</i> Термодинамические циклы АЭС, работающих на сверхкритических параметрах воды .....	85
<i>А.В. Безносков, Т.А. Бокова, О.О. Новожилова, А.К. Матюнин, В.Л. Химич, С.Н. Пичков</i> Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих аварию «межконтурная неплотность ПГ» в РУ с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями .....	92
<i>В.В. Ульянов, В.А. Гулевский, П.Н. Мартынов, А.С. Фомин, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, С.-А.С. Ниязов</i> Применение теплоносителей Pb и Pb-Bi в новых технологиях переработки твердых, жидких и газообразных сред .....	102

## МАТЕРИАЛЫ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

<i>Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, Д.А. Мальцев, С.В. Федотова, А.С. Фролов, О.О. Забусов, М.А. Салтыков</i> Структурные исследования стали 15X2НМФАА и ее сварных соединений после длительных термических выдержек и облучения при рабочей температуре корпуса реактора .....	110
<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 предварительной подготовки поверхности стали на скорость окисления в свинцово-висмутовом теплоносителе .....	122
<i>В.В. Сахаров, П.Б. Басков, И.В. Мосягина, Н.Н. Фролов, И.И. Курбаткин, Т.И. Муравьева, Е.В. Торская, О.В. Ивкина, М.А. Шарипова</i> Химический синтез нейтрон-детектирующих ультратонких оптических материалов .....	130
<i>В.Я. Сухоносков, В.А. Чернов, Н.Ю. Богданов</i> Исследование процессов кристаллизации при отверждении материала-фиксатора на основе оксида магния .....	143

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

<i>Д.Н. Моисеенко, Ю.А. Кураченко</i> Анализ тяжелых радиационных аварий с помощью воксельного антропоморфного фантома .....	152
---	-----

## CONTENTS

### REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY

<i>I.R. Suslov, I.V. Tormyshev, K.G. Mel'nikov</i> New Technique to Reformat Multigroup Cross-Sections for Monte-Carlo Calculation .....	5
<i>A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev</i> Boundary Resonance Effects in the Fast Reactor with the Heterogeneous Core .....	13
<i>O. Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin</i> Energy Deposition Evaluation in the Target with Uranium-Containing Material for the <sup>99</sup> Mo Production in WWR-C .....	23
<i>V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, P.A. Dvornikov, B.V. Zhuravlev, S.N. Kovtun, T.A. Khromyleva, A.V. Pavlov, N.G. Roschin</i> Method of <sup>16</sup> N Generation for Test of Radiation Controlled Cannels on Nuclear Power Stations with Water-Cooled Reactors .....	30

### SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP

<i>P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.A. Budarin, V.P. Polionov, N.N. Titarenko, D.M. Shvetsov, N.G. Roshchin, A.L. Matveev, E.L. Matveev</i> Calculation-based Justification for the Algorithm of Pipelines Leak Control by Air Humidity .....	35
<i>N.V. Pleshakova, A.N. Anokhin</i> Analysis of the Errors Committed by NPP MCR Operators during Implementation of Operating Procedures .....	45

### ENVIROMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING

<i>V.A. Shilin, A.B. Gorgienko, A.S. Shilina, V.K. Milinchuk</i> Adsorption of Molecular Iodine from Gas-aerosol Environments and Water Solutions with a New Type of an Aluminum-Silicate Sorbent .....	58
---	----

### NUCLEAR POWER PLANTS

<i>S.E. Belov, M.N. Borovkov, N.G. Kodochigov, E.G. Novinskiy</i> Experimental Investigations of Vertical Turbomachine Catcher Bearings .....	67
<i>Yu.A. Musikhin</i> On Electrode Polarization of Electrochemical Oxygen Sensor in Liquid Metal Coolants .....	75

### THERMAL PHYSICS AND HEATHYDRAULICS

<i>V.M. Abdulkadyrov, G.P. Bogoslovskaya, V.A. Grabejnaya</i> Thermodynamic Cycles of NPPs Operated with Supercritical Water .....	85
<i>A.V. Beznosov, T.A. Bokova, O.O. Novozhilova, A.K. Matjunin, V.L. Khimich, S.N. Pichkov</i> Experimental Researches of the Processes Accompanying an Accident «The Intercontour Leak of a Steam Generator» for Fast Reactor with HLHC .....	92
<i>V.V. Ulyanov, V.A. Gulevsky, P.N. Martynov, A.S. Fomin, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, S.-A.S. Niasov</i> The Use of Coolants Pb and Pb-Bi in the New Technologies of Recycling Solid, Liquid and Gaseous Media .....	102

#### **MATERIALS OF NUCLEAR POWER ENGINEERING**

<i>B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, D.A. Maltsev, S.V. Fedotova, A.A. Frolov, O.O. Zabusov, M.A. Saltykov</i> Structural Studies of 15H2NMFAA Steel and its Welds after Long Thermal Exposures and Irradiation at the Operating Temperature of Reactor Pressure Vessel .....	110
<i>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</i> Effect of Pre-Treatment on the Oxidation Rate Steel in the Lead-Bismuth Coolant .....	122
<i>V.V. Sakharov, P.B. Baskov, I.V. Mosyagina, N.N. Frolov, I.I. Kurbatkin, T.I. Muravyeva, E.V. Torskaya, O.V. Ivkina, M.A. Sharipova</i> Chemical Synthesis of Neutron-Detecting Ultrathin Optical Materials .....	130
<i>V.J. Suhonosov, V.A. Chernov, N.J. Bogdanov</i> Researches of Crystallization Processes under Hardening of Clamp Material Based on the Magnesium Oxide .....	143

#### **APPLICATION OF NUCLEAR METHODS AND MEANS**

<i>D.N. Moiseenko, Yu.A. Kurachenko</i> Radiation Accidents Analysis with the use of Anthropomorphic Voxel Phantom .....	152
---	-----

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГРУППОВЫХ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОГРАММАХ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

**И.Р. Суслов, И.В. Тормышев, К.Г. Мельников**

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



Предложен новый вариант алгоритма преобразования сечений рассеяния из разложения по полиномам Лежандра в представление равновероятных интервалов, включающий в себя корректировку границ равновероятных интервалов, сохраняющую первый угловой момент сечений рассеяния. Алгоритм реализован в программе CRSRD-ST, преобразующей сечения в многогрупповой формат программы MCNP. На модельных задачах продемонстрировано существенное улучшение согласованности детерминистических расчетов и расчетов по Монте-Карло.

**Ключевые слова:** перенос нейтронов, метод Монте-Карло, групповое приближение, анизотропия рассеяния.

**Key words:** neutron transport, Monte-Carlo method, multi-group approach, scattering anisotropy.

### ВВЕДЕНИЕ

В рамках проекта МНТЦ-3814 ведутся работы по созданию, верификации и валидации реакторных нейтронно-физических кодов нового поколения для расчета энергетических реакторов ВВЭР и PWR на основе как детерминистических методов (методы характеристик, ВПС, поверхностных гармоник), так и метода Монте-Карло. Оба подхода (детерминистический и Монте-Карло) имеют для этих целей свои плюсы и минусы. Работы в этом направлении интенсивно обсуждались минувшее десятилетие на конференциях по математическим вычислениям в реакторных приложениях. Значительное внимание уделялось созданию комбинированных (гибридных) методов расчетов, сочетающих детерминистические методы и метод Монте-Карло.

Метод Монте-Карло позволяет использовать непрерывное описание сечений взаимодействия и точно моделировать рассеяние частиц, тогда как для расчета трехмерных полномасштабных моделей реакторов по детерминистическим методам требуется использование групповых констант, полученных на основе методов гомогенизации. С другой стороны, при получении полей энерговыделения по методу Монте-Карло с необходимой для инженерных целей точностью большие размеры задачи (более 200 ТВС, 100 аксиальных слоев, 300 твэлов на ТВС, 10 зон

выгорания в каждом твэле, 100 изотопов в расчете выгорания [1–3]) приводят к общему количеству рассчитываемых функционалов в методе Монте-Карло порядка шести миллиардов. При необходимой статистической точности 1% для такого расчета требуется, по оценкам работы [3], порядка 20-ти миллиардов историй.

В настоящее время возможности вычислительной техники позволяют поставить на повестку дня в качестве долговременной цели создание программ для решения уравнения переноса детерминистическими методами без использования гомогенизации. Усилия по развитию таких программ концентрируются в трех направлениях [3]: в ДН-методе (Dynamic Homogenization) использование итераций между ячейчными и гомогенными расчетами позволяет выполнить полномасштабный расчет реактора без гомогенизации, по крайней мере, для двумерной геометрии; в PAS-методе (Planar-Axial Syntesis) трехмерное решение получается на основе совместного решения уравнения переноса низкого порядка аппроксимации в аксиальном направлении с ячейчными расчетами в плоскости; в RH-методе (Reduces Homogenization) гомогенизация в трехмерных расчетах переносится на уровень ячейки. Во всех трех направлениях решающую роль играют преимущества метода характеристик.

Оба подхода (детерминистический и Монте-Карло) должны развиваться одновременно и параллельно. Также необходимо развивать и гибридные методы расчета, сочетающие в себе оба подхода (например, [4–6]), при этом важно иметь возможность выполнять расчеты при максимально согласованных исходных данных [7].

Отметим, что последнее время вырос интерес к генерации многогрупповых сечений с учетом анизотропии рассеяния методом Монте-Карло [8–10]. Возможны и другие применения многогрупповых констант в программах Монте-Карло, например, в ряде задач расчет может быть существенно ускорен за счет использования группового представления нейтронных сечений для большей части задачи и непрерывных по энергии сечений только в небольшой выделенной области [11].

Проблема согласования констант детерминистических расчетов с методом Монте-Карло исследуется достаточно давно, но пока не имеет полностью удовлетворительного решения для анизотропии рассеяния, аккуратный учет которой при выходе на новые точности расчета становится все более важным и привлекает большее внимание расчетчиков и разработчиков программ [8–12]. Особенно важным это может оказаться для расчетов без гомогенизации, где влияние анизотропии рассеяния может оказаться большим, чем в традиционных ячейчных расчетах.

Созданная разработчиками кода MCNP программа для ввода многогрупповых сечений CRSRD [13], как и программы, разработанные другими исследователями, например [14], для широкого использования недоступны из-за наличия нерешенных методических вопросов. В частности, подход, основанный на конечном наборе значений косинуса угла рассеяния, нефизичен и вызывает определенные сомнения при больших градиентах потоков, возникающих при расчетах без гомогенизации. Таким образом, дальнейшее развитие алгоритмов преобразования групповых констант в формат метода Монте-Карло, улучшающее согласование результатов, получаемых по этим методам, является актуальной задачей.

Перевод констант из одного формата в другой не является чисто технической задачей и требует решения определенных методических проблем. Традиционно в детерминистических методах отрицательные значения сечений считаются допустимыми в некоторых случаях и исправляются процедурами коррекции (fix-up), тогда как для метода Монте-Карло они неприемлемы абсолютно. В данной работе представлен алгоритм перевода групповых сечений в версию многогруппового

формата MCNP, использующую приближение равновероятных интервалов косинуса угла рассеяния. Изложенный ниже алгоритм реализован в программе CRSRD-ST. Особенностью реализованного алгоритма является сохранение нулевого и первого моментов рассеяния в рамках метода равновероятных интервалов. Алгоритм проверен на аналитической задаче с линейно анизотропным рассеянием и на многогрупповой тестовой задаче. В расчетах использовались основанная на методе характеристик программа MCG3D [15–17] на исходных групповых сечениях и программа метода Монте-Карло VEGA [18], согласованная по представлению констант с MCNP.

### ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЕЧЕНИЙ

В работе рассматривается алгоритм перевода сечений для расчета переноса нейтронов и гамма-квантов из формата XSLIB с описанием анизотропии полиномами Лежандра [19] в формат групповых сечений MCNP с заданием анизотропии рассеяния в приближении равновероятных косинусов [12]. Формат XSLIB является основным для программы MCG3D и широко используется в других программах метода дискретных ординат. В этом формате представлены данные широко используемых библиотек групповых констант переноса нейтронов и гамма-квантов CASK, BUGLE96, BNAB.

#### Преобразование базового набора констант (без описания анизотропии рассеяния)

Без учета описания анизотропии рассеяния для заполнения многогрупповых таблиц MCNP для каждой энергетической группы  $g$  необходимы следующие константы:  $\Sigma_t^g$  – полное сечение взаимодействия;  $\Sigma_{s,0}^{g \rightarrow g'}$  – нулевой момент сечения рассеяния из энергетической группы  $g$  в группу  $g'$ ;  $\Sigma_a^g$  – сечение поглощения;  $\Sigma_f^g$  – сечение деления;  $\nu^g$  – количество вторичных нейтронов деления;  $\chi^g$  – спектр нейтронов деления. Для полного набора констант задача заполнения многогрупповых таблиц сечений MCNP сводится к следующим действиям:

- чтение таблиц файла XSLIB;
- пересылка сечений на соответствующие места таблиц MCNP;
- запись этих таблиц в новом формате в соответствующий файл библиотеки MCNP;
- формирование соответствующей записи для файла XSDIR.

Для неполного набора (например, при отсутствии  $\Sigma_a^g, \Sigma_f^g, \nu^g$ ) недостающие величины достаточно легко восстанавливаются.

#### Базовая аппроксимация анизотропии рассеяния равновероятными косинусами (АРКО)

Физически важным свойством в рамках группового метода, которое сохраняются в аппроксимации равновероятными косинусами (АРК), является наличие интервалов угловой переменной  $\mu$ , в которых рассеяние из энергетической группы  $g$  в группу  $g'$  невозможно. Для получения АРКО используем кумулятивный интеграл от индикатрисы рассеяния  $f$ , равный вероятности рассеяния с косинусом угла рассеяния меньше  $\mu$ :

$$F(\mu) = \int_{-1}^{\mu} f(\mu') d\mu'.$$

Границы равновероятных интервалов  $\mu_i, i = 0, \dots, I$  находятся из условия  $\mu_i = \min\{\mu, F(\mu) = i/I, f(\mu) \geq 0\}$ .

Если индикатриса рассеяния  $f$  отрицательна при  $\mu = -1$  или  $\mu = 1$ , то  $\mu_0$  не равно  $-1$ ,  $\mu_I$  не равно  $1$ . Таким образом, исходная индикатриса рассеяния  $f$  заменяется ступенчатой индикатрисой  $f^{\text{APKO}}$  с  $I$  равновероятными интервалами, в пределах каждого из которых плотность распределения равна

$$f_i^{\text{APKO}}(\mu) = \frac{1}{\Delta_i} \int_{\mu_j}^{\mu_{j+1}} f(\mu') d\mu' = \frac{1}{I\Delta_i},$$

где  $\Delta_j = \mu_{j+1} - \mu_j$ . APKO сохраняет интеграл сечения рассеяния по углу, но приводит к погрешности в аппроксимации первого и более высоких угловых моментов сечения рассеяния. Если индикатриса рассеяния всюду неотрицательна, то, увеличивая количество равновероятных интервалов  $I$ , погрешности в аппроксимации всех моментов можно сделать сколь угодно малыми. В противном случае погрешности всех моментов, кроме нулевого, остаются конечными.

### Аппроксимация РК, сохраняющая нулевой и первый моменты (АРК1)

Естественным развитием APKO является попытка, не уходя далеко от полученного физически разумного приближения, подкорректировать границы интервалов  $\mu_j$  так, чтобы точно сохранялся, по крайней мере, первый момент. Получение аппроксимации индикатрисы рассеяния набором равновероятных косинусов с сохранением первого углового момента сечения рассеяния (АРК1) формулировалось как задача минимизации квадратичного отклонения

$$W = \sum_{i=2}^I w_i \delta_i^2$$

при выполнении линейного уравнения для сохранения первого углового момента индикатрисы рассеяния  $p_1$

$$0.5\delta_0 + \sum_{i=1}^{I-1} \delta_i + 0.5\delta_I = I\Delta_p$$

и  $I$  неравенств, ограничивающих плотность углового распределения индикатрисы

$$\mu_{i,1} - \mu_{i-1,1} \geq k\Delta_{\min,0}, i = 1, \dots, I,$$

где  $d_i = \mu_{i,1} - \mu_{i,0}$  – искомое отклонение  $i$ -й границы  $\mu_{i,1}$  АРК1 от APKO;  $w_i = 1/\min(\Delta_{i,0}, \Delta_{i+1,0})$  – вес, обратный длине минимального из интервалов, прилегающих к точке  $\mu_{i,0}$ ;  $\Delta_p = p_1^{\text{APKO}} - p_1$  – ошибка APKO для первого момента (если  $\mu_{0,0} = -1$  или  $\mu_{I,0} = -1$ , то соответственно необходимо положить  $\delta_0 = 0$  или  $\delta_I = 0$ );  $\Delta_{\min,0}$  – минимальная длина равновероятного отрезка в APKO.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

### Аналитические бенчмарки

Предложенный в предыдущем разделе метод был проверен на серии задач в цилиндрической геометрии с линейной анизотропией, для которых в [20] были аналитически определены критические размеры. Макроскопические сечения задач серии представлены в табл. 1. Расчеты выполнялись для варианта со средним числом нейтронов, образующихся при одном столкновении с ядром среды  $s = 1,01$ , при трех значениях среднего косинуса угла рассеяния  $\bar{\mu} = 0,1, 0,3, 0,5$ .

Для каждого из вариантов по методу Монте-Карло выполнялся расчет коэффициента размножения бесконечного цилиндра с радиусом, приведенным в работе [20]. Расчеты выполнялись с различным числом равновероятных отрезков в аппроксимации индикатрисы рассеяния как с коррекцией границ отрезков для уточ-

Таблица 1

**Макроскопические сечения аналитических бенчмарков с линейно анизотропным рассеянием в цилиндрической геометрии**

Вариант	$\bar{\mu}$	$\Sigma_t$	$\Sigma_c$	$\nu\Sigma_f$	$\Sigma_{s,0}$	$\Sigma_{s,1}$
1	0,1	1	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,9	$3,03 \cdot 10^{-1}$
2	0,3	1	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,9	$9,09 \cdot 10^{-1}$
3	0,5	1	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	0,9	1,515

нения значения первого углового момента, так и без коррекции. Результаты расчетов представлены в табл. 2. Статистическая погрешность расчета  $k_{eff}$  во всех случаях составляла  $\pm 0.00012$  при доверительной вероятности 95%. Расчет по программе метода характеристик MCCG3D дал значение 0.99999 для всех задач.

Таблица 2

**$k_{eff}$ , рассчитанное по методу Монте-Карло, при различных значениях среднего косинуса рассеяния  $\bar{\mu}$  для аппроксимаций равновероятными косинусами АРКО и АРК1**

$\bar{\mu}$	0,1		0,3		0,5	
	АРКО	АРК1	АРКО	АРК1	АРКО	АРК1
3	1.00104	0.99994	1.00649	1.00013	1.00705	0.99986
5	1.00042	0.99996	1.00318	0.99994	1.00577	1.00010
10	0.99996	1.00000	1.00122	0.99992	1.00512	0.99991
20	–	–	1.00036	0.99984	1.00496	0.99990
40	–	–	1.00009	0.99981	1.00486	0.99988

Как видно из представленных результатов, в задачах с положительной индикатрисой рассеяния ( $\bar{\mu} = 0.1$  и  $\bar{\mu} = 0.3$ ) удовлетворительной точности расчета можно добиться и без коррекции границ равновероятных интервалов, просто увеличивая количество интервалов. В задаче же со знакопеременной индикатрисой ситуация принципиально иная – даже при использовании сорока равновероятных интервалов не удастся существенно повысить точность результатов. В то же время при использовании коррекции границ равновероятных интервалов по методике, обеспечивающей сохранение первого углового момента, хорошее согласие с аналитическим решением может быть достигнуто уже при использовании трех равновероятных интервалов как для положительных, так и для знакопеременных индикатрис рассеяния. На рисунке 1 приведен вид индикатрис рассеяния, получаемых для АРКО и для двух вариантов расчетов АРК1:  $k = 0.5$  и с  $k = 0.9$  для значения среднего косинуса угла рассеяния  $\bar{\mu} = 0.5$

### Ячейка PWR

В качестве второй тестовой задачи была выбрана ячейка реактора PWR. Расчетная модель представлена на рис. 2. Для этой модели по программе UNK [21] подготовлены 51-групповые сечения, в которых константы для воды подготовлены в  $P_1$ -приближении. Расчет  $k_{eff}$  для данной ячейки при использовании программы метода характеристик MCCG3D с экстраполяцией на бесконечно мелкую про-

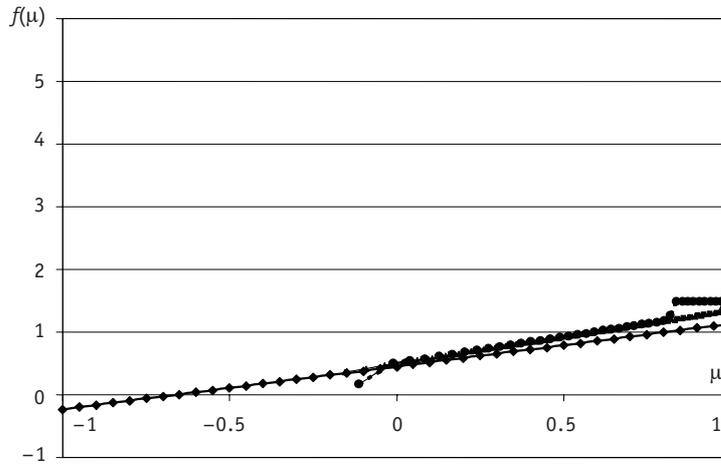


Рис. 1. Индикатриса рассеяния для аналитической задачи:  $\blacklozenge$  – P1;  $\blacksquare$  – APK1,  $k = 0.5$ ;  $\blacktriangle$  – APK0;  $\bullet$  – APK1,  $k = 0.9$

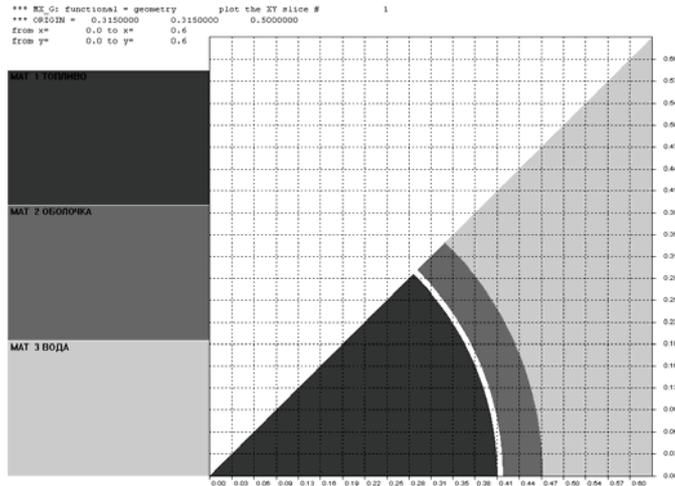


Рис. 2. Геометрия ячейки PWR

Таблица 3

**Результаты расчетов  $k_{eff}$  для ячейки PWR**

Метод	$k_{eff}$	Интервал $k_{eff}$ ( $2\sigma$ )
МССГ3D, М1 ( 228 ячеек)	1.40439	
МССГ3D, М2 (1602 ячейки)	1.40390	
МССГ3D, М3 (3846 ячеек)	1.40380	
МССГ3D, экстраполяция	1.40370	
APK0	1.40198±0.00025	1.40149 – 1.40247
APK1, $k = 0.5$	1.40285±0.00025	1.40237 – 1.40336

странственную и угловую сетки дает значение 1.40370. При использовании сечений, подготовленных по методике APK0,  $k_{eff}$  при помощи программы MCNP4C составил 1.40198±0,00025 (интервал от 1.40149 до 1.40247 с доверительной вероятностью 95%). После корректировки сечений по методике, обеспечивающей со-

хранение первого углового момента сечения рассеяния (АРК1), коэффициент размножения, рассчитанный для той же задачи, составил  $1.40285 \pm 0,00025$  (интервал от 1.40237 до 1.40336 с доверительной вероятностью 95%).

Таким образом, в данной задаче обе методики (АРКО и АРК1) обеспечивают более чем удовлетворительное согласие  $k_{eff}$  расчета по методу Монте-Карло с детерминистическим расчетом по методу характеристик. Корректировка сечения с сохранением первого момента анизотропии рассеяния заметно улучшает согласие.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен новый алгоритм преобразования групповых сечений для метода Монте-Карло с представлением анизотропии рассеяния в приближении равновероятных косинусов (АРКО) с сохранением первого углового момента сечения рассеяния. Продемонстрировано существенное улучшение согласованности результатов по детерминистическим программам и Монте-Карло при сохранении угловых моментов сечения рассеяния в процессе преобразования групповых констант в формат Монте-Карло.

Разработанная методика использована в методических исследованиях для сравнения результатов расчетов по программе MCG3D с результатами, полученными при помощи программы MCNP на одинаковых константах, и позволяет повысить надежность покомпонентного анализа погрешностей и отделить методическую погрешность метода характеристик от методической погрешности малогрупповых констант с анизотропией рассеяния.

В качестве дальнейших направлений исследований мы предполагаем развитие метода для учета большего количества угловых моментов, проведение анализа применимости метода к задачам переноса фотонов и сравнения различных методов ограничения плотности углового распределения индикатрисы.

**Работа выполнена при поддержке проекта МНТЦ-3814.**

## Литература

1. *Smith K.* Reactor Core Methods, M&C 2003, April 6-10, 2003, Gatlinburg, Tennessee.
2. *Martin B.* Advances in Monte Carlo Methods for Global Reactor Analysis/M&C+SNA 2007 (Monterey, April 15-19, 2007, University of Michigan).
3. *Lewis E.E.* Toward Whole-Core Neutron Transport Without Spatial Homogenization/M&C-2009. – Monterey.
4. *Morel J.E., Tooley J.P., Blamer B.J.* Exponentially-Convergent Monte-Carlo via Finite-Element Trial Spaces/Int. Conf. M&C-2011 (Rio de Janeiro, Brasil, May 8-12, 2011). On CD-ROM.
5. *Karriem Z., Ivanov K., Zamonsky O.* Development of a Consistent Monte Carlo – Deterministic Transport Methodology Based on the Method of Characteristics and MCNP5/Int. Conf. M&C-2011 (Rio de Janeiro, Brasil, May 8-12, 2011). On CD-ROM.
6. *Walters E., Larsen Ed. W., and Martin W.R.* Generalized Hybrid Monte Carlo – CMFD Method for Fission Source Convergency/Int. Conf. M&C-2011 (Rio de Janeiro, Brasil, May 8-12, 2011). On CD-ROM.
7. *Suslov I.R., Melnikov K.G.* WWER Benchmarking Characteristics vs. Monte-Carlo/20-th International Conference on Transport Theory (Obninsk, Russia, July 22-28, 2007).
8. *Hoogenboom J.E., Khotylev V.A., Tholammaki J.M.* Generation of Multi-Group Cross-Section and Scattering Matrices with the Monte-Carlo Code MCNP5/Int. Conf. M&C+SNA 2007 (Monterey, California, April 15-19).
9. *Lepponen J.* PSG2 / Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code Methodology. Users Manual – Validation Report 2009.

10. *Lepponen J.* On the Feasibility of a Homogenised multi-group Monte-Carlo Method in Reactor Analysis/PHYSOR-2008 (Interlake, Switzerland, September 14-19, 2000).
11. *Kuijper J.C., van der Marck S.C. and Hogenbirk A.* Using homogenized macroscopic group cross sections in continuous-energy Monte Carlo neutron transport calculations with MCNP/Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications, M&C + SNA 2007 (Monterey, California, April 15-19, 2007).
12. *Le Tellier R., Hebert A., Santamarina A. and Litaize O.* Benchmarking of the Characteristics Method Combined with Advanced Self-Shielding Models on BWR-MOX Assemblies/PHYSOR-2006, ANS Topical Meeting on Reactor Physics (Vancouver, BC, Canada, September 10-14, 2006).
13. *Wagner J.C., Redmond II E.L., Palmtag S.P. and Hendricks J.S.* MCNP: Multigroup/Adjoint Capabilities. Los Alamos National Laboratory report, LA-12704, December 1993.
14. *Коробейников В.В., Коробейникова Л.В., Николаев М.Н., Цибуля А.М.* Аппроксимация угловых распределений упругорассеянных нейтронов/Препринт ФЭИ-1445. – Обнинск, 1983.
15. *Suslov I.R.* MCG3D – 3D Discrete Ordinates Transport Code for Unstructured Grid/ State of Art and Future Development/Proc. Conf. «Neutronics-96». – Obninsk: IPPE, 1996. – P. 162.
16. *Suslov I.R.* Improvements in the Long Characteristics Method and Their Efficiency for Deep Penetration Calculations//Progress in Nuclear Energy. – 2001. – Vol. 39. – P. 223.
17. Benchmark on Deterministic Transport Calculations without Spatial Homogenisation A 2-D /3-D MOX Fuel Assembly Benchmark. NEA/NSC/DOC (2003)16.
18. *Klimov A.D. et al.* System Analysis of Nuclear Safety of VVER Reactor with MOX Fuel Mathematics and Computation, Supercomputing, Reactor Physics and Nuclear and Biological Applications. Avignon, France, September 12-15, 2005.
19. TWODANT USERS GUIDE. Deterministic Transport Team Transport Method Group, XTM, Los Alamos National Laboratory. 1997.
20. *Sanches R., Ganapol B.G.* Benchmark values for monoenergetic neutron transport in one-dimensional cylindrical geometry with linearly anisotropic scattering//Nuclear Science and Engineering. – 1984. – Vol. 1. – P. 61.
21. *Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф.* UNK – программа детального расчета спектра нейтронов в элементарной ячейке/Сб. тр. семинара «Нейтроника-97». – Обнинск, 1998. – С. 90.

Поступила в редакцию 3.09.2012

## ГРАНИЧНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ С ГЕТЕРОГЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ

**А.А. Безбородов\*, Е.В. Долгов\*, Д.А. Клинов\*, В.В. Колесов\*\*,  
В.Ю. Стогов\*, И.Р. Суслов\*, В.И. Фоломеев\***

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

*\*\*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Исследовались граничные резонансные эффекты с применением быстродействующей методики использования подгруппового приближения в практических задачах описания сечений взаимодействия нейтронов с ядрами нуклидов среды в резонансной области энергий для физического моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах с гетерогенной активной зоной.

**Ключевые слова:** гетерогенная активная зона, резонансная гетерогенность, коэффициент размножения, реакторная установка на быстрых нейтронах.

**Key words:** heterogeneous core, resonance heterogeneity, multiplication factor, fast reactor plant.

Выбор оптимальных параметров быстрых реакторов в новой технологической платформе с замыканием топливного цикла по урану, плутонию и долгоживущим актиноидам во многом зависит от конструктивной конфигурации активной зоны, взаимного расположения ТВС с топливом и с воспроизводящим материалом. В этой связи разработано несколько различных вариантов активных зон быстрых реакторов [1], в том числе и гетерогенных активных зон, в которых ТВС зоны воспроизводства размещаются непосредственно в активной зоне. Гетерогенные активные зоны имеют высокие коэффициенты воспроизводства, требуют меньшую эффективность органов регулирования и аварийной защиты. Они имеют меньший пустотный эффект реактивности, что важно для ядерной безопасности реактора [2]. По ним проводятся глубокие исследования проблемы их термодинамических характеристик расположенных в активной зоне групп ТВС с воспроизводящим материалом в зависимости от выгорания, а также КПД реактора при пониженных температурных параметрах теплоносителя [3]. На характеристики гетерогенных активных зон оказывает влияние так называемая ослабленная нейтронная связь пространственно разделенных областей активной зоны [4]. Вблизи границ раздела физических зон реактора имеются переходные области, в которых резонансная структура нейтронного спектра, характерная для данной зоны, испытывает влияние соответствующей структуры спектра соседней зоны. В зависимости от размеров и составов физических зон переходные области могут занимать различ-

© А.А. Безбородов, Е.В. Долгов, Д.А. Клинов, В.В. Колесов, В.Ю. Стогов, И.Р. Суслов, В.И. Фоломеев, 2012

ный объем и оказывать определенное влияние на характеристики реактора. Примерами отсутствия заметного влияния переходных областей на нейтронно-физические характеристики реактора могут служить быстрые реакторы с традиционной компоновкой активной зоны ввиду их характерного состава зон и соотношения между средними по энергии пробегами нейтронов и размерами различных зон реактора. В расчетах таких компоновок хорошо зарекомендовали себя групповые константы, для подготовки которых используются приближения – протяженные гомогенные физические зоны с допущением разделения энергетических и пространственных переменных. К сожалению, при таком подходе не учитываются нерассеянные нейтроны на границах зон. В случае же быстрых реакторов с отражателями из конструкционных материалов средней атомной массы (железа, никеля) на границе с отражателем имеются переходные области, в которых резонансная структура нейтронного спектра, характерная для данной зоны, испытывает сильное влияние резонансной структуры спектра соседней зоны. Особенность резонансной структуры железа – наличие глубоких минимумов в полном сечении из-за интерференции резонансного и потенциального рассеяния. Длина свободного пробега нейтронов с энергией, соответствующей интерференционным минимумам, составляет десятки сантиметров. Этим обуславливаются большие размеры переходных приграничных областей, в которых устанавливается резонансная структура нейтронного спектра. Резонансная самоэкранировка сечений сильно зависит от пространственных координат. В этом случае групповые константы не учитывают граничные резонансные эффекты, вызванные нерассеянными резонансными нейтронами, спектр которых ослабляется по экспоненте, существенно зависит от координат, и разделение энергетических и пространственных переменных нейтронного спектра некорректно. В работах [5, 6] для оценки влияния граничных резонансных эффектов на характеристики быстрых реакторов со стальными отражателями были применены детерминистические численные методы ВПС и  $DS_n$  (компьютерные коды FFCP-MULT, SANS-B, ONEDANT из системы DANTSYS 3.0) в сочетании с высокоэффективным подгрупповым подходом с использованием данных российской системы констант БНАБ-93 [7], имеющей статус Рекомендованных справочных данных (Сертификат ВНИЦСМВ ГСССД № 444 от 01.08.95). При этом групповые расчеты занижали критичность в среднем на 1,5%.

Для быстрых же реакторов с гетерогенной активной зоной, включающей в себя сырьевые вставки (в кольцевых зонах воспроизводства), средняя по энергии оптическая толщина зон которых становится сравнимой с длинами свободного пробега нейтронов, необходимо исследование достаточности применения для их расчетов групповых констант и влияния граничных резонансных эффектов на их характеристики, что является целью данной работы.

Рассмотрим расчетную модель реактора типа БН-1600 с гетерогенной активной зоной [8]. Это цилиндрическая модель с окисным уран-плутониевым топливом ( $UO_2$ -PuO<sub>2</sub>) в зонах малого обогащения (ЗМО), с боковым экраном (БЭ) из двуоксида урана ( $UO_2$ ) и с радиальными кольцами (внутренние зоны воспроизводства – ВЗВ) с воспроизводящим материалом – металлическим <sup>238</sup>U (заметный эффект уменьшения времени удвоения по сравнению с окисным воспроизводящим материалом [9]). Из-за резонансного характера сечения поглощения урана нейтроны резонансных энергий сильнее поглощаются в поверхностных слоях ВЗВ – эффект резонансной самоэкранировки. В случае металлического урана эффект увеличивается за счет малого сечения разбавления воспроизводящей вставки, но уменьшается из-за жесткого нейтронного спектра. В окисных вставках – наоборот. Общая величина резонансного гетерогенного эффекта зависит от жесткости спектра

ра и размеров вставок. В рассматриваемой модели большой резонансный эффект получается для воспроизводящих зон из металлического урана.

Ядерные плотности материалов приведены в табл. 1. В целях определения влияния на исследуемые характеристики реактора межкассетного натрия и стенок кожухов граничных сборок рассматривалась вторая расчетная модель, отличающаяся от первой тем, что на границах физических зон дополнительно выделено шесть зон с толщинами по 8 мм каждая, состоящих из смеси натрия и стали. Таким образом, первая модель состоит из семи физических зон, а вторая из тринадцати; при этом загрузка всех материалов в реактор сохранена.

Таблица 1

**Ядерные плотности нуклидов ( $10^{24}$  яд. см $^{-3}$ ) в гомогенной модели реактора БН-1600**

Нуклид	ВЗВ 1, 2, 3	ЗМО 1, 2, 3	БЭ
$^{238}\text{U}$	0,01953	0,006978	0,00851
$^{239}\text{Pu}$	–	0,0009215	–
$^{240}\text{Pu}$	–	0,0003064	–
$^{241}\text{Pu}$	–	0,0002303	–
$^{242}\text{Pu}$	–	0,00007677	–
O	–	0,01703	0,01703
Na	0,005608	0,007852	0,007852
C	0,003004	0,003004	0,003004
Fe	0,01141	0,01141	0,01141
Ni	0,0021	0,0021	0,0021
Mo	0,000187	0,000187	0,000187

В таблице 2 приведены ядерные плотности материалов для второй модели. По программе FFCP-MULT были проведены расчеты обеих моделей в групповом (28

Таблица 2

**Ядерные плотности нуклидов ( $10^{24}$  яд. см $^{-3}$ ) в гетерогенной модели реактора БН-1600**

Нуклид	Na+сталь	ВЗВ 1	ВЗВ 2, 3	ЗМО 1, 2	ЗМО 3	БЭ
$^{238}\text{U}$	–	0,020335	0,020811	0,0071241	0,0070739	0,0085704
$^{239}\text{Pu}$	–	–	–	0,0009408	0,00093417	
$^{240}\text{Pu}$	–	–	–	0,00031282	0,00031061	
$^{241}\text{Pu}$	–	–	–	0,00023512	0,00023347	
$^{242}\text{Pu}$	–	–	–	0,00007838	0,00007783	
O	–	–	–	0,017387	0,017264	0,017151
Na	0,0130	0,0053032	0,0051233	0,0077442	0,0077812	0,0078155
C	0,0075	0,0028186	0,0027092	0,0029098	0,0029422	0,0029721
Fe	0,0285	0,010705	0,010289	0,011052	0,011175	0,011289
Ni	0,0052	0,0019722	0,0018967	0,0020351	0,0020574	0,002078
Mo	0,0005	0,00017409	0,00016648	0,00018045	0,0001827	0,00018478

энергетических групп) и подгрупповом варианте с использованием констант БНАБ: всего четыре расчета на одинаковой пространственной сетке (103 геометрические зоны) в цилиндрической геометрии. Резонансная структура принималась во внимание для  $^{238}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ , учет остальных нуклидов ничего существенного не внес.

Рассмотрим групповой и подгрупповой расчеты по первой модели с константами, блокированными по спектрам гомогенных сред. Подгрупповой расчет по отношению к групповому дает эффект резонансной гетерогенности для первой модели, т.е. учет подгруппового разбиения ядерных данных. В групповом расчете первой модели  $k_{эфф} = 1,01295$ , в подгрупповом  $k_{эфф} = 1,01372$ . Групповой расчет второй модели назовем «гетерогенным групповым расчетом», а подгрупповой – «гетерогенным подгрупповым расчетом» – учет увеличения числа расчетных зон. Гетерогенный подгрупповой расчет по отношению к гетерогенному групповому расчету дает эффект резонансной гетерогенности для второй модели. Для второй модели в гетерогенном групповом расчете  $k_{эфф} = 1,01544$ , а в гетерогенном подгрупповом  $k_{эфф} = 1,01583$ . Гетерогенный групповой расчет второй модели по отношению к групповому расчету первой модели дает спектральную составляющую полного гетерогенного эффекта, т.е. эффект пространственной гетерогенности, обусловленный слоями с натрием и сталью. Гетерогенный подгрупповой расчет второй модели по отношению к групповому расчету первой модели дает полный гетерогенный эффект – учет подгруппового разбиения ядерных данных и увеличения числа расчетных зон. Отношение полного гетерогенного эффекта к спектральному гетерогенному эффекту дает резонансный гетерогенный эффект второй модели, что как раз и позволяет оценить резонансные краевые эффекты на границах зон для реалистичной второй модели.

Гетерогенные эффекты, проявляющиеся в распределениях средних сечений захвата на  $^{238}\text{U}$  (индекс  $C^8$ ) и делений на  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{U}$  (индексы  $f^9$  и  $f^8$ ), представлены на рис. 1–4 (реальные размеры пар крайних твэлов и зон с натрием и сталью из-за их малых размеров увеличены для лучшего изображения краевых эффектов). Представление о действительных размерах приграничных областей, в которых проявляются краевые эффекты, наглядно дает рис. 4, где изображена реальная пространственная расчетная сетка. Гетерогенные эффекты в скоростях процессов на этих же нуклидах имеют такие же распределения за исключением областей, где данные нуклиды реально отсутствуют:  $f^9$  для ВЗВ и слоев с натрием и сталью для всех трех индексов, что и показано на рис. 4 в виде разрывов в гистограмме распределения полного гетерогенного эффекта в скорости захвата на  $^{238}\text{U}$  (индекс  $C^8$ ). Рисунки 1а–3а показывают распределение полного гетерогенного эффекта в индексах  $C^8$ ,  $f^9$  и  $f^8$ :

$$A_i^x(r) = \frac{\sum_{g=1}^{NG} \sum_{p=1}^{NP} \varphi_p^{2,g}(r) \sigma_{x,i,p}^g(r)}{\sum_{g=1}^{NG} \varphi^{1,g}(r) \sigma_{x,i}^g(r)} ,$$

$\varphi^g$ ,  $\varphi_p^g$  – групповой и подгрупповой потоки в группе  $g$ ;  $i$  – индекс нуклида ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ );  $x$  –  $c, f$ ;  $\sigma^g$ ,  $\sigma_p^g$  – групповое и подгрупповое сечения в группе  $g$ ;  $NG$  – число энергетических групп;  $NP$  – число подгрупп в группе  $g$ ; 1, 2 – номера расчетной модели.

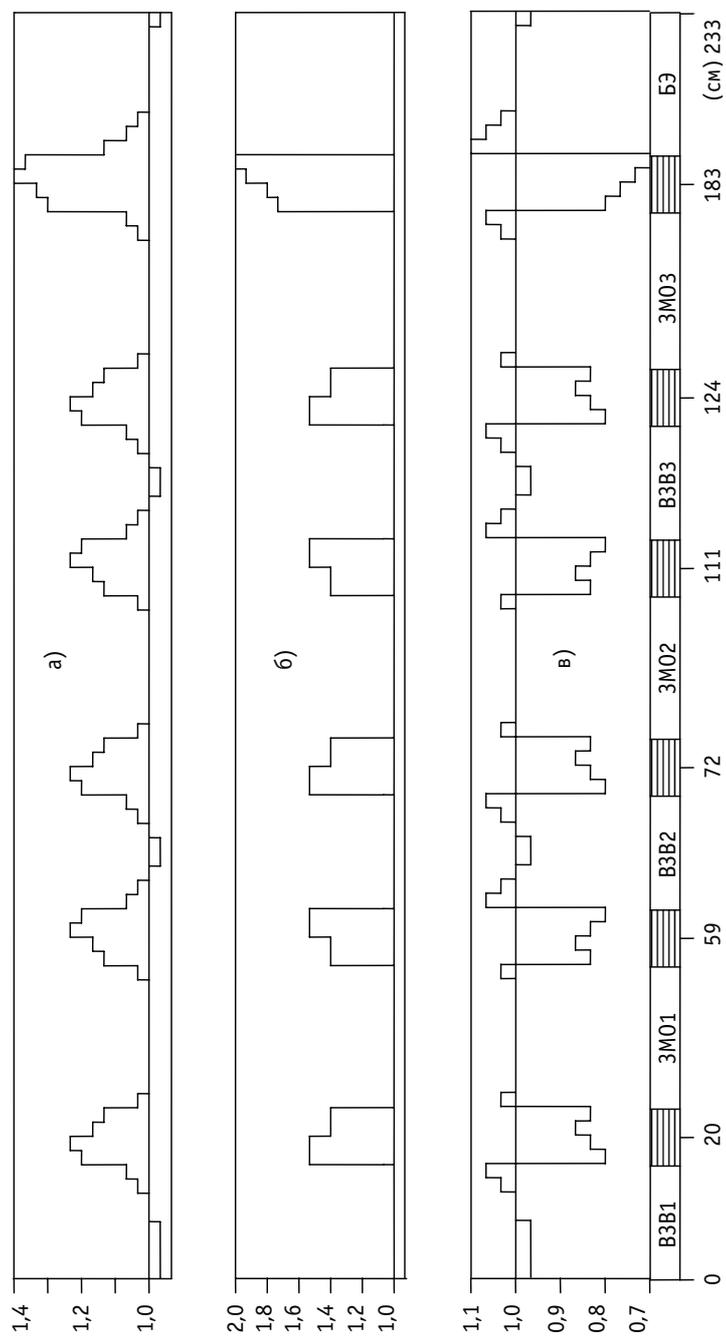


Рис. 1. Полный (а), спектральный (б) и резонансный (в) гетерогенные эффекты в среднем сечении захвата  $^{238}\text{U}$ : – слой натрия + сталь

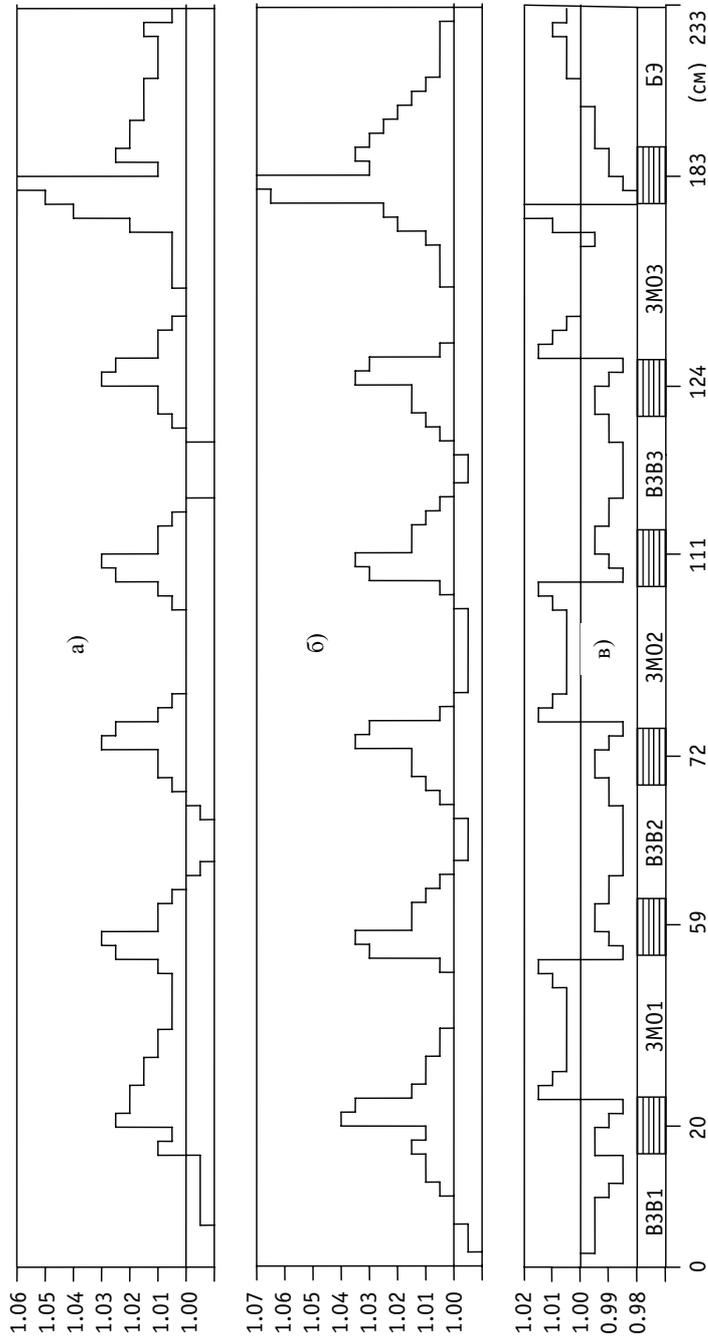


Рис. 2. Полный (а), спектральный (б) и резонансный (в) гетерогенные эффекты в среднем сечении деления  $^{239}\text{Pu}$ : – слой натрия + сталь

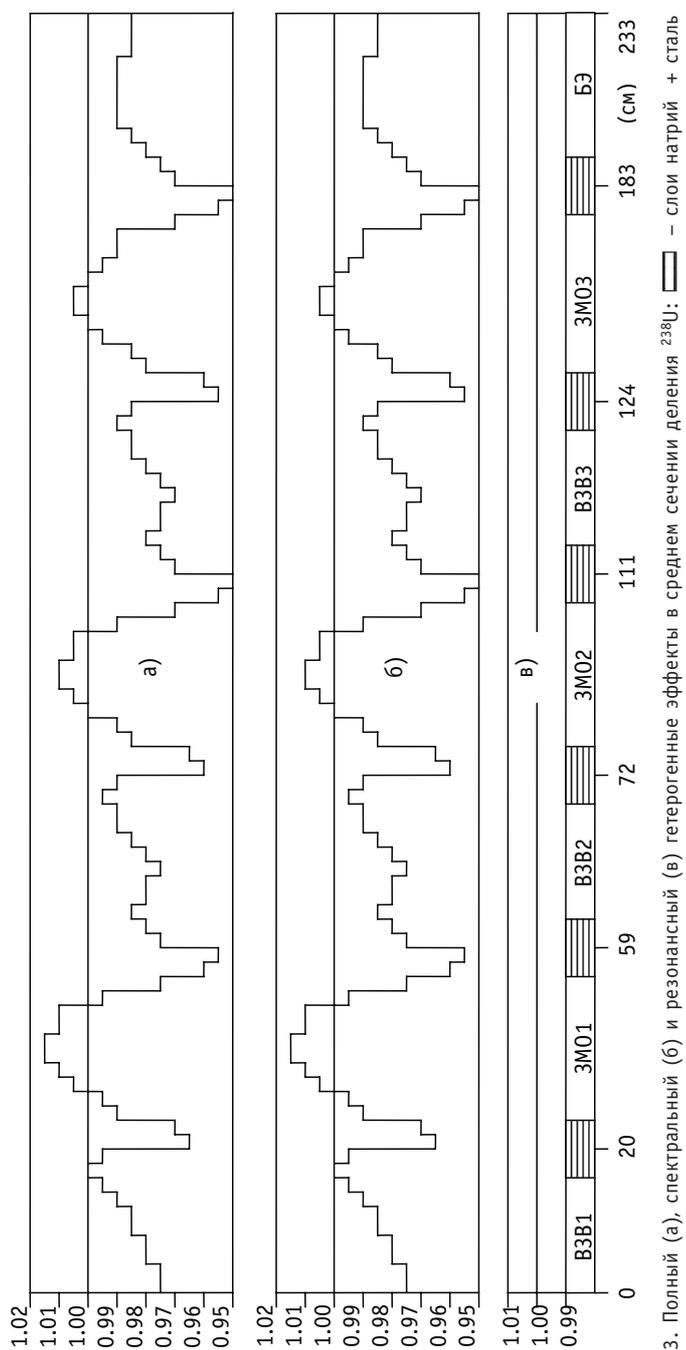


Рис. 3. Полный (а), спектральный (б) и резонансный (в) гетерогенные эффекты в среднем сечении деления  $^{238}\text{U}$ : – слой натрия + сталь

Рисунки 1б–3б – спектральный гетерогенный эффект:

$$B_i^x(r) = \frac{\sum_{g=1}^{NG} \varphi^{2,g}(r) \sigma_{x,i}^g(r)}{\sum_{g=1}^{NG} \varphi^{1,g}(r) \sigma_{x,i}^g(r)} .$$

Рисунки 1в–3в – эффект резонансной гетерогенности:

$$B_i^x(r) = \frac{A_i^x(r)}{B_i^x(r)} = \frac{\sum_{g=1}^{NG} \sum_{p=1}^{NP} \varphi_p^{2,g}(r) \sigma_{x,i,p}^g(r)}{\sum_{g=1}^{NG} \varphi^{2,g}(r) \sigma_{x,i}^g(r)} .$$

Произведение двух последних эффектов дает полный гетерогенный эффект.

Перейдем к анализу расчетных результатов. Индекс  $C^8$  (рис. 1, 4) слабо чувствителен к спектральной составляющей – резонансный и полный гетерогенные эффекты в  $C^8$  практически совпадают. Слои со сталью и натрием из-за отсутствия в них урана разблокируют сечение захвата на  $^{238}\text{U}$ , что проявляется в резких подъемах его среднего сечения в слоях со сталью от 20 до 38%. Тем самым несколько увеличивается резонансная самоэкранировка: всплески  $C^8$  в крайних твэлах ВЗВ до 6% и уменьшение  $C^8$  внутри ВЗВ до  $-1,5\%$ . Из-за более жесткого спектра в меньшей степени это наблюдается в ЗМО – в крайних твэлах  $C^8$  увеличивается на 3%.

Иная картина наблюдается в индексе  $f^8$  (рис. 3). В силу практического отсутствия резонансной структуры в сечении деления  $^{238}\text{U}$  спектральная составляющая гетерогенного эффекта совпадает с полным гетерогенным эффектом. Осцилляции в спектральной составляющей в  $f^8$  незначительны: от 1,5% в ЗМО до  $-5\%$  в слоях натрия и стали, где неупругое рассеяние на стали и натрия уводит нейтроны под порог деления  $^{238}\text{U}$ .

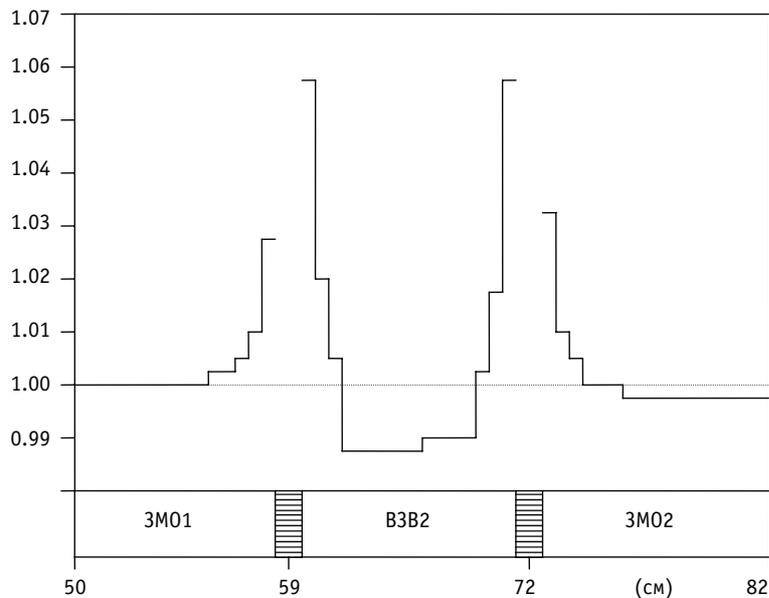


Рис. 4. Полный гетерогенный эффект в скорости захвата на  $^{238}\text{U}$  на расстояниях от 50 до 82 см в реальном пространственном масштабе

В индексе  $f^p$  (рис. 2) проявляются обе составляющие гетерогенного эффекта. Полный гетерогенный эффект во всплесках  $f^p$  в крайних твэлах на границах зон составляет от 1 до 3,5% (рис. 2а). Слабые осцилляции спектральной составляющей  $f^p$  (рис. 2б) связаны с энергетической зависимостью сечения деления. В силу общей жесткости спектра в ЗМО слабо проявляется резонансная самоэкранировка. Слои стали и натрия незначительно разблокируют  $f^p$  в крайних твэлах на границах ЗМО – от 1 до 2,5%.

Всплески скорости деления (из-за резонансной гетерогенности) на  $^{239}\text{Pu}$  в приграничных твэлах топливных сборок от 1 до 2,5% не могут привести к заметному перекоосу поля энерговыделения. Увеличение по той же причине скорости захвата  $^{238}\text{U}$  в крайних твэлах воспроизводящих сборок на  $\sim 6\%$  компенсируется ее понижением в центре ВЗВ, что не приводит к изменению КВ. Эффект резонансной гетерогенности в  $k_{\text{эфф}}$  получается для всего реактора менее 0,1%, как впрочем и для коэффициентов размножения для бесконечных сред в расчетах ячеек отдельных сборок [10].

Таким образом, расчетные исследования направленные на изучение граничных резонансных эффектов и собственно резонансной гетерогенности в реакторе типа БН-1600 с гетерогенной активной зоной выявили их небольшое влияние на нейтронно-физические характеристики реактора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В реакторах на быстрых нейтронах вблизи границ раздела физических зон имеются переходные области, в которых резонансные структуры нейтронных спектров соседних зон испытывают взаимное влияние, что обуславливает наличие граничных резонансных эффектов. Традиционные многогрупповые численные методики не могут их учитывать. Исследованы граничные резонансные эффекты в модели большого энергетического быстрого реактора с гетерогенной активной зоной. Они не оказывают существенного влияния на основные нейтронно-физические характеристики реактора (энерговыделение, КВ, критичность) из-за общей жесткости спектра и наличия  $^{238}\text{U}$  как в ВЗВ, так и в ЗМО. Наличие эффективного расчетного инструмента позволяет производить оценку граничных резонансных эффектов в быстрых реакторах различного класса.

**Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 09-02-97513).**

## Литература

1. Поплавский В.М., Цибуля А.М., Хомяков Ю.С. и др. Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого натриевого реактора // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 206-211.
2. Бурьевский И.В., Елисеев В.А., Мальшева И.В. и др. Эффекты реактивности в активных зонах перспективного быстрого реактора большой мощности с различными величинами НПЭР // Препринт ФЭИ-3129. – Обнинск. – 2008.
3. Поплавский В.М., Забудько Л.М., Шкабура И.А. и др. Топливо для перспективных быстрых натриевых реакторов – текущее состояние и планы // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 212-217.
4. Кесслер Г. Ядерная энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Безбородов А.А., Клинов Д.А., Колесов В.В. и др. Макроподгрупповое моделирование реакторной установки на быстрых нейтронах // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 177-184.

6. *Безбородов А.А., Долгов Е.В., Клинов Д.А. и др.* Физический расчет реакторной установки на быстрых нейтронах с использованием сингулярных функций//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 177-184.
7. *Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulya A.M.* The ABBN-93 Group Data Library. Part 1: Nuclear Data for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields. INDC(CCP)-409/L, Vienna, IAEA, 1997, P. 65.
8. *Троянов М.Ф., Матвеев В.И., Новожилов А.И. и др.* Концепция активных зон энергетических реакторов на быстрых нейтронах; оптимизация физических характеристик реактора БН-1600/ In Proceedings of an international symposium on fast reactor physics (Aix-en-Provence, 24-28 September 1979). V. II, Vienna, IAEA, 1980. – P. 117-133.
9. *Бобров С.Б., Данилычев А.В., Елисеев В.А. и др.* Пути развития быстрых энергетических реакторов с высоким коэффициентом воспроизводства//Атомная энергия. – 1983. – Т. 54. – Вып. 4. – С. 269-273.
10. *Морозов А.Г., Слесарев И.С., Кузьминов В.В.* Погрешности расчетных моделей в исследованиях нейтронно-физических характеристик быстрых реакторов с гетерогенными активными зонами//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1983. – Вып. 5(34). – С. 61-65.

Поступила в редакцию 21.03.2012

## ОЦЕНКА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В МИШЕНИ С УРАНСОДЕРЖАЩИМ МАТЕРИАЛОМ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ $^{99}\text{Mo}$ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИШЕНЕЙ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ 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*



Увеличение производства  $^{99}\text{Mo}$  в условиях мирового дефицита является актуальной задачей. При переходе на новую мишень проточного типа [1] для наработки  $^{99}\text{Mo}$  возникла необходимость оценки энерговыделения для обоих типов мишеней. Результаты расчетов показали значительное увеличения энерговыделения для модернизированной мишени.

**Ключевые слова:** реактор ВВР-ц,  $^{99}\text{Mo}$ , энерговыделение.

**Key words:** WWR-c reactor,  $^{99}\text{Mo}$ , energy deposition.

### ВВЕДЕНИЕ

В качестве расчетной модели для определения энерговыделения в мишенях использовалась прецизионная трехмерная модель активной зоны реактора ВВР-ц [2].

Мишень для производства осколочного  $^{99}\text{Mo}$  должна удовлетворять следующим требованиям:

- иметь размеры и конструкцию, которые позволяют обеспечить ее загрузку в канал ядерного реактора и выгрузку из него;
- содержать достаточное количество  $^{235}\text{U}$ ;
- обеспечивать барьер, препятствующий выбросу радиоактивных продуктов и особенно газов во время и после облучения;
- конструкция мишени должна быть легко разборной в условиях горячей камеры;
- иметь конструкцию и состав, обеспечивающие ее химическую переработку в горячей камере за минимальное время.

Целесообразно, чтобы в процессе радиохимической переработки мишени количество жидких радиоактивных отходов было минимальным. Длительность переработки урановой мишени существенным образом влияет на выход  $^{99}\text{Mo}$ . Из-за распада каждый час теряется около 1,5% образовавшегося в мишени  $^{99}\text{Mo}$ . Поэтому операции с мишенью при ее разделке в горячей камере должны быть достаточно простыми и легко выполнимыми.

© О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, Р.В. Фомин, 2012

В настоящее время для производства осколочного  $^{99}\text{Mo}$  используется мишень, содержащая уран высокого обогащения (около 90 %) по  $^{235}\text{U}$ .

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рисунках 1–3 приводятся конструкции и расположения стандартной используемой в настоящее время мишени типа «стакан в стакане». Конструкция мишени, помимо удовлетворения основным требованиям при работе в реакторе, ориентирована на удобство переработки ее в условиях горячей камеры.

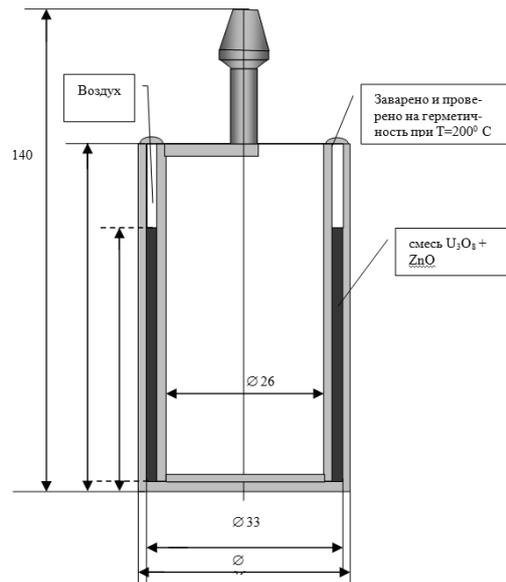


Рис. 1. Конструкция стандартной мишени для производства  $^{99}\text{Mo}$  типа «стакан в стакане»

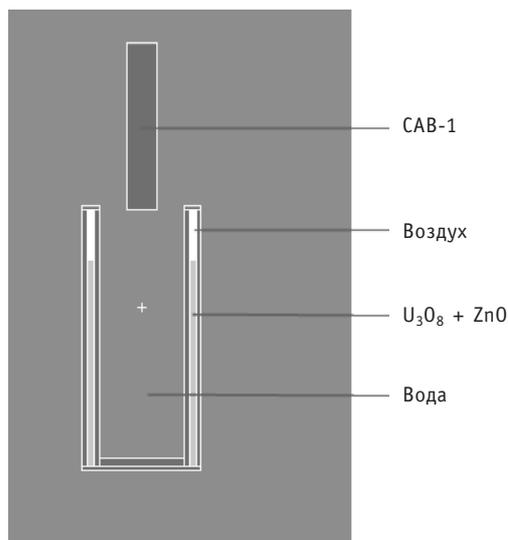


Рис. 2. Детализация стандартной мишени для производства  $^{99}\text{Mo}$  в модели активной зоны реактора ВВР-ц

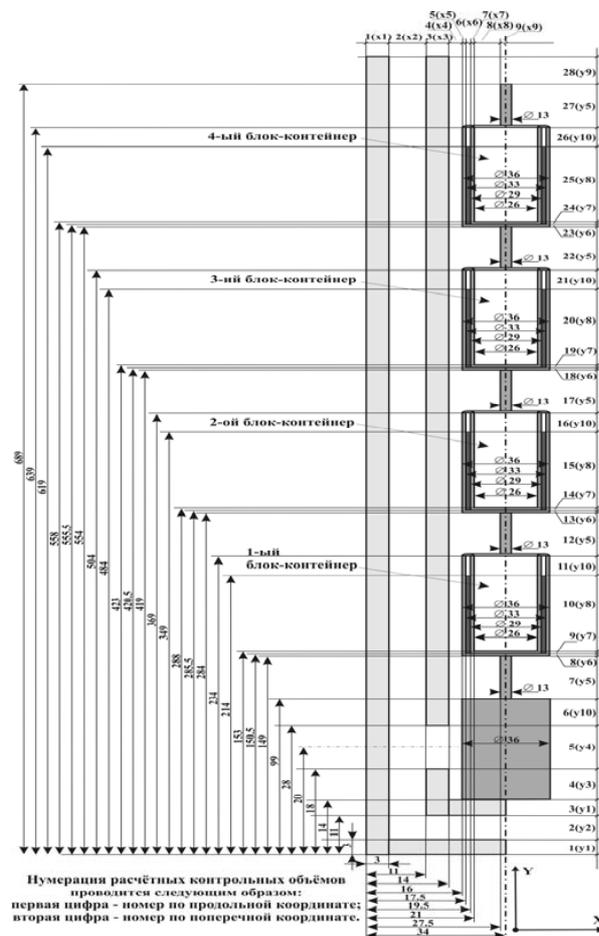


Рис. 3. Расположение стандартных мишеней в экспериментальном канале

Загрузка смеси в мишень осуществляется с помощью разработанного механического устройства. Одновременно с загрузкой происходит уплотнение засыпки. После заварки мишени осуществляется проверка ее на герметичность при температуре 200°C. Конструкция мишени оказалась работоспособной и не претерпела существенных изменений за весь период наработки  $^{99}\text{Mo}$  в институте. Изменялись лишь величина загрузки урана и состав компонента разбавителя.

Мишень может быть установлена как в экспериментальный канал с естественной циркуляцией, так и в каналы с принудительным охлаждением. При этом загрузка мишени по  $^{235}\text{U}$  может отличаться более чем в 10 раз. Для увеличения наработки  $^{99}\text{Mo}$  в канале дальнейшая модернизация существующей конструкции мишени была направлена на увеличение в ней количества загруженного урана. При этом были увеличены габаритные размеры мишени и предложено техническое решение, облегчающее расцепление двух цилиндров после взрезки мишени.

На рисунках 4, 5 представлена конструкция модифицированной мишени. Мишень с проточным охлаждением представляет собой трубчатую конструкцию со сквозным проходом воды для улучшения теплосъема. Между внутренней и наружной трубками помещается смесь  $^{235}\text{U}$  (90 %) и оксида цинка. Одновременно в канал устанавливается не более двух мишеней. Предварительные оценки показали возможность увеличения загрузки урана за счет улучшения теплоотвода от мише-

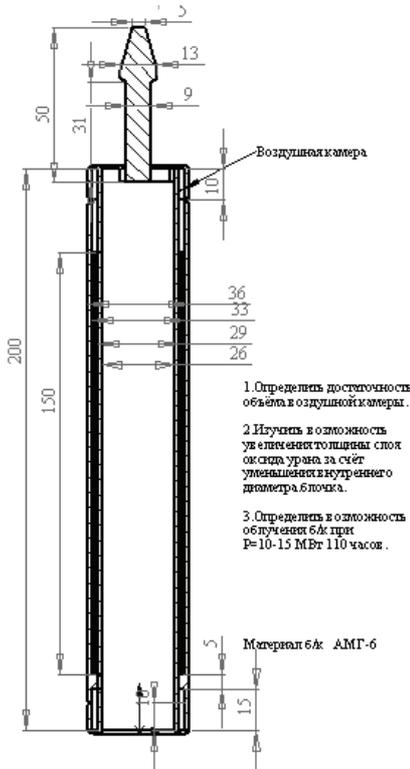


Рис. 4. Конструкция модифицированной мишени для производства  $^{99}\text{Mo}$

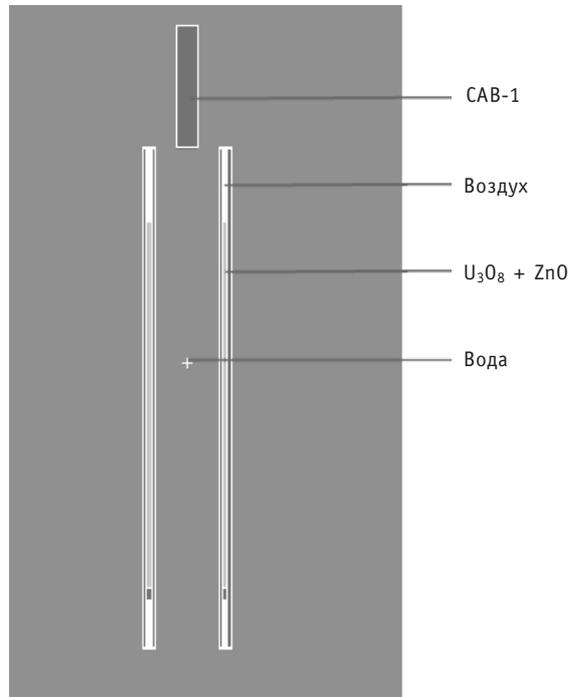


Рис. 5. Детализация модифицированной мишени для производства  $^{99}\text{Mo}$  в модели активной зоны реактора ВВР-ц

ни и, как следствие, увеличения наработки  $^{99}\text{Mo}$  в 1.7 раза по сравнению с мишенью типа «стакан в стакане».

На рисунках 6, 7 приводятся горизонтальный и вертикальный разрезы части модели активной зоны с экспериментальным каналом 4-1 и установленной в нем мишенью.

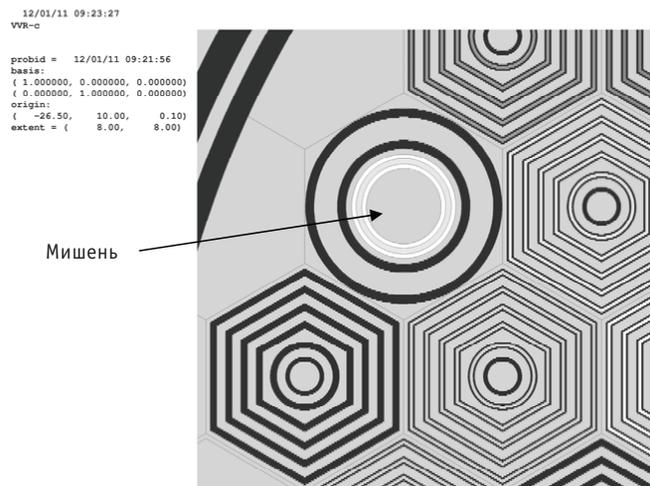


Рис. 6. Экспериментальный канал 4-1 с установленными модифицированными мишенями (горизонтальный разрез)

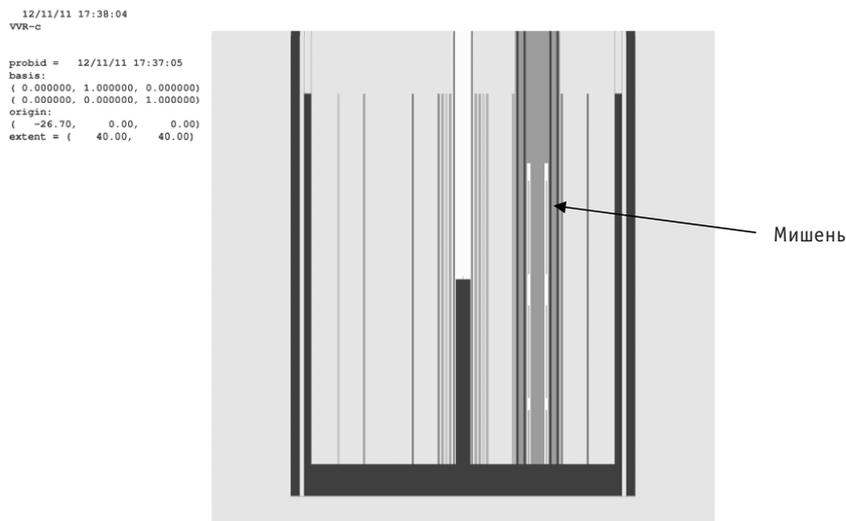


Рис. 7. Экспериментальный канал 4-1 с установленными модифицированными мишенями (вертикальный разрез)

Топливо мишени представляет собой смесь  $U_3O_8 + ZnO$  с обогащением по  $^{235}U$ , равным 90 %, с массой  $U_3O_8$  – 15 г и  $ZnO$  – 75 г. Температура топлива в мишени полагалась равной 175°C, в активной зоне – 75°C, тепловая мощность реактора – равной 10 МВт.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рисунках 8, 9 приводится энергетическое распределение плотности потока нейтронов в стандартной и модифицированной мишенях. Из рисунков видно, что в трех из четырех стаканов модифицированной мишени плотность потока тепловых нейтронов превышает соответствующую плотность потока тепловых нейтронов стандартной мишени. Это приводит к значительному увеличению энерговыделения в модифицированной мишени. Результаты расчетов энерговыделения в контейнерах для стандартной и модифицированной мишеней приведены в табл. 1, 2.

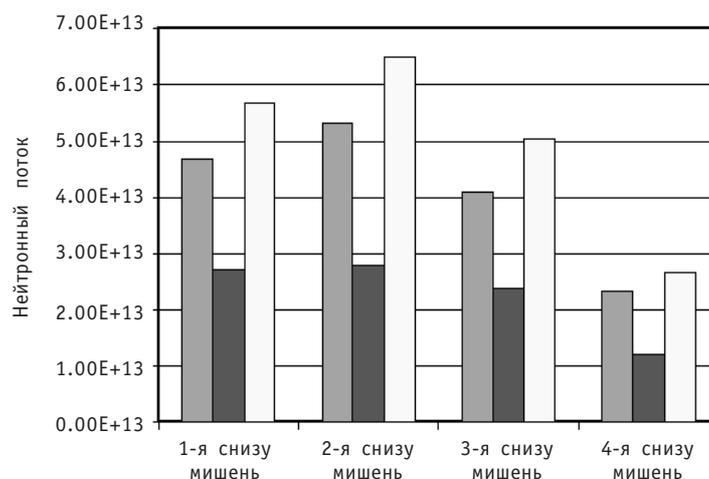


Рис. 8. Энергетическое распределение плотности потока нейтронов в каждом из четырех стаканов стандартной мишени: ■ – 0–0,2 кэВ; ■ – 0,2–5 кэВ; □ – 5 кэВ–10 МэВ

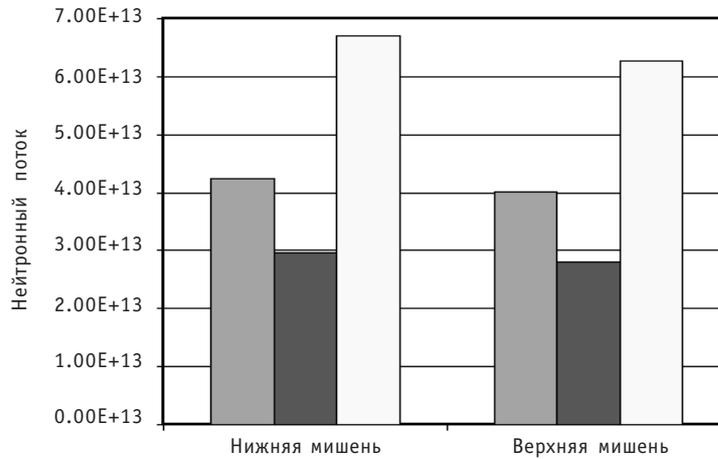


Рис. 9. Энергетическое распределение плотности потока нейтронов в каждом из двух стаканов модифицированной мишени: □ – 0–0,2 кэВ; ■ – 0,2–5 кэВ; ◻ – 5 кэВ–10 МэВ

Таблица 1

**Энерговыделение в контейнерах стандартной мишени**

Энерговыделение от нейтронов и фотонов	Модель		
	МВт	МВт/г U-235	МВт/г U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Первая снизу из четырех	0.0057	0.00166	0.00126
Вторая снизу из четырех	0.0062	0.00181	0.00138
Третья снизу из четырех	0.0051	0.00149	0.00113
Четвертая снизу из четырех	0.0026	0.00076	0.00058
Общее	0.0196	0.00143	0.00109
Масса U-235 в одной мишени = 3.4242 г, U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> – 4.5 г.			
$K_{eff}$	1.00897±0.00034		

Таблица 2

**Энерговыделение в контейнерах модифицированной мишени**

Энерговыделение от нейтронов и фотонов	МВт	МВт/г U-235	МВт/г U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
Нижняя мишень	0.0169	0.00148	0.00112
Верхняя мишень	0.0160	0.00140	0.00106
Общее	0.0329	0.00144	0.00109
Масса U-235 в одной мишени 11.4243 г, U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> – 15 г.			
$K_{eff}$	1.01097±0.00034		

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных исследований показано значительное увеличение энерговыделения в мишенях новой улучшенной конструкции проточного типа.

Мощность модифицированного канала с принудительным охлаждением составила 32.9 кВт, что почти в 1.7 раза больше (19.6 кВт) энерговыделения в канале при загрузке мишеней старой конструкции типа «стакан в стакане» (см. табл. 1,

2). Это позволяет нарабатывать большее количество радионуклида  $^{99}\text{Mo}$  при таких же уровне мощности и кампании реактора ВВР-ц. При этом себестоимость молибден-технециевых генераторов может быть уменьшена и, как следствие, диагностические процедуры для онкологических больных станут доступнее.

### **Литература**

1. Kochnov O.Yu., Pozdeev V.V. Prospects for the Development of Mo-99 Production Consistent with WWR-c Reactor Modernization at the Branch of FSUE «Karpov Institute of Physical Chemistry»/ International Conf. on Research Reactors, IAEA, Morocco-2011. – P. 60-61.

2. 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.

Поступила в редакцию 28.05.2012

# МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ $^{16}\text{N}$ ДЛЯ ПОВЕРКИ РАДИАЦИОННЫХ КАНАЛОВ КОНТРОЛЯ НА АЭС ТИПА ВВЭР

**В.А. Хрячков\*, И.П. Бондаренко\*, П.А. Дворников\*, Б.В. Журавлев\*, С.Н. Ковтун\*, Т.А. Хромьева\*, А.В. Павлов\*\*, Н.Г. Роцин\*\***

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

*\*\*Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-сервисный центр диагностики оборудования АЭС НИКИЭТ», г. Москва*



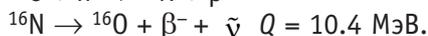
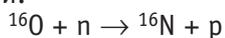
Проанализированы преимущества использования ядерной реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  при генерации  $^{16}\text{N}$  для проверки радиационных каналов контроля на энергетических реакторах типа ВВЭР. Для уточнения энергетической зависимости сечения реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  выполнены измерения, в которых использован ряд новых методических приемов, позволяющих существенно снизить фон и улучшить надежность определения количества событий, соответствующих реакции.

**Ключевые слова:** радиационный контроль течи теплоносителя, активность, ядерные реакции, калибровка датчика радиоактивности, энергетические установки.

**Key words:** radiation control of coolant leak, radioactivity, nuclear reaction, radioactivity detector calibration, power stations

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов контроля течи в трубопроводах первого контура реакторов типа ВВЭР является радиационный контроль активности  $^{16}\text{N}$  в остром паре. При прохождении теплоносителя ( $\text{H}_2\text{O}$ ) через активную зону реактора происходит взаимодействие быстрых нейтронов с кислородом, приводящее к образованию  $^{16}\text{N}$ , который распадается обратно в кислород с испусканием жестких  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучений.



Экспозиционная доза вблизи поверхности трубы первого контура практически полностью определяется активностью  $^{16}\text{N}$  и составляет порядка 15 Р/ч при номинальной мощности реакторной установки. При аварийной утечке воды из первого контура вся просочившаяся наружу вода практически мгновенно превращается в пар, так как температура трубы составляет приблизительно 350°C. При этом атомы изотопа  $^{16}\text{N}$  также окажутся в атмосфере помещения вблизи трубопровода, и регистрация их активности будет индикатором протечки. Для того, чтобы такая система использовалась в качестве расходомера течи, требуется калибровка системы детектирования  $^{16}\text{N}$ , который является достаточно короткожи-

© В.А. Хрячков, И.П. Бондаренко, П.А. Дворников, Б.В. Журавлев, С.Н. Ковтун, Т.А. Хромьева, А.В. Павлов, Н.Г. Роцин, 2012

вущим ( $T_{1/2} = 7.11$  с) и не может быть приготовлен в качестве стандартного источника.

Однако калибровка системы радиационного контроля активности может быть осуществлена на стенде с использованием ускорителя заряженных частиц или стандартного источника нейтронов. Возможна наработка  $^{16}\text{N}$  в следующих ядерных реакциях:

- $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$ ,  $Q = -10.4$  МэВ;
- $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ ,  $Q = -1.52$  МэВ.

Реакция  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  вследствие более низкого значения ее энергии позволяет использовать для производства  $^{16}\text{N}$  как стандартные нейтронные источники, такие как  $^{252}\text{Cf}$  или Pu-Be, так и доступные низковольтные ускорители заряженных частиц ( $< 2$  МВ) с дейтериевой мишенью для производства нейтронов. К тому же, сечение реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  в диапазоне энергий нейтронов 4,5–7,5 МэВ существенно больше сечения реакции  $^{16}\text{O}(n, p)^{16}\text{N}$  при энергии нейтронов порядка 14 МэВ.

Наиболее важной характеристикой при наработке радионуклидного изотопа является сечение ядерной реакции, но имеющиеся на данный момент экспериментальные данные [1–3] имеют большой разброс до  $\sim 1,5$  раз в диапазоне энергий нейтронов 5,0–7,5 МэВ. Поэтому нами были предприняты новые измерения с использованием цифровых методов регистрации событий, позволяющих существенно снизить фон и улучшить надежность определения количества событий, соответствующих реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ .

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения сечения реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  были выполнены на ускорителе ЭГ-1 ГНЦ РФ-ФЭИ. Нейтроны генерировались в реакции  $\text{D}(d, n)$  на твердой титановой мишени толщиной  $0.97$  мг/см<sup>2</sup>. Измерения были проведены в интервале энергий нейтронов от 4.0 до 7.35 МэВ.

Исследования сечения проводились с помощью детектора, представляющего собой двойную ионизационную камеру. Одна часть камеры представляла собой ионизационную камеру с сеткой Фриша и служила для спектрометрии продуктов изучаемой реакции. Дополнительная плоскопараллельная камера, содержащая слой урана-238, служила для мониторинга нейтронного потока (рис. 1).

Сигналы с различных электродов камеры усиливались и затем оцифровывались с помощью оцифровщика формы импульсов LeCroy 2262. Извлечение физической информации из цифровых сигналов проводилось программным путем. В процессе обработки извлекалась информация об амплитудах анодного и катодного сигналов, а также моментах начала и окончания этих сигналов. Анализ этой информации позволил определить энергию заряженных частиц, положение места возникновения события в межэлектродном пространстве и тип регистрируемой частицы.

Камеры заполнялись смесью 95%Kr + 5%CF<sub>4</sub>, находящейся под давлением четырех атмосфер (абсолютных). Фтор, содержащийся в рабочем газе, служил мишенью для налетающих нейтронов. Использование газовой мишени позволило значительно увеличить число ядер в изучаемом образце и, следовательно, сократить время измерений. Использование методов коллимации быстрых нейтронов в сочетании с методами цифровой обработки сигналов позволило отбирать для анализа только те события, для которых место рождения находилось внутри газовой ячейки, находящейся внутри чувствительного объема камеры. Преимуществом такого подхода является, в частности, то, что при правильном выборе размеров и положения газовой ячейки удается почти полностью подавить стеночный эффект. Кроме того, для фиксированной ячейки число атомов фтора в мишени может быть легко определено с использованием простейших газовых законов.

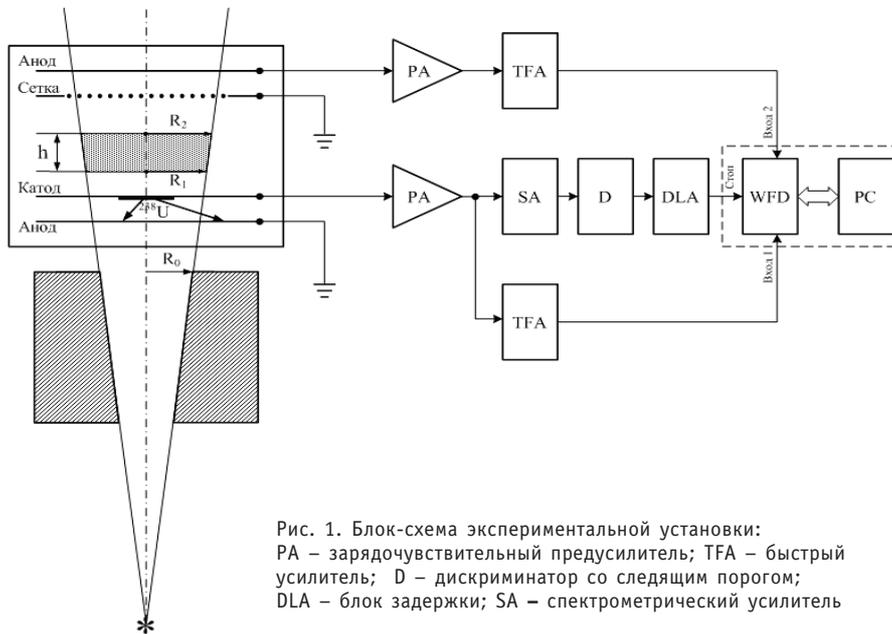


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:  
 PA – зарядочувствительный предусилитель; TFA – быстрый усилитель; D – дискриминатор со следящим порогом; DLA – блок задержки; SA – спектрометрический усилитель

Время нарастания анодного сигнала несет в себе информацию о типе регистрируемой частицы. Действительно, если взять, например,  $\alpha$ -частицу и протон одной энергии, то длина пробега и время собирания заряда для протона окажутся значительно больше, чем для  $\alpha$ -частицы. В данной работе удалось использовать этот принцип для разделения частиц по типу и за счет этого фон, обусловленный паразитными реакциями, протекающими на рабочем газе и электродах детектора, заметно уменьшить. На рисунке 2 показан спектр анодных сигналов, снимаемых с детектора (рис. 2а), и тот же спектр после подавления фона (рис. 2б). В полученном после подавления фона спектре наблюдается ряд линий, соответствующих разным каналам реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ . Отметим, что наблюдаемые пики соответствуют случаю вылета  $\alpha$ -частицы в направлении движения падающих нейтронов. Функция отклика спектрометра при регистрации продуктов реакции, протекающей на легком ядре, имеет сложную форму. Кинетическая энергия продуктов реакции всегда равна сумме энергии падающих нейтронов и энергии реакции.

Однако в зависимости от угла разлета  $\alpha$ -частицы и остаточного ядра ( $^{16}\text{N}$ ) эта энергия по-разному распределяется между продуктами реакции. В процессе работы было обнаружено, что сигнал, производимый  $\alpha$ -частицей, всегда пропорционален ее энергии, в то время как для остаточного ядра велик амплитудный дефект, и много энергии теряется в упругих столкновениях, не приводящих к ионизации среды, в которой она движется. При этом, если  $\alpha$ -частица испускается в направлении движения падающих нейтронов, то она уносит большую часть кинетической энергии, а на долю остаточного ядра, для которого велик амплитудный дефект, приходится лишь небольшая доля энергии. Такие события формируют отчетливый пик в энергетическом спектре. Если же в направлении движения нейтронов испускается остаточное ядро, то значительная часть энергии не пойдет на ионизацию и амплитуда сигнала окажется меньше. Такие события, также принадлежащие изучаемому каналу реакции, будут лежать левее указанного четкого пика, и их также необходимо учитывать при определении сечения реакции.

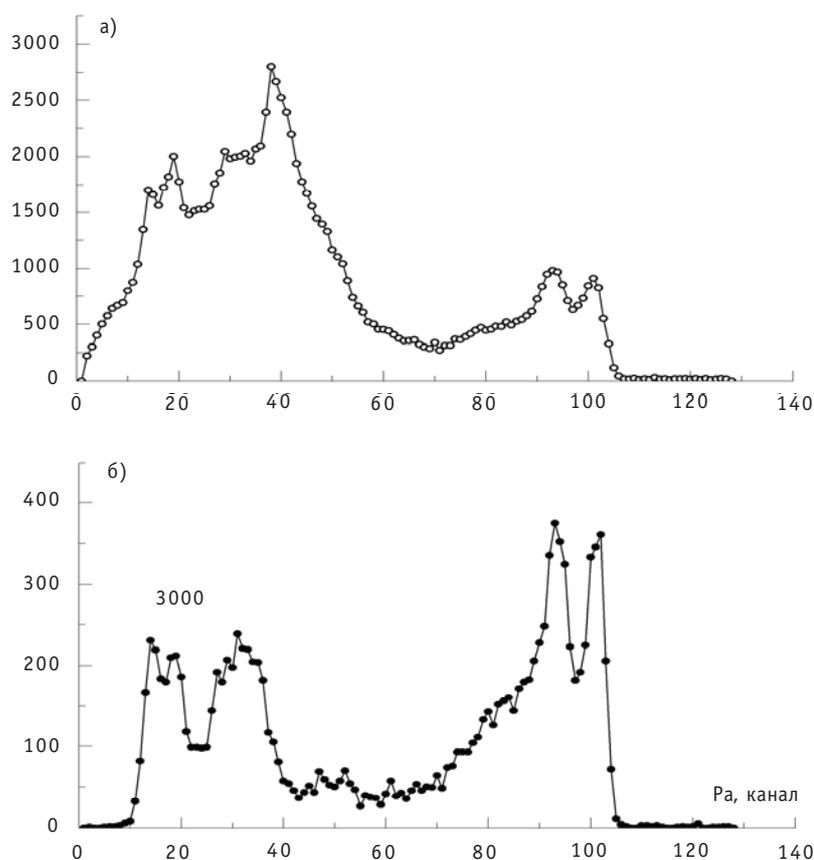


Рис. 2. а) – спектр сигналов, снимаемых с анода ионизационной камеры; б) – тот же спектр после отбора событий; 110–108 каналы –  $^{19}\text{F}(n, \alpha_0 + \alpha_1)$ ; 108–90 каналы –  $^{19}\text{F}(n, \alpha_2 + \alpha_3)$ ; 40–23 каналы –  $^{19}\text{F}(n, \alpha_4)$ ; 23–10 каналы –  $^{19}\text{F}(n, \alpha_5)$  и паразитные реакции

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 показаны значения сечения реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ , полученные в работе, и приведено сравнение этих данных с результатами [1–3]. Следует отметить существенно более высокую точность измерения, достигнутую в настоящей работе, по сравнению с результатами других измерений (точность измерений в [2, 3] сравнима с представленными погрешностями работы [1]).

Для энергий нейтронов ниже 6 МэВ наши данные согласуются в пределах ошибок измерений, полученных в работе [1]. Для энергий нейтронов выше 6 МэВ в нашем эксперименте наблюдается резкий рост сечения, который не воспроизводится другими авторами, включая данные работы [1]. Предварительный анализ показал, что за возрастание полного сечения в этом диапазоне энергий ответственны каналы, связанные с заселением верхних уровней возбуждения остаточного ядра ( $\alpha_4$  и более высокие). Сечение же каналов реакции, связанных с заселением низколежащих состояний, в этой области ведет себя плавно с тенденцией к понижению сечения с увеличением энергии нейтронов, в целом повторяя ход сечения, приведенный в [1].

Проведенный анализ работы [1] показал, что авторы, по-видимому, не могли учитывать каналы, проявляющиеся в низкоэнергетической части спектра  $\alpha$ -частиц, из-за большого фона от паразитных реакций, а также регистрации продуктов ре-

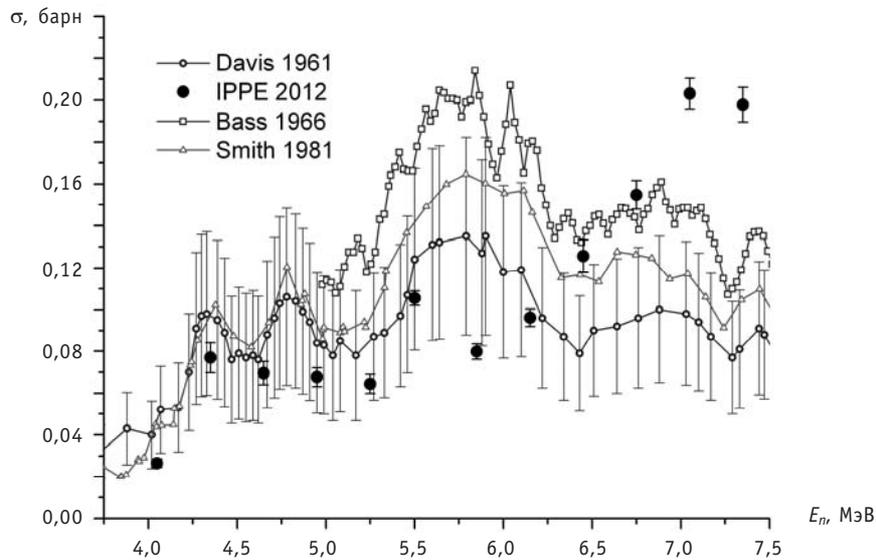


Рис. 3. Сравнение измеренных данных для  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  с представленными в EXFOR данными работ [1–3] акций, протекающих на боре-10, так как в работе [1] использовался газ  $\text{VF}_3$  в отличие от использованного нами  $\text{CF}_4$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использован ряд новых методических приемов, позволяющих существенно снизить фон и улучшить надежность определения количества событий, соответствующих реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$ . Разработанный метод позволил напрямую регистрировать продукты изучаемой реакции. Получены данные о величине сечения реакции  $^{19}\text{F}(n, \alpha)^{16}\text{N}$  для  $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ - и  $\alpha_4 + \alpha_5$ -каналов реакции. Показано, что расхождение полученных данных с данными других авторов обусловлено тем, что в предыдущих экспериментальных работах было недооценено влияние каналов реакции, связанных с заселением высоковозбужденных состояний остаточного ядра.

Данная статья подготовлена при выполнении Государственного контракта от 05.08.2011 №16.526.11.6006 в рамках федеральной целевой программы.

### Литература

1. Davis E.A., Gabbard F., Bonner T.W. et al. // Nucl. Phys. – 1961. – № 27. – P. 448.
2. Bass R., Haug P., Kruger K., Staginnus B. // Report from Euratom-countries + Euratom to EANDC. – 1966. – № 66. – P. 6.
3. Smith D.L., Meadows J.W., Whalen J.F. // Nuclear Science & Eng. – 1981. – V.77. – P. 256.

Поступила в редакцию 26.10.2012

## РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ ТЕЧИ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

П.А. Дворников\*, С.Н. Ковтун\*, А.А. Бударин\*, В.П. Полионов\*,  
Н.Н. Титаренко\*, Д.М. Швецов\*, Н.Г. Роцин\*\*, А.Л. Матвеев\*\*,  
Е.Л. Матвеев\*\*

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

\*\*Общество с ограниченной ответственностью «Инженерно-сервисный центр диагностики оборудования АЭС НИКИЭТ», г. Москва



Объектом исследования являются динамические процессы, происходящие в теплоизоляции при разгерметизации трубопровода энергетических установок. Моделирование всевозможных вариантов течи проводилось с помощью адаптированного расчетного кода КУПОЛ-М, разработанного в ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Ключевые слова:** контроль течи теплоносителя, влажность, датчик влажности, температура, трубопровод, теплоизоляция, энергетические установки.

**Key words:** coolant leak control, humidity, humidity sensor, temperature, pipeline, thermal insulation, power plants.

### ВВЕДЕНИЕ

Предотвращение глобальных катастроф, вызванных авариями на потенциально опасных объектах нефтегазовой и химической отраслей, объектах энергетики, является мировой задачей. Поэтому требования к системам безопасности непрерывно ужесточаются, что приводит к необходимости разработки новых технологий, средств мониторинга и надежной диагностики технического состояния оборудования таких объектов.

На всех потенциально опасных объектах ТЭК одними из самых высоконагруженных элементов были и остаются сосуды и трубопроводы, работающие в чрезвычайно сложных условиях в штатных и аварийных ситуациях. Особенно опасны нарушения штатной эксплуатации, связанные с нарушениями целостности и, тем более, разрывами трубопроводов контуров давления. Поэтому актуальна проблема разработки надежных средств обнаружения на ранней стадии появления аномальных зон, в которых образовались и развиваются эксплуатационные дефекты.

Определение места течи технологического продукта относится к наиболее трудоемкой операции в области неразрушающего контроля. Выполненный в МЭК 61250 анализ [1–6] различных методов контроля течи привел к целесообраз-

© П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.А. Бударин, В.П. Полионов, Н.Н. Титаренко, Д.М. Швецов, Н.Г. Роцин, А.Л. Матвеев, Е.Л. Матвеев, 2012

ности применения комплексных систем контроля, в которых используются разные по физической природе методы исследования, что позволит исключить недостатки одного метода, взаимодополнить методы и реализовать тем самым принцип «избыточности» для повышения надежности контроля систем и агрегатов.

Как показывает сравнительный анализ существующих методов, метод контроля течи по влажности является одним из наиболее перспективных. Он описан и регламентирован в международном стандарте IEC-1250 (IEC-94) [1–3].

Анализ достоинств и недостатков известных влажностных систем контроля течи с точки зрения удовлетворения требованиям концепции безопасности «течь перед разрушением» во многом определил технические решения, заложенные в разработку влажностной системы контроля течи для ВВЭР. При ее разработке, исходя из опыта, были приняты следующие предпосылки:

- система должна быть пространственно распределенной по контролируемому оборудованию;
- узлы, прежде всего электроника, чувствительные к эксплуатационным факторам (излучение, температура), должны быть вынесены за пределы защитной оболочки АЭС;
- влажный воздух (парогазовая смесь) к устройствам измерения влажности целесообразно транспортировать с помощью пассивных методов;
- система должна обеспечивать контроль течи как по относительной влажности, так и по температуре и абсолютной влажности;
- основные технические решения должны быть обоснованы расчетным и экспериментальными методами;
- система должна быть максимально унифицированной для использования на действующих, строящихся и проектируемых АЭС с ВВЭР, при этом должен обеспечиваться контроль трубопроводов с различными типами теплоизоляции, в том числе с традиционной (матовой) и новой (блочной) теплоизоляцией.

Известные интегральные влажностные системы контроля ALLY™ фирм «Westinghouse» (США) и «MGP Instruments» (Франция), основанные на разности показаний различных гидрометрических ячеек, не дают возможности определить место течи с требуемой точностью и отличить множественные малые течи в различных местах помещения от течи большой величины. Известная локальная система влажностного контроля течи FLUS фирмы «Siemens» (Германия) обладает высокой чувствительностью обнаружения факта и места при малых течах (~ 0,1 л/мин), но не способна вести оперативный контроль течи в заданном диапазоне (до 3,8 л/мин и выше). К числу недостатков данной системы следует также отнести значительное время обнаружения течи (более 0,5 часа) и тот факт, что система является дополнительным источником вероятности разгерметизации через проходки для шлангов.

Для подсистемы контроля течи по влажности воздуха (СКТВ) [4–7] информативным признаком течи водяного теплоносителя является повышение абсолютной влажности воздуха в теплоизоляции трубопровода. Подсистема постоянно измеряет относительную влажность и температуру воздуха в вытяжном патрубке и вычисляет абсолютную влажность воздуха.

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ**

Математическая модель описания распространения парогазовой смеси основана на составлении математических уравнений, описывающих основные физи-

ческие процессы и законы, происходящие в теплоизоляции. Численные алгоритмы решения математических задач, реализованных в виде проблемно ориентированных комплексов программ, дают возможность получить количественные результаты, имитируя тот или иной натурный эксперимент. Вычислительный эксперимент – это сочетание и сбалансированное использование всех известных методов исследования, включая методы обработки и интерпретации данных натурного эксперимента. Теоретические представления, методы современного математического анализа и программирования на базе единого рабочего цикла существенным образом повышают эффективность исследования.

Наличие эффективного алгоритма и программы расчетов, как правило, целиком определяет возможности применения той или иной модели; отсутствие соответствующего математического аппарата зачастую приводит к необходимости отказа от выбранной концепции моделирования или ее упрощению.

В СКТВ для целей контроля течи трубопроводов энергетических установок измеряется влажность воздуха в гетерогенной теплоизоляции, объем которой многократно меньше объемов воздуха в помещениях первого контура. Для повышения надежности обнаружения течи, возможности определения ее места и величины на каждом контролируемом участке трубопровода устанавливаются два-три выносных зонда (ЗВ), максимально разнесенные по длине трубопровода. Чувствительные к относительной влажности и температуре воздуха элементы выносного зонда (сенсоры) сообщаются посредством патрубков с теплоизоляцией трубопровода.

Такое техническое решение, как использование в качестве контролируемого объема непосредственно гетерогенной теплоизоляции трубопровода существенно упрощает проблемы, связанные с определением места и величины течи теплоносителя, снижает требования к аппаратуре для регистрации параметров воздуха. Применение вытяжных патрубков позволяет использовать пассивную транспортировку парогазовой смеси, а также организовать щадящий температурный режим для выносных зондов и тем самым повысить надежность их работы.

Согласно рис. 1, в верхней части трубопроводов установлены вытяжные патрубки высотой около 0,4 м, заканчивающиеся выносными зондами. При возникновении течи в координате  $X_T$  пар будет заполнять подызоляционное пространство и подниматься по вытяжным патрубкам к сенсорам влажности и температуры. Ожидаемое изменение влажности и температуры воздуха в подызоляционном пространстве при указанной пороговой течи 1 л/мин может достигать нескольких десятков процентов. Аппаратурная регистрация таких изменений параметров воздуха (относительная влажность, температура) при этом существенно упроща-

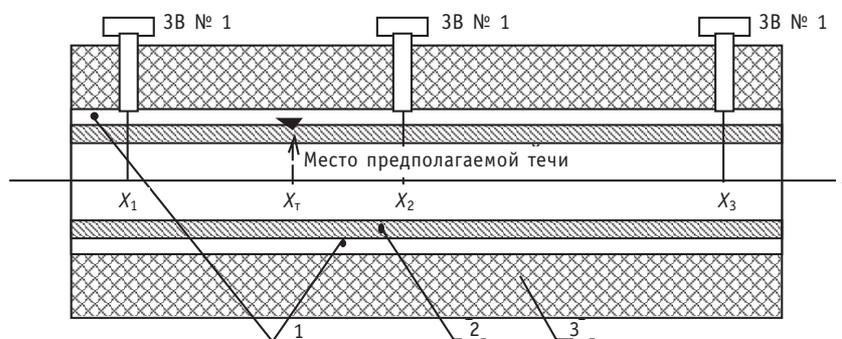


Рис. 1. Упрощенная схема установки зондов выносных на участке трубопровода: 1 – подызоляционное пространство; 2 – трубопровод; 3 – тепловая изоляция; ЗВ № 1, ЗВ № 2, ЗВ № 3 – зонды выносные

ется. В принятом техническом решении существенно проще и надежнее разрешаются проблемы, связанные с определением местоположения течи теплоносителя.

В данной работе с помощью расчетного кода КУПОЛ-М [8, 9] была рассчитана матрица различных ситуаций возникновения течи теплоносителя через неплотности в трубопроводе энергетической установки типа ВВЭР-1000. Параметры имитационной модели приведены в табл. 1. В таблице 2 приведены варианты расчета, характеризуемые расстоянием от места течи, ориентацией отверстия по азимутальному углу трубы и величины течи.

Таблица 1

**Геометрические размеры имитационной модели участка трубопровода**

Параметр модели	Величина
Длина рассматриваемого участка трубопровода, м	9,0
Внешний радиус трубопровода, м	0,495
Толщина пористой изоляции, м	0,15
Температура на поверхности трубопровода, °С	300
Температура на внешней стороне теплоизоляции, °С	60
Число патрубков в системе	3
Продольные координаты патрубков $x_2$ , м	$x_2 = x_1 = 1,5$ ; $x_2 = x_2 = 4,5$ ; $x_2 = x_1 = 7,5$

Таблица 2

**Матрица расчета ситуаций течи**

Положение зондов \ Ориентация отверстия	1,5 м	4,5 м	7,5 м
$\vartheta = 0^\circ$ (верх)	1,5; 2; 3; 4 кг/мин	1,5; 2; 3; 4 кг/мин	1,5; 2; 3; 4 кг/мин
$\vartheta = 90^\circ$ (бок)	1,5; 2; 3; 4 кг/мин	1,5; 2; 3; 4 кг/мин	1,5; 2; 3; 4 кг/мин
$\vartheta = 180^\circ$ (низ)	1,5; 2; 3; 4 кг/мин	1,5; 2; 3; 4 кг/мин	1,5; 2; 3; 4 кг/мин

Полученная в результате расчетов матрица подставляет собой 36 различных переходных процессов (величины течи 1–4 кг/мин, расстояния от места течи до ЗВ – 0, 3, 6 м, ориентация места течи – 0, 90, 180°). Результаты расчета отдельных ситуаций представляли собой динамику изменения абсолютной, относительной влажности и температуры в местах размещения выносных зондов (ЗВ, рис.1). При расчетах принято, что фоновая абсолютная влажность ( $\rho_f$ ) равна 0,064 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует относительной влажности ( $\phi_f$ ) – 50% и температуре ( $T_f$ ) – 60°С.

В таблицах 3–8 приведены рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с) после достижения порога абсолютной влажности вблизи выносных зондов.

Из приведенных данных видно, что времена достижения порога 3 фонов даже для наиболее инерционного сценария меньше заданных трех минут. Поскольку к определению времени возникновения течи не предъявляются высокие требования, то за момент течи можно принять время первого достижения порога. При необходимости, время начала течи может быть уточнено с использованием данных, приведенных в следующем разделе.

Выполненные по коду КУПОЛ-М расчеты показали, что предложенная пассивная система транспортировки воздуха из подызоляционного пространства трубо-

Таблица 3

**Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с) вблизи заданных порогов у первого выносного зонда после начала течи 1.5 кг/мин в зависимости от ее положения**

Место течи	$\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$	
	$t_1$	$d\rho/dt$	$t_2$	$d\rho/dt$	$t_3$	$d\rho/dt$
$x_T = x_T; \vartheta = 0^\circ$	2.7	6.4E-02	4.3	6.1E-02	6.1	5.3E-02
$x_T = x_T; \vartheta = 90^\circ$	12.3	1.7E-02	20.2	9.8E-03	34.8	4.4E-03
$x_T = x_T; \vartheta = 180^\circ$	56.0	2.2E-03	105.7	1.9E-03	169.7	1.3E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 0^\circ$	19.7	9.6E-03	34.4	6.4E-03	51.9	5.3E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 90^\circ$	50.6	2.8E-03	81.7	3.4E-03	114.4	2.6E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 180^\circ$	98.3	2.0E-03	140.4	2.5E-03	188.0	1.9E-03

Таблица 4

**Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с) вблизи заданных порогов у второго выносного зонда после начала течи 1.5 кг/мин в зависимости от ее положения**

Место течи	$\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$	
	$t_1$	$d\rho/dt$	$t_2$	$d\rho/dt$	$t_3$	$d\rho/dt$
$x_T = x_T; \vartheta = 0^\circ$	40.6	3.1E-03	61.0	5.6E-03	83.0	3.6E-03
$x_T = x_T; \vartheta = 90^\circ$	76.8	3.2E-03	106.5	3.5E-03	140.9	2.3E-03
$x_T = x_T; \vartheta = 180^\circ$	124.7	1.9E-03	164.3	2.6E-03	209.1	1.7E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 0^\circ$	8.2	2.9E-02	12.1	2.0E-02	19.5	1.2E-02
$x_T = 3,5; \vartheta = 90^\circ$	29.4	3.9E-03	57.0	3.6E-03	87.8	2.5E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 180^\circ$	87.6	1.6E-03	137.3	2.1E-03	193.2	1.4E-03

Таблица 5

**Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с) вблизи заданных порогов у третьего выносного зонда после начала течи 1.5 кг/мин в зависимости от ее положения**

Место течи	$\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$	
	$t_1$	$d\rho/dt$	$t_2$	$d\rho/dt$	$t_3$	$d\rho/dt$
$x_T = x_T; \vartheta = 0^\circ$	127.6	2.9E-03	164.6	2.4E-03	226.7	1.1E-03
$x_T = x_T; \vartheta = 90^\circ$	152.1	2.1E-03	200.1	2.0E-03	267.5	9.8E-04
$x_T = x_T; \vartheta = 180^\circ$	193.6	1.6E-03	249.3	1.6E-03	321.8	1.0E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 0^\circ$	63.5	3.4E-03	91.4	3.3E-03	130.8	1.9E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 90^\circ$	107.1	2.4E-03	144.7	2.6E-03	196.6	1.3E-03
$x_T = 3,5; \vartheta = 180^\circ$	161.0	1.4E-03	209.9	1.9E-03	276.9	1.1E-03

провода с помощью вытяжных патрубков практически не оказывает влияния на характеристики теплоизоляции. Разработанная конструкция вытяжных патрубков с дроссельными шайбами позволяет ограничить величину дополнительного выноса тепла с участка трубопровода.

Таблица 6

**Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с) вблизи заданных порогов у первого выносного зонда после начала течи в точке  $x_T = x_1$ ;  $\vartheta = 180^\circ$  в зависимости от ее величины**

Величина течи, кг/мин	$\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$	
	$t_1$	$d\rho/dt$	$t_2$	$d\rho/dt$	$t_3$	$d\rho/dt$
1,5	56.0	2.2E-03	105.7	1.9E-03	169.7	1.3E-03
2,0	31.0	6.0E-03	51.7	4.8E-03	73.6	4.2E-03
3,0	19.1	1.1E-02	28.5	8.9E-03	41.2	6.5E-03
4,0	14.6	1.3E-02	21.8	1.4E-02	30.8	9.0E-03

Таблица 7

**Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с) вблизи заданных порогов у второго выносного зонда после начала течи в точке  $x_T = x_1$ ;  $\vartheta = 180^\circ$  в зависимости от ее величины**

Величина течи, кг/мин	$\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$	
	$t_1$	$d\rho/dt$	$t_2$	$d\rho/dt$	$t_3$	$d\rho/dt$
1,5	124.7	1.9E-03	164.3	2.6E-03	209.1	1.7E-03
2,0	90.6	3.7E-03	118.0	4.0E-03	143.4	3.6E-03
3,0	56.4	6.1E-03	71.8	7.0E-03	88.3	5.8E-03
4,0	42.6	9.4E-03	54.8	9.0E-03	66.4	8.3E-03

Таблица 8

**Рассчитанные скорости нарастания абсолютной влажности  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с) вблизи заданных порогов у третьего выносного зонда после начала течи в точке  $x_T = x_1$ ;  $\vartheta = 180^\circ$  в зависимости от ее величины**

Величина течи, кг/мин	$\rho_{\text{порог}} = 0,2 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,3 \text{ кг/м}^3$		$\rho_{\text{порог}} = 0,4 \text{ кг/м}^3$	
	$t_1$	$d\rho/dt$	$t_2$	$d\rho/dt$	$t_3$	$d\rho/dt$
1,5	193.6	1.6E-03	249.3	1.6E-03	321.8	1.0E-03
2,0	143.1	2.9E-03	181.0	2.8E-03	216.7	2.6E-03
3,0	91.8	4.8E-03	111.4	6.1E-03	131.7	4.9E-03
4,0	70.4	8.0E-03	84.8	6.9E-03	99.3	7.1E-03

## ПОРОГОВЫЙ АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ ТЕЧИ

### Фиксация факта и момента возникновения течи

В основу алгоритма установления факта течи, величины и местоположения течи СКТВ заложена модель, согласно которой при возникновении течи перегретый пар распространяется в обе стороны от места течи по воздухопроницаемой теплоизоляции трубопровода. При достижении парогазовым фронтом мест установки датчиков часть парогазовой смеси будет проходить через чувствительные объемы датчиков, что приведет к росту их показаний. Поскольку датчики находятся на различных расстояниях от места течи, то моменты увеличения показаний соответствующих каналов будут различными и зависимыми от скорости распространения парогазового фронта, т.е. от величины течи. Факт течи, зарегистрированный подсистемой,

подтверждается в случае, когда фиксируется течь на участке тремя датчиками. Моменты времени достижения уставок по росту показаний трех ближайших датчиков фиксируются и используются для вычисления величины и координат течи.

Факт течи предлагается фиксировать по достижении заданных порогов абсолютной влажности, сопровождающемся характерными изменениями относительной влажности и температуры, что является их отличием от временного тренда. Выбор величины порога является отдельной задачей. Низкое (близкое к фоновому) значение порога повышает оперативность контроля и вероятность обнаружения течи, и появляется возможность контролировать меньшие величины течей, но при этом повышается вероятность ложного срабатывания. Завышенное значение уставок снижает вероятность ложной тревоги, однако при этом повышается вероятность того, что малая течь может оказаться незафиксированной, и увеличивается время фиксации факта течи. Таким образом, существуют некие оптимальные уровни порогов срабатывания, которые определяются свойствами СКТВ и предъявляемыми к системе требованиями.

### Определение места течи

В приближении постоянной линейной скорости распространения парогазового фронта (ПГФ) в изоляционном пространстве трубопровода координату течи  $X_T$  можно определить из следующей системы уравнений:

$$X_T = X_1 + \text{sign}(X_1 - X_T) \cdot W(t_1 - t_T), \quad (1)$$

$$X_T = X_2 + \text{sign}(X_2 - X_T) \cdot W(t_2 - t_T), \quad (2)$$

$$X_T = X_3 + \text{sign}(X_3 - X_T) \cdot W(t_3 - t_T), \quad (3)$$

где  $t_1, t_2, t_3$  – времена фиксации факта течи;  $W$  – скорость ПГФ;  $t_T$  – время начала течи.

На первом этапе целесообразно определить координату течи относительно размещения ЗВ СКТВ. Блок-схема алгоритма определения участка течи по временам фиксации факта течи отдельными ЗВ приведена на рис. 2.

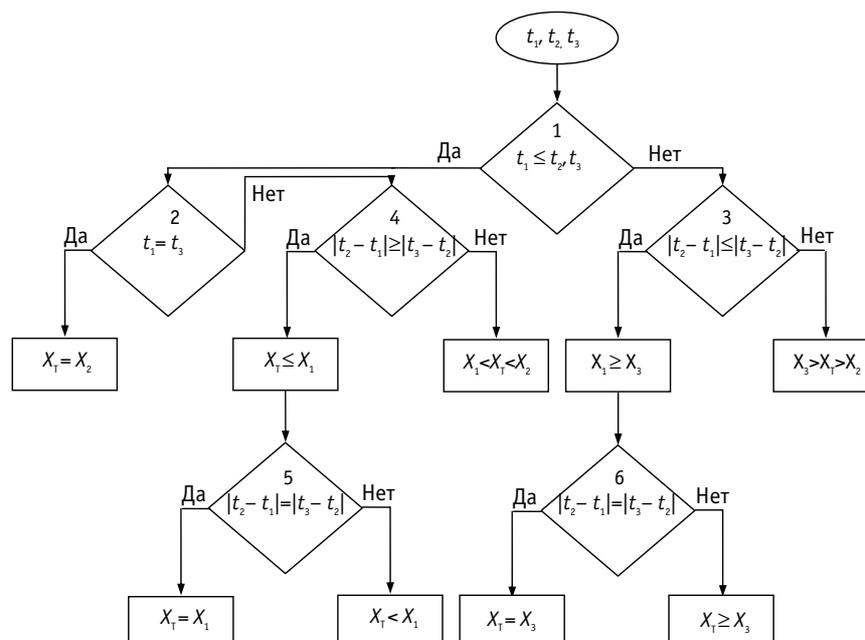


Рис. 2. Блок-схема алгоритма определения участка течи относительно ЗВ

Блок 1 определяет место течи относительно  $X_2$ , блоки 2 и 3 – относительно  $X_1$  и  $X_3$  соответственно. Таким образом, реализация данной блок-схемы позволяет однозначно определить участок течи относительно ЗВ. Значение участка течи позволит определить значения  $\text{sign}(X_i - X_T)$  и конкретизировать вид системы уравнений (1)–(3).

Система трех уравнений может быть решена относительно  $X_T$ . Пусть, для определенности течь зафиксирована на отрезке между  $X_1$  и  $X_2$ , тогда система уравнений (1)–(3) примет вид

$$X_T = X_1 - W(t_1 - t_T), \quad (4)$$

$$X_T = X_2 + W(t_2 - t_T), \quad (5)$$

$$X_T = X_3 + W(t_3 - t_T). \quad (6)$$

После ряда преобразований получим выражение для определения  $X_T$

$$X_T = \frac{X_2 + X_1}{2} - \frac{(X_3 - X_2) \cdot (t_2 - t_1)}{2(t_3 - t_2)}. \quad (7)$$

### Определение величины расхода

В основе существующего оценочного алгоритма контроля течи СКТВ лежит измерение скорости парогазового фронта (ПГФ) и переход к расходу через расчетную величину плотности парогазовой смеси (ПГС) в изоляционном пространстве трубопровода. Определение изменения плотности ПГС является сложной задачей.

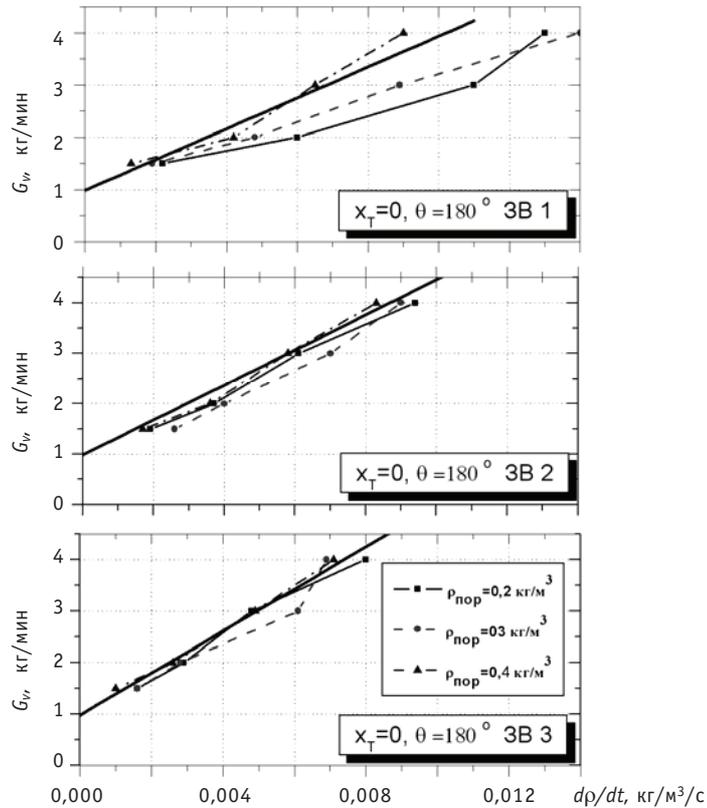


Рис. 3. Зависимость рассчитанной величины течи от порогового значения скорости нарастания абсолютной влажности  $dp/dt$  (данные по производным взяты из табл. 3–8). Сплошная прямая – аппроксимация величины течи по соотношению (8)

Поэтому предполагается расчетным методом определить зависимость скорости ПГФ непосредственно от величины расхода для различных сценариев возникновения течи, для чего был проведен поиск соотношений, связывающих регистрируемые параметры с величиной течи для размещенных ситуаций течи.

С хорошей точностью величину расхода течи можно определить, если привлечь для анализа имеющиеся данные по производным  $d\rho/dt$ , полученным по достижении заданных порогов абсолютной влажности (рис. 3). Из рисунка 3 видно, что скорость нарастания абсолютной влажности пропорциональна величине течи.

Если известны измеряемые каждым выносным зондом ( $j = 1-3$ ) значения производных  $d\rho/dt$  (кг/м<sup>3</sup>/с), тогда величину течи можно рассчитать по формуле

$$G_v^{(j)} = 0,984 + 295,2 \frac{d\rho^{(j)}}{dt} e^{0,054 \cdot |x_j - x_T|}, \text{ кг/мин.} \quad (8)$$

По трем рассчитанным значениям  $G_v^{(1)}, G_v^{(2)}, G_v^{(3)}$  с помощью оптимизационной процедуры нетрудно получить координату течи  $x_T$ , а также ее величину  $G_v$ .

В таблице 9 во втором столбце приведены рассчитанные по (7) прогнозируемое положение течи  $x_T$  и по (8) величина течи (четвертый столбец).

Приведенные в табл. 9 данные показывают, что ошибка при определении величины течи по соотношению (8) не превышает 10%.

Таблица 9

**Погрешность определения расхода по уравнению (8)**

$G_v$	$x_T$	$\Delta x_T/x_T, \%$	$G_{\text{расч}}$	$\Delta G/G, \%$
1,5	2,48	65,3	1,40	6,7
2,0	1,57	4,7	2,17	8,5
3,0	1,37	-8,7	2,93	2,3
4,0	1,38	-8,0	3,73	6,8

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В основу алгоритма диагностирования течи в СКТВ положены полученные на основе расчетов по коду КУПОЛ-М имитационные модели, описывающие поведение параметров воздуха (относительная и абсолютная влажность, температура) в зависимости от величины, места и продолжительности течи теплоносителя.

При определении координаты течи требуется первоначально определять участок трубопровода, где возникла течь, по предложенной блок-схеме с последующим решением системы уравнений. Отклонение определения координаты течи в диапазоне течей от 2 до 4 кг/мин всех рассмотренных параметров составляет  $\pm 0,2$  м, при уменьшении течи до 1 кг/мин отклонение составляет 1 м. Напомним, что в соответствии с действующей нормативно-технической документацией координата течи должна быть определена с точностью  $\pm 2$  м.

Величина течи в рамках принятой модели определяется с погрешностью не более  $\pm 10\%$ .

Конкретными потребителями подсистемы СКТВ могут быть

- объекты промышленности и энергетики с оборудованием, эксплуатируемым в среде под давлением (контроль технологических трубопроводов, сосудов, теплообменных аппаратов, камер нейтрализации, магистралей газов и жидкостей, трубопроводов пара и горячей воды);

- тепловые и атомные электростанции (контроль протечек теплоносителя в трубопроводах, парогенераторах и оборудовании энергоустановок).

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

### **Литература**

1. ПН АЭ Г 01-011-97 (ОПБ-88/97). «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций». 1997.
2. Nuclear power plant diagnostics. Final report. – IAEA. Vienna, 1999.
3. Руководство по применению концепции безопасности течь передразрушением к трубопроводам АЭУ, Р-ТПР-01-99. – М., 1999.
4. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А., Бударин А.А., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В., Полионов В.П. Система влажностного контроля течи (СКТВ) водяного теплоносителя/Препринт ФЭИ-3080. – Обнинск: ГНЦ РФ:ФЭИ, 2006.
5. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А., Бударин А.А., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В., Полионов В.П. Разработка влажностной системы контроля течи трубопроводов ВВЭР//Атомная энергия. – Т. 103. – Вып. 5. – С. 291-294.
6. Морозов С.А., Ковтун С.Н., Дворников П.А. и др. Разработка системы влажностного контроля течи водяного теплоносителя//Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. – №2. – С. 30-35.
7. Дворников П.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Шутов С.С., Шутов П.С., Кудряев А.А., Кондратович Ф.В. Средства технического диагностирования течей теплоносителя для АЭС с РУ ВВЭР-1000: Тез. конф. «Модернизация оборудования и арматуры АЭС, ТОиР, продление продолжительности эксплуатации» (Варна, Болгария, 17-24 июня, 2011 г.).
8. Ефанов А.Д., Лукьянов А.А., Шаньгин Н.Н., Зайцев А.А., Юрьев Ю.С., Безлепкин В.В. Верификация контейментного кода КУПОЛ-М/Препринт ФЭИ-2628. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1997.
9. Ефанов А.Д. и др. Расчеты нестационарного тепломассопереноса в защитных оболочках с использованием кода КУПОЛ-М//Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 1999. – № 2. – С. 96.

Поступила в редакцию 28.06.2012

## АНАЛИЗ ОШИБОК, ДОПУСКАЕМЫХ ОПЕРАТОРАМИ БЩУ АЭС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПРОЦЕДУР

**Н.В. Плешакова\*, А.Н. Анохин\*\***

*\* Смоленский филиал учебно-тренировочный центр «Атомтехэнерго»*

*ОАО «Атомтехэнерго», г. Десногорск*

*\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Статья посвящена проблеме ошибок операторов БЩУ АЭС, совершаемых при использовании эксплуатационных процедур. Предложено разбиение этих ошибок на четыре класса: ошибки выбора процедуры, ошибки исполнения процедуры, ошибки навигации и ошибки коммуникации. Подробно рассматриваются и анализируются выделенные классы ошибок. Ошибки каждого типа иллюстрируются реальными примерами. Проанализированы причины допускаемых ошибок, среди которых основную долю занимают недостатки процедур. Выявлены два аспекта двухколоночных симптомно-ориентированных процедур, наиболее существенно влияющих на деятельность операторов: запутанная логика перехода из левой колонки в правую и отсутствие средств визуального выделения элементов процедуры.

**Ключевые слова:** атомная станция, блочный щит управления, оператор, процедура, ошибка, классификация, причина ошибки.

**Key words:** nuclear power plant, main control room, operator, procedure, error, categorization, cause of error.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что от 15 до 40% всех аварий и от 20 до 80% всех нарушений на атомных электростанциях (АЭС) происходят вследствие ошибок человека-оператора [17]. Анализ ошибок оператора посвящено множество исследований, в которых приводится статистика ошибок, анализ их причин и классификация ошибочных действий (или бездействия) оператора. Ошибки классифицируются по различным критериям [1–3]: а) по типу психического процесса (ошибки восприятия, мышления, моторики, коммуникации); б) по фазам решения задачи (ошибки наблюдения, диагностики, планирования, исполнения, взаимодействия с автоматикой); в) по внешним проявлениям (ошибки пропуска, выполнения, избыточных действий, несвоевременное и неточное выполнение); г) по типу поведения, при котором они проявляются (ошибки на уровне навыков, правил, знаний). Последняя классификация основана на «лестничной» модели поведения, предложенной Й. Расмуссеном, который в [6] описал алгоритм диагностирования когнитивных аспектов этих

ошибок на этапах диагностики, выбора цели и стратегии, адаптации и выполнения процедур. В [4] приводится классификация ошибок, состоящих в выполнении человеком действий над неверным объектом, в неверное время, в неверной последовательности, а также рассматриваются качественные и количественные недостатки функционирования оператора. В [5] была предпринята попытка проведения многомерной классификации, где ошибки персонала разделялись по типу психического процесса, по характеру ошибочного действия и по уровню поведения.

Классификация ошибок тесно связана с оценкой вероятности и выявлением факторов, влияющих на их возникновение. Среди методов оценки вероятности, ставших уже классическими для процедур вероятностного анализа безопасности АЭС, выделяются Technique for Human Error Rate Prediction (THERP), Accident Sequence Evaluation Program (ASEP), Human Cognitive Reliability (HCR), Cause-Based Decision Tree (CBDT) Method, Success Likelihood Index Methodology (SLIM), Failure Likelihood Index Methodology (FLIM), A Technique for Human Event Analysis (ATHEANA), Revised Systematic Human Action Reliability Procedure (SHARP1). Наиболее «свежий» обзор этих методов сделан в [20]. В отечественной практике важную роль занимает обобщенный структурный метод А.И. Губинского [15]. Наряду с «устоявшимися» методами в последние годы появляются новые подходы, например, метод оценки вероятности ошибок, основанный на модели обработки информации и учитывающий влияние на деятельность персонала АЭС восьми факторов: доступное время, стресс и стрессоры, опыт и тренировка, сложность, эргономика, включая человеко-машинный интерфейс (ЧМИ), процедуры, рабочие процессы, готовность к работе. В [8] представлен метод анализа когнитивной надежности и ошибок (Cognitive Reliability and Error Analysis Method – CREAM), базирующийся на принципах когнитивного моделирования. В [9] подчеркивается, что для уменьшения ошибок человека необходимо, среди прочего, выполнять анализ эксплуатационных инструкций, структурный анализ задач оператора, оценивать вероятность возникновения единичных отказов и их комбинаций.

Традиционно выделяемыми причинами ошибок являются личные качества и мотивация операторов, эргономическое обеспечение их деятельности, эксплуатационные процедуры, организационные факторы, уровень подготовленности персонала и др. Общепризнано, что эксплуатационные процедуры являются довольно существенным вкладчиком в вероятность ошибок операторов [7]. По разным статистическим данным они служат прямой или косвенной причиной 15 – 30% ошибочных действий. При этом, разные исследователи вкладывают различное содержание в связь между процедурой и ошибкой. Практически все сходятся в том, что основными факторами являются отсутствие релевантной процедуры или неадекватный алгоритм, заложенный в процедуру. С другой стороны, сюда часто включают недостатки не эксплуатационных, а организационных процедур и даже отступление операторов от процедуры. К сожалению, дальнейшая детализация факторов влияния процедуры на ошибки операторов практически отсутствует, и лишь немногочисленные публикации касаются анализа работы операторов с процедурами и влияния на их работу таких аспектов, как сложность процедуры [12], адекватность алгоритма процедуры, техническая точность и формат представления процедуры [10, 11] и др.

Упомянув процедуры, исследователи редко пытаются классифицировать ошибки, связанные непосредственно с применением операторами процедур. Например, в [13] определены ошибки выбора процедуры (неверный выбор, излишняя процедура и др.) и ее исполнения (шаг пропущен, неверная последовательность, шаг незавершен и др.). Если рассматривать исполнение процедуры как реализацию ее

алгоритма, то можно отметить классификацию [14], где выделяются ошибки пропуска, включения, следования, замещения, выполнения (качества) и своевременности шагов. Тем не менее, ни одна из существующих классификаций не дает детального описания ошибок работы с процедурами, не учитывает ошибки навигации по «процедурному полю» и ошибки коммуникации, связанные с чтением и восприятием команд инструкций. Настоящая работа нацелена на заполнение этого пробела и посвящена анализу ошибок, совершаемых операторами БЩУ АЭС при использовании эксплуатационных процедур.

### **ВЛИЯНИЕ ТИПА ПРОЦЕДУР НА ХАРАКТЕР ОШИБОК ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

Выполненная в работе [19] классификация эксплуатационных процедур для АЭС подразделяет их по четырем признакам: по используемому в них подходу к управлению, по формату их представления, по физическому носителю процедуры и по классу состояний АЭС, для которого эти процедуры предназначены. Можно предположить, что особенности процедур разного типа способны спровоцировать различные по характеру ошибки операторов. Начнем с рассмотрения того, как заложенный в процедуру подход к управлению может повлиять на безошибочность действий операторов.

Как известно, сегодня на станциях используются три **подхода к управлению**:

- *событийно-ориентированный* (событийный), при котором управление осуществляется на основании точной идентификации происшедшего события;
- *симптомно-ориентированный* (симптомный), при котором управление строится на основе наблюдаемых симптомов и без классификации события и ситуации в целом;
- *функционально-ориентированный* (функциональный), при котором объектом управления является не оборудование, а функции, исполняемые системами АЭС.

От применяемого подхода зависят способ выбора операторами релевантной процедуры, понимание логики процедуры и, зачастую, эффективность действий при различных классах состояний АЭС. Как правило, событийные инструкции основаны на простом линейном алгоритме действий, не содержат ветвлений и переходов, а потому выглядят логичными и понятными. Такая простота снижает вероятность ошибочных действий, однако требует от персонала точного определения происшедшего события. Ошибка в идентификации события автоматически приводит операторов к выбору неверной процедуры. Такие ошибки вполне вероятны в сложных стрессогенных ситуациях при дефиците времени и особенно в тех случаях, когда существуют «внешне» похожие друг на друга (т.е. обладающие схожими симптомами) ситуации. Другая опасность, исходящая от событийного подхода, состоит в том, что в непредвиденных ситуациях операторы вообще остаются без процедуры «один на один» с проблемой. Кроме того, событийный подход «плохо работает» при наложении друг на друга нескольких постулированных исходных событий. Одновременное применение нескольких процедур может привести операторов к противоречивым взаимоисключающим действиям.

Симптомная инструкция позволяет операторам действовать верно вне зависимости от происшедшего события, однако требует досконального безоговорочного следования написанным пунктам и контроля множества симптомов перед выполнением действий. Симптомная инструкция универсальна и обычно охватывает сразу множество ситуаций, и потому внутренняя логика такой процедуры довольно запутанна и не всегда совпадает с логикой операторов и их субъективным пониманием ситуации. Это приводит к «механическому» исполнению шагов процедуры, что требует от операторов высокой самодисциплины и тщательности. В та-

ких обстоятельствах совершение ошибки вполне вероятно. Кроме того, алгоритмы симптомных процедур являются очень разветвленными, а многочисленные внутренние и внешние переходы также создают почву для ошибочных действий.

Другим фактором, влияющим на характер совершаемых ошибок, является **формат представления** процедуры. Наиболее распространенными форматами являются представления процедуры в виде

- линейного списка текстовых предписаний;
- блок-схемы или графической карты действий операторов;
- двухколоночной таблицы, левая часть которой содержит перечень основных действий, а правая – альтернативные действия, выполняемые, если основное действие не привело к ожидаемому результату.

*Текстовые* процедуры наиболее компактны и удобны для опытных операторов. Однако в них практически невозможно отобразить разветвленные алгоритмы, содержащие условные и безусловные переходы и сложные логические конструкции. Их представление в слабо формализованном текстовом виде может неоднозначно трактоваться операторами и приводить их к ошибкам.

*Блок-схемы*, наоборот, очень удобны для представления сложных алгоритмов, которые одновременно описываются одним взглядом, а операторы могут видеть, где они находятся и куда движутся. С другой стороны, недостатком графического формата является большой размер и перегруженность листов, высокая чувствительность к качеству исполнения (цветам, шрифтам, контрастности и др.), а также субъективизм их восприятия – часть людей легко и быстро адаптируются к таким формам, в то время как другие испытывают сложности. Особую проблему при чтении блок-схем создает недостаточная освещенность и неудачное графическое оформление. При запутанном алгоритме в графических процедурах есть вероятность потери текущей позиции и логики процедуры. Описание действий, вписанное в геометрическую фигуру (прямоугольник, ромб и др.), ограничивается размером этой фигуры и зачастую содержит сокращения и укороченные формулировки, которые могут неточно восприниматься операторами. Наряду с блок-схемами, отображающими процедуру целиком, известны и другие виды графических форматов, например, карты действий, описывающие алгоритмы действий индивидуально для каждого из операторов БЩУ. Особенностью этих процедур является проблема координации действий операторов, работающих каждой со своей картой.

*Двухколоночный* формат является текстовым по форме, однако, традиционно, хорошо структурированным по содержанию. Все действия процедуры декомпозированы на шаги, назначенные конкретным исполнителям. В левой колонке приводятся основные действия, в правой – альтернативные, осуществляемые, если результат выполнения основного действия не получен.

Важным моментом является то, что отсутствием результата считается не только отсутствие ожидаемого эффекта от выполнения действия, но и получение отрицательного ответа операции контроля. Так, для действия «открытием БРУ-К установить скорость расхолаживания 30°С/ч» отсутствие результата – это *неуспешное* выполнение действия, например, не удалось открыть БРУ-К или добиться требуемого уровня расхолаживания. В то же время для действия «проконтролировать давление первого контура более 100 кгс/см<sup>2</sup>» под отсутствием результата понимается давление менее 100 кгс/см<sup>2</sup>, которое было зафиксировано оператором вследствие *успешного* выполнения действия. При этом неуспешное действие – это невозможность проконтролировать давление, например, из-за выхода из строя прибора или задымления БЩУ. Подобное смешение понятий может стать потенциальной причиной ошибок.

Двухколоночный формат так же, как и текстовый, не очень удобен для представления сложных алгоритмов, содержащих большое число переходов и ветвлений. В силу специфики табличного представления текста такие процедуры, как правило, являются физически довольно объемными, что затрудняет их просмотр, перелистывание и поиск нужной инструкции. Правая часть, зачастую содержащая несколько неупорядоченных по приоритетам альтернативных действий, бывает перегружена, что затрудняет исполнение процедуры [10]. Исследования работы операторов с двухколоночными процедурами показали, что сложные или очень простые задачи выполняются в большинстве случаев в строгом соответствии с процедурой, тогда как выполнение задач средней сложности сопряжено с модификацией алгоритма и пропуском избыточных, по мнению персонала, действий [12].

### КЛАССИФИКАЦИЯ ОШИБОК ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕДУР

В рамках данного исследования анализировалась работа персонала с инструкциями по ликвидации проектных аварий на АЭС, выполненными в форме двухколоночных таблиц. Использовались два идентичных по содержанию комплекта процедур: процедуры первого комплекта были событийно-ориентированными, второго комплекта – симптомно-ориентированными.

Процедуры применялись операторами БЩУ АЭС при решении задачи по ликвидации аварийной ситуации на энергоблоке ВВЭР-1000, состоящей в наложении двух исходных событий – течи в парогенераторе из первого контура во второй и течи из первого контура в гермооболочку (ГО) реактора. В эксперименте на полномасштабном тренажере [19] участвовали четыре смены БЩУ, каждая из которых включала в себя четырех операторов: ведущих инженеров управления реактором (ВИУР) и турбиной (ВИУТ), начальников смен реакторного цеха (НСРЦ) и

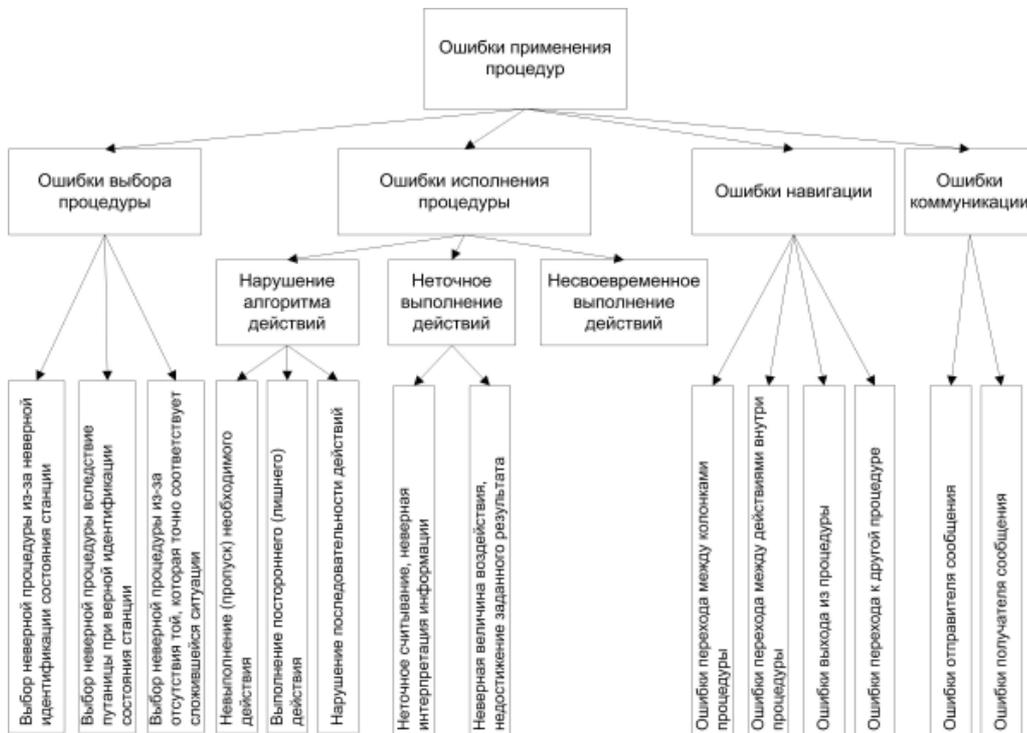


Рис. 1. Классификация ошибок применения эксплуатационных процедур

блока (НСБ). Две смены работали по симптомным процедурам, две – по событийным. Комплект процедур имелся только у НСБ, который зачитывал их вслух, выдавал устные команды и координировал действия членов смены.

В ходе пошагового анализа действий операторов БЩУ, проводимого с участием самих операторов и инструкторов полномасштабного тренажера, были выявлены более 20-ти ошибок, связанных с применением процедур. Эти ошибки были разделены на четыре класса: ошибки выбора процедуры, исполнения процедуры, навигации и коммуникации. Полная классификация ошибок приведена на рис. 1. Рассмотрим их более подробно.

### **Ошибки выбора процедуры**

Первая группа ошибок – выбор неадекватной процедуры – соответствует понятию *функционально-целевого* отказа, введенного А.И. Губинским [15]. Суть отказов данного типа состоит в том, что человек может правильно исполнить предписанный ему алгоритм действий, но при этом преследовать заведомо ложную цель. Такой отказ может реализоваться в выборе неверной процедуры

- из-за *неверной идентификации состояния* станции;
- вследствие *путаницы* при верной идентификации состояния станции;
- из-за *отсутствия* той, которая точно соответствует сложившейся ситуации.

Ошибки подобного типа могут быть допущены операторами, например, при наложении нескольких исходных событий (когда применимы сразу несколько процедур) или при схожести симптомов разных процедур. Например, процедуры для разрыва трубопроводов первого контура большого диаметра и некомпенсируемых течей теплоносителя первого контура содержат 12 и 10 входных симптомов соответственно. По существу, все десять симптомов второй процедуры входят и в первую: восемь из них полностью идентичны, а два – идентичны с точностью до формулировки (например, в первой процедуре указано, что «давление падает в течение 20–100 с до 5 кгс/см<sup>2</sup>», а во второй – «быстрое снижение давления»).

### **Ошибки исполнения процедуры**

Ошибки, допускаемые при исполнении процедуры, хорошо описываются классификацией функциональных отказов, предложенной А.И. Губинским [15]. В соответствии с этой классификацией ошибки исполнения подразделяются на

- функционально-алгоритмические отказы – нарушение предписанного алгоритма выполнения действий;
- функционально-временные отказы – несвоевременное (раньше или позже предписанного момента времени) выполнение действий;
- функционально-параметрические отказы – неточное выполнение действий.

Для детализации *функционально-алгоритмических* отказов можно использовать классификацию, описанную в работах В.Ф. Венды [16] и других авторов и разделяющую такие ошибки на три типа: пропуск действия, выполнение лишнего действия и нарушение последовательности действий.

*Невыполнение (пропуск) необходимого действия.* В проводимом эксперименте НСБ не заметил шаг процедуры «Включить на первый контур насосы 4ТQ14,24,34D01», возможно из-за краткости его формулировки. Понимание того, что действие было пропущено, пришло только через 3 мин, когда ВИУР запросил у НСБ разрешение на включение этих насосов. Наряду с простым пропуском к ошибкам этого типа относятся случаи, когда операторы, не достигнув успеха при выполнении основного действия, не переходят к выполнению альтернативного действия (*примечание: такие ошибки возможны только при исполнении двухколоночных процедур, и их можно также отнести к ошибкам навигации, т.е. перехода из*

левой колонки в правую). Всего в экспериментах было допущено пять ошибок данного типа, что составило около 25% от общего количества зафиксированных ошибок применения процедур. Связаны эти ошибки были, в основном, с невнимательностью операторов. Однако следует отметить, что допущены они были только при работе с симптомно-ориентированными процедурами, возможно, из-за их более громоздкого алгоритма действий по сравнению с событийными.

*Выполнение постороннего (лишнего) действия.* Обычно причиной ошибок данного типа является несоответствие алгоритма процедуры реальному развитию ситуации. Это приводит к тому, что операторы «теряют» логику процедуры и начинают действовать в соответствии со своим опытом, выполняя действия, не указанные в процедуре. Наряду с этим операторы могут выполнять некоторые действия повторно, также «теряя» при этом логику процедуры. Выполнение операторами одного-двух лишних действий, не указанных в процедуре, было зафиксировано во всех экспериментах. Основной причиной этого стало возникновение второго события (течи в ГО) и отсутствие в процедурах алгоритма действий для подобного развития ситуации. На такое повторное выполнение шагов было потрачено от двух до шести минут (при общей продолжительности сценария от 30-ти до 45-ти мин).

*Нарушение последовательности действий.* Ошибки данного типа возможны лишь для тех фрагментов процедуры, где последовательность выполнения действий важна, например, когда некоторые шаги могут выполняться только по достижении результата предыдущих. Перестановка действий может и не влиять на результат, однако сам факт изменения последовательности говорит о том, что операторы, выполняя процедуру, в ряде случаев опираются на свою память и опыт, а не на текст инструкции. Для процедур в текстовом формате, предписывающих действия одновременно трем членам смены БЩУ, было бы полезно выработать удобный способ выделения действий, которые могут выполняться в любой последовательности, и действий, для которых порядок является важным.

*Функционально-временные отказы* (или несвоевременное выполнение действий) относят к действиям, привязанным к временной шкале. Привязка ко времени обычно проявляется в ограничении скорости исполнения или во введении временного ограничения: как снизу – в виде совершения необходимой задержки, так и сверху – в виде имеющегося запаса времени. Такие ограничения могут служить инструментом временной синхронизации двух и более действий, например, «проконтролировать отключение КАГ-24 через 2 мин после закрытия СРК».

*Функционально-параметрические отказы* – это довольно обширная категория ошибок, состоящих в неточном или ненадлежащем исполнении действия. Регистрация таких ошибок возможна лишь тогда, когда существуют определенные критерии качества выполнения действия. Для операций восприятия и оценки информации параметрические ошибки – это неверные считывание или интерпретация информации, в то время как для моторных операций – неверная величина воздействия или недостижение заданного результата. Рассмотрим несколько примеров.

**1. Неточное считывание или неверная интерпретация** (восприятие) информации возможны как в простых операциях контроля, так и в операциях, сочетающих контроль и действие. Например, выполняя простой шаг контроля «Проверить, что уровень в поврежденном ПГ *менее* 375 см», НСБ в одном из тестовых прогонов констатировал: «У нас *более*», тогда как реальный уровень в тот момент составлял 340 см. Неточное считывание привело к тому, что НСБ перешел к правой колонке и выполнил предписываемый ей уход в другой раздел инструкции. Примером сочетания контроля и воздействия является шаг: «Если температура тепло-

носителя первого контура менее 265°C и уменьшается, то прекратить сброс пара на БРУ-К, БРУ-А, БРУ-СН». Здесь восприятие информации – это, по существу, проверка того, соблюдены ли необходимые предпосылки (предварительные условия) для выполнения действия. В данном примере две предпосылки – температура менее 265°C и температура уменьшается.

**2. Неверная величина воздействия или недостижение заданного результата** могут быть вызваны как неправильным исполнением самого действия, так и неверным пониманием его цели. Так, выполняя шаг «Поддерживать температуру первого контура стабильной 220°C сбросом пара через БРУ-А неповрежденных ПГ», оператор должен периодически приоткрывать и закрывать клапаны БРУ-А. При этом он может совершать слишком резкие воздействия, которые приведут к существенным колебаниям температуры вместо ее стабилизации.

Во втором примере выполняется шаг «Для достижения минимально-допустимой концентрации борной кислоты ввести в первый контур не менее 30 м<sup>3</sup> раствора Н<sub>3</sub>ВО<sub>3</sub> насосами TQ14,24,34D01». Простое точное выполнение этого действия, т.е. включение насосов и ввод 30 м<sup>3</sup> борной кислоты, не гарантирует достижение необходимой концентрации в первом контуре. Для успешного завершения действия операторы должны убедиться, что данная концентрация достигнута, несмотря на то, что в инструкции отсутствует прямое указание проконтролировать этот факт (*примечание: цель действия достигается не всегда, например, из-за неисправного оборудования или сложившихся специфических условий*).

Некоторые действия могут иметь довольно сложную внутреннюю структуру. Так, шаг «При давлении первого контура 100 кгс/см<sup>2</sup> включить на первый контур насосы TQ13,23,33D01» (*примечание: насосы аварийного охлаждения активной зоны высокого давления*) означает не только включение насосов, но и открытие задвижек TQ13(23,33)S26 на всасывающих трубопроводах. В одном из прогонов операторы забыли их открыть, в результате чего расход насосов был снижен до нуля, что привело к снижению давления в контуре.

### **Ошибки навигации**

Эти ошибки наиболее распространены для «толстых» комплектов процедур, содержащих большое количество внутренних и внешних переходов. Ошибка перехода состоит в пропуске этого перехода или неверном его выполнении (в переходе не туда, куда нужно). Ошибки навигации можно разделить на четыре типа:

- ошибки перехода из левой колонки в правую (или ошибки перехода между колонками) для двухколоночных процедур;
- ошибки перехода между действиями внутри процедуры;
- ошибки выхода из процедуры;
- ошибки перехода к другой процедуре.

1). *Ошибки перехода между колонками* – это пропуск перехода, когда он нужен, и выполнение перехода, когда он не нужен. Примером лишнего перехода является ошибка, совершенная при выполнении шага «Проконтролировать ГЦН – по крайней мере, один в работе». В обсуждаемой ситуации ГЦН находились в работе, и это означало, что проверяемое условие удовлетворено и операторы могут переходить к следующему пункту процедуры. Однако НСБ, правильно проконтролировав работу ГЦН, принял решение о переходе в правую колонку. ВИУР указал ему на ошибку, однако НСБ, восприняв информацию, не изменил решение.

Зачастую ошибки перехода из левой колонки в правую возникают из-за некорректного выполнения операции в левой колонке. Особую сложность представляют операции логического типа, примеры которых уже обсуждались при описании влияния двухколоночных процедур на характер ошибок («Проконтролировать

давление первого контура более 100 кгс/см<sup>2</sup>) и при описании ошибки неточного считывания и неверной интерпретации («Проверить, что уровень в поврежденном ПГ менее 375 см»). Еще хуже, когда операция в левой колонке содержит сложную логическую конструкцию, например, «Проконтролировать давление во всех ПГ: давление в любом ПГ падает нерегулируемым образом ИЛИ давление в любом ПГ полностью потеряно». При выполнении данного шага имел место следующий диалог.

НСБ: «Проконтролировать давление во всех парогенераторах».

НСРЦ: «Давление во всех парогенераторах 56,8».

НСБ: «Я вижу...».

Давление 56,8 кгс/см<sup>2</sup> не означает «полную потерю» или «нерегулируемое падение». Иначе говоря, «результат данного шага достигнут не был», и, следовательно, операторы должны перейти к правой колонке, чего в анализируемом случае не произошло.

Возможно, некоторую путаницу в логическую проверку добавляет конфликт эмоциональных окрасок. Напомним, что условием перехода к правой колонке является недостижение результата шага из левой колонки. В случае воздействия на объект управления (например, при открытии клапана, вводе борной кислоты и т.п.) недостижение несет отрицательную эмоциональную окраску. Иначе говоря, переход к правой колонке происходит, если что-то ненормально и идет не так, как хотелось бы. Однако в примере с давлением в ПГ переход в правую колонку должен выполняться, когда с парогенераторами все в порядке. И наоборот, если давление в них бесконтрольно падает (очевидно, что это плохо), операторы должны констатировать, что данный шаг завершился успешно.

Возможно, явление конфликта эмоциональных окрасок можно устранить с помощью инверсии логического условия в операции левой колонки. Однако это не всегда можно сделать, не прибегая к использованию отрицательных конструкций (содержащих элемент «НЕ»), которых категорически следует избегать при написании процедур (*примечание: последняя фраза иллюстрирует, почему следует избегать использования отрицательных конструкций – фраза становится запутанной и трудно воспринимаемой*).

К сожалению, идентификация ошибок перехода из левой колонки в правую затруднена, т.к. сложно провести четкую границу между неправильным выполнением операции в левой колонке и собственно неправильным переходом. Так, в примере с уровнем в ПГ 375 см оператор неправильно выполнил действие левой колонки – неверно считал уровень. Далее он руководствовался возникшим у него ложным представлением и выполнил ровно то, что из него следовало – перешел в правую колонку. В примере с давлением в ПГ оператор корректно выполнил действие левой колонки и правильно понял ситуацию, однако не перешел в правую колонку. Очевидно, что «чистая» ошибка навигации состоит в том, что оператор правильно осознает ситуацию, которая сопряжена с переходом, однако не делает этот переход и наоборот.

2). *Ошибки перехода между действиями* внутри одной процедуры также довольно распространены. Внутренние переходы обозначаются в процедурах фразами «перейти к...» или «вернуться к...». Невыполнение этих команд может нарушить логику запланированных действий по ликвидации аварии. В проведенных экспериментах были зафиксированы четыре такие ошибки, три из которых состояли в простом пропуске переходов.

3). *Ошибки выхода из процедуры* состоят в невыполнении команды «Выйти из раздела». Такие команды означают, что цель данной процедуры достигнута, и рас-

полагаются в конце или, реже, внутри процедуры. В проведенных экспериментах операторы лишь однажды допустили такую ошибку, что было скорее всего вызвано невыразительным графическим исполнением команды – надпись «Выйти из раздела» визуально выглядела как составная часть формулировки шага и просто осталась незамеченной.

4). *Ошибки перехода к другой процедуре.* Переход в другую процедуру может указываться явно и неявно. При явном указании в процедуру включается команда, например, «Перейти к разделу 3.4 «Расхолаживание способом естественной циркуляции». Неявное указание – это постоянно действующие правила, например, при нарушении критических функций безопасности (КФБ) перейти к работе по руководству по управлению запроектными авариями. Учитывая, что мониторинг КФБ – отдельная непростая задача, такой переход может быть легко пропущен. Так, в одном из прогонов наблюдалось нарушение сразу двух КФБ, однако НСБ принял решение о продолжении работы по текущей процедуре.

Как уже отмечалось, ошибки навигации по процедурам довольно распространены. Экспериментальные прогоны показали, что таким ошибкам особенно подвержены двухколоночные симптомно-ориентированные процедуры, имеющие разветвленную сеть внутренних и внешних переходов.

### **Ошибки коммуникации**

Подробный анализ устной коммуникации операторов БЩУ в обсуждаемых прогонах был выполнен в статье [21]. В ходе этого анализа были выявлены следующие типы коммуникационных ошибок:

1) *ошибки отправителя сообщения* – неверное прочтение команд вслух, ошибочные запросы значений параметров и состояния оборудования при выполнении операций контроля;

2) *ошибки получателя сообщения* – отсутствие репетования (повторения озвученной команды), неверное истолкование отданных команд, искажение воспринимаемой информации вследствие шума на БЩУ и других причин.

В ходе отдачи команды (прочтения вслух шага процедуры) отправитель сообщения может по каким-то причинам вносить изменения в его содержание, как, например, в диалоге:

НСБ: «После увеличения уровня в КД до 11 м поддерживать его на этом значении *уменьшением подпитки* и *увеличением продувки* первого контура»;

ВИУР: «Отключаю TQ14»;

НСБ: «*Увеличь подпитку*, а *продувку оставь* на прежнем уровне. 11 метров держи в КД»;

ВИУР: «Принял, 11 метров в КД».

Зачитав шаг процедуры, НСБ затем изменил его формулировку. Трудно сказать, была ли это ошибка чтения, невнимательность или осознанное изменение команды.

### **ПРИЧИНЫ ОШИБОК ОПЕРАТОРОВ ПРИ РАБОТЕ С ПРОЦЕДУРАМИ**

Анализ большинства выявленных ошибок сопровождался тщательным анализом их причин, которые были разделены на три класса: личные качества операторов, групповое взаимодействие и характеристики процедур. Их вклад в совершение зарегистрированных ошибок показан на рис. 2. К *личным качествам* были отнесены небольшой опыт работы с двухколоночными процедурами в табличном формате, невнимательность, небрежность и излишняя суетливость. Недостатки *группового взаимодействия* проявились в устной коммуникации, происходившей на фоне существенного шума сигнализации и переговоров, а также недостаточно четкого соблюдения регламента переговоров.

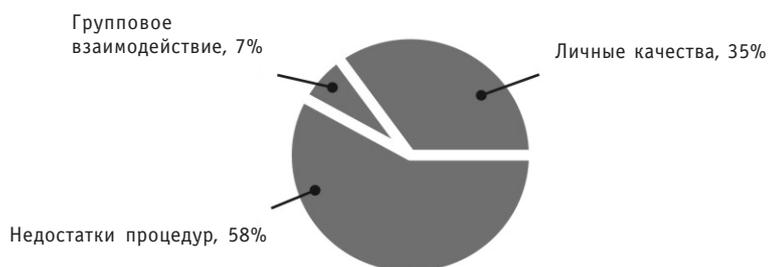


Рис. 2. Вклад причин в совершение ошибок

Доминирующим вкладчиком в совершение ошибок стали *недостатки процедур*, детализация которых приведена в табл. 1. Необходимо отметить, что полученные результаты коррелируют с предположениями и выводами других авторов [10, 11, 18].

Таблица 1

**Недостатки процедур, послужившие (и способные послужить) причиной ошибок операторов**

Характеристика процедуры *	Недостатки, связанные с характеристикой процедуры
Условия входа	Отсутствие диагностического алгоритма, однозначно выводящего на требуемую процедуру
Качество входа	Нечеткие, «размытые» симптомы и условия входа в процедуру
Полнота	Отсутствие альтернативного шага, если не получен результат при выполнении основного шага
	Инструкция не всегда «отвечает» развитию реальной ситуации
	Условия в основном и альтернативном шагах не описывают все варианты развития событий
Эффективность алгоритма	Неясная логика инструкции, вызывающая замешательство операторов
	Несоответствие темпа движения по инструкции требуемой скорости ликвидации аварии
Оформление и контекстные выделения	Шаги навигации не выделены визуально
	Небольшие шаги не отделены визуально от других шагов
	Равнозначные альтернативы шага визуально не разделены
Формулировки шагов и действий, языковые конструкции	Некорректная формулировка шага, использование двойных отрицаний
	Громоздкость формулировок
	Перегруженная альтернативная часть шагов
	Нечеткие формулировки условий действий
	Излишняя детализация (или обобщение) шагов
Термины и обозначения	Несоответствие обозначений в процедурах текущей конфигурации БЩУ
	Устаревшие действия в процедурах
	Фонетическая созвучность обозначений оборудования (например, ТК и ТQ)
Структурная сложность	Перегруженность и сложность переходов
	Не указаны необходимые условия, без которых невозможно начало выполнения действия

\* Примечание: характеристики процедур даны в соответствии с классификацией, введенной в [19].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполняя сравнительный [19] и эргономический [22] анализы событийно- и симптомно-ориентированных процедур, авторы не планировали выделять рассмотрение ошибок в отдельную тему. Вопрос классификации и анализа ошибок АЭС достаточно подробно освещен в многочисленных книгах, статьях и отчетах, незначительная часть из которых упомянута в начале данной статьи. Однако по мере углубления анализа стало ясно, что в ряде случаев именно определенные качества некоторых процедур становятся причиной весьма специфических ошибок, которые не возникли бы при работе с другими процедурами. Это и послужило поводом исследования и классификации таких ошибок.

Очевидно, что каждый тип и формат представления процедур порождают свой характер ошибок. Данная статья сконцентрирована на исследовании двухколоночных симптомно-ориентированных процедур.

Первый важный вывод, который можно сделать из этого исследования, касается проблем с логикой перехода из левой колонки в правую, заложенных в самой идеологии двухколоночного формата. Чаще всего эти проблемы возникают при выполнении операций проверки из левого столбца. Проверка может затрудняться тем, что предмет проверки изложен в текстовом виде, который неэффективен для представления логических конструкций. В этих условиях необходимо очень тщательно относиться к текстовым формулировкам действий.

Вторая важная проблема состоит в банальном игнорировании графических приемов, таких как визуальное выделение элементов навигации, визуальное структурирование элементов текста, которые могли бы существенно упростить работу операторов с процедурами. Это особенно важно в условиях высокой структурной и алгоритмической сложности, которой обладают симптомно-ориентированные процедуры.

Выявленные потенциальные (и реальные) проблемы помогут избежать ошибок при написании процедур в дальнейшем, а также могут быть приняты во внимание при расследовании учетных событий на АЭС, связанных с ошибками операторов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность персоналу полномасштабного тренажера учебно-тренировочного центра Балаковской АЭС за интересные и содержательные дискуссии, а также за терпеливый разбор задач управления энергоблоком.

## Литература

1. Чачко С.А. Предотвращение ошибок операторов на АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. Reason J. Human error. – NY: Cambridge University Press, 1990.
3. Суэйна А., Миллер Д. Ошибки человека и его надежность/В кн.: Человеческий фактор (в 6-ти томах). Том 1/ Под ред. Г. Салвенди. – М.: Мир, 1991. – С. 360-417.
4. Lee J., Park G., Sim B. Analysis of human errors in trip cases of Korean NPPs//Journal of the Korean Nuclear Society. - 1996. – Vol. 28. – № 6. – P. 563-575.
5. Анохин А.Н. Анализ деятельности оператора: модели и методы: Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 1992.
6. Rasmussen J. Human errors: a taxonomy for describing human malfunction in industrial installations//Journal of Occupational Accidents. – 1982. – Vol. 4. – № 2-4. – P. 311-335.
7. Gertman D., Blackman H., Marble J. et al. The SPAR-H human reliability analysis method (NUREG/CR-6883). - Washington, D.C.: USNRC, 2005.
8. Hollnagel E. Reliability Analysis and Operator Modeling//Reliability Engineering and System Safety. – 1996. – Vol. 52. – № 3. – P. 327-337.

9. Periodic Safety Review of Nuclear Power Plant: Safety guide. – Vienna: IAEA, 2003.
10. Holy Y. New emergency procedures of Westinghouse type from point of view of human factors and human reliability/Proceedings of the International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment (PSA '99) (Washington, D.C., August 22-26, 1999).
11. Barnes V., Haagensen B., OHara J. The human performance evaluation process: a resource for reviewing the identification and resolution of human performance problems (NUREG/CR-6751). – Washington, D.C.: USNRC, 2001.
12. Park J., Jung W. The operators non-compliance behavior to conduct emergency operating procedures – comparing with the complexity of the procedural steps // Journal of the Korean Nuclear Society. – 2003. – Vol. 35, № 5. – P. 412-425.
13. Rouse W., Rouse S. Analysis and classification of human error // IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics. – 1983. – Vol. SMC-13 (4). – P.539-549.
14. Деревянкин А.А. Исследование, разработка и применение методов оценки надежности персонала при проведении вероятностного анализа безопасности атомных станций: диссертация к.т.н. – М., 1991.
15. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. – Л.: Наука, 1982.
16. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
17. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 344 с.
18. OHara J., Higgins J., Stabler W. Computerization of nuclear power plant emergency operating procedures (BNL-NUREG-67216). – NY: Brookhaven National Laboratory Upton, 2000.
19. Плешакова Н.В. Анализ применения аварийных процедур оперативным персоналом БЩУ АС//Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2012. – № 3 (43).
20. Forester J., Kolaczowski A., Lois E. et al. Evaluation of human reliability analysis methods against good practices (NUREG-1842). – Washington, D.C.: USNRC, 2006.
21. Анохин А.Н., Плешакова Н.В., Чепурко В.А. Системный анализ устной коммуникации между операторами БЩУ АЭС в аварийных ситуациях//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 5-16.
22. Анохин А.Н., Плешакова Н.В., Майорчикова М.С. Эргономическая оценка и системный анализ процедур для управления энергоблоком АЭС/Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем: Сб. научн. тр. № 17 кафедры АСУ / Под ред. д.т.н., проф. А.В. Антонова. – Обнинск: ИАТЭ, 2007. – С. 68-77.

Поступила в редакцию 21.11.2012

# АДСОРБЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЙОДА ИЗ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНЫХ СРЕД И ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НОВЫМ ТИПОМ АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СОРБЕНТА

**В.А. Шилин\*, А.Б. Гордиенко\*\*, А.С. Шилина\*\*, В.К. Милинчук\*\***

*\*Автономная некоммерческая организация, Научно-исследовательский центр «Радиофизические тестовые технологии», г. Москва*

*\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Представлены результаты исследований сорбции алюмосиликатными сорбентами паров молекулярного йода из газоаэрозольных сред в статическом и динамическом режимах. Сорбционная емкость по парам молекулярного йода составляет  $234 \pm 1.0$  мг/г. Коэффициент извлечения йода из газоаэрозольных сред при сорбции в динамическом режиме  $99.5 \pm 0.2\%$ . Сорбционная емкость алюмосиликатного сорбента по растворенному в воде йоду составляет  $254 \pm 12$  мг/г. Алюмосиликатный сорбент, модифицированный  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ , обладает высокой льдообразующей активностью.

**Ключевые слова:** йод, адсорбция, алюмосиликатный адсорбент, сорбционная емкость, коэффициент извлечения йода, льдообразующая активность аэрозоля.

**Key words:** iodine, adsorption, aluminosilicate adsorbent, sorption capacity, factor of extraction of iodine, ice-nucleation activity of aerosol.

## ВВЕДЕНИЕ

В составе аэрозолей и газовых примесей, выбрасываемых реакторами АЭС, идентифицируют, наряду с прочими радионуклидами, изотопы радиоактивного йода в виде молекулярного йода и его органических соединений, главным образом, йодистый метил. Как источник излучения наиболее важным нуклидом является изотоп йода  $^{131}\text{I}$ , имеющий период полураспада 8.05 сут и энергию  $\gamma$ -кванта 0.7–0.8 МэВ. Помимо аэрозольной формы  $^{131}\text{I}$  может существовать и в газовой форме также в виде молекулярного йода и его органических производных [1–3]. Соотношение обеих форм в выбросах АЭС зависит от многих факторов и различно для реакторов ВВЭР и РБМК.

В связи с масштабным развитием атомной энергетики остро встает проблема разработки высокоэффективных и надежных систем улавливания радиоактивного йода. В настоящее время наиболее распространенным способом уменьшения активности газообразных отходов АЭС является способ, основанный на динамической сорбции газообразных продуктов деления на активированном угле. В час-

тности, очистка вентиляционного воздуха от йода и его соединений на предприятиях атомной промышленности производится с помощью фильтров, заполненных слоем активированного угля, который пропитывают специальными веществами, например,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{PbI}_2$ ,  $\text{KI}$ ,  $\text{CuI}$ , триэтиленидиамином. Существующие в настоящее время системы спецгазоочистки и вентиляции на всех АЭС на территории бывшего СССР нуждаются в реконструкции, необходимость которой вызвана снижением коэффициентов очистки вследствие износа фильтрационных компонентов и ужесточением норм допустимого выхода радионуклидов в атмосферу [4]. Большое значение в данной проблеме имеет ее экономическая сторона, так как удовлетворяющие современным требованиям фильтры на основе импрегнированных серебром активированных углей являются дорогостоящими.

В статье рассматриваются результаты экспериментов по сорбции молекулярного йода из газоаэрозольных сред и водных растворов алюмосиликатными сорбентами, являющимися синтетическими цеолитами, разрабатываемыми на кафедре общей и специальной химии ИАТЭ по оригинальным способам, защищенным патентами РФ [5, 6]. Синтез сорбентов осуществляется в одну технологическую стадию с использованием недорогих реагентов, производимых отечественной промышленностью. Сорбенты обладают высокой удельной поверхностью порядка  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$  и высокой сорбционной активностью по отношению к ряду катионов металлов [7–8].

Кроме того, в статье приводятся результаты по получению на основе йодсодержащих алюмосиликатов специальных реагентов, так называемых льдообразующих агентов, используемых для активных воздействий на переохлажденные облака с целью предотвращения градов и регулирования выпадения осадков. Активные воздействия проводятся с целью коррекции климата, необходимость которой вызвана увеличивающейся в настоящее время климатической нестабильностью. Основным действующим началом льдообразующих агентов является йодистое серебро. Поскольку за последние десять лет стоимость серебра возросла практически в десять раз [9], остро встал вопрос снижения его содержания в рецептурах, используемых для создания реагентов для активного воздействия, посредством использования неактивных носителей, составляющих основу частиц аэрозоля, применяемого в процессах воздействия с поверхностью нанесенным слоем активного вещества. В свете этого, использование алюмосиликатов как носителей реагентов активного воздействия могло бы стать еще одной сферой практического приложения синтезированных алюмосиликатных сорбентов [10].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Во всех проводимых экспериментах использовали стабильный изотоп йода  $^{127}\text{I}$ . По физико-химическим свойствам изотопы йода (как стабильные, так и радиоактивные) практически не отличаются друг от друга. Поэтому результаты исследования обычного стабильного изотопа  $^{127}\text{I}$  могут быть перенесены на радиоактивный изотоп  $^{131}\text{I}$ .

## Сорбция паров йода из газоаэрозольных сред в статическом режиме

Эксперимент основан на способности йода к сублимации. Давление паров йода над его кристаллами при  $25^\circ\text{C}$  в замкнутом объеме составляет  $41.2 \text{ Па}$  [11]. Для определения максимальной сорбционной емкости сорбента в статических условиях в плотно закрывающийся эксикатор помещали чашку Петри с кристаллами йода. Рядом в эксикаторе располагали стеклянные бюксы (доведенные до посто-

янной массы), в которые помещали обезвоженные образцы сорбентов с фиксированной массой. В эксикаторе быстро устанавливается равновесие между возогнанным йодом и кристаллическим. Давление паров йода остается постоянным на всем протяжении эксперимента, так как берется избыточное количество кристаллического йода. О сорбции йода судили по изменению массы сорбента. Сорбцию проводили до тех пор, пока не переставала изменяться масса сорбента. В аналогичном эксикаторе проводили холостой опыт без йода для того, чтобы учесть сорбцию паров воды.

### **Сорбция паров йода из газоаэрозольных сред в динамическом режиме**

Газоаэрозольную смесь, содержащую пары йода, готовили в специальной камере пробоподготовки КПП-1 объемом 13 м<sup>3</sup>, оснащенной системами активной вентиляции и перемешивания, устройством для аспирации (отбора нужного количества аэрозоля). Внутри камеры помещали 1–2 г кристаллического йода и включали систему перемешивания. Через сутки получали однородную газоаэрозольную смесь по всему объему камеры. С помощью аспиратора через поглотительный патрон пропускали 1–2 м<sup>3</sup> газовой фазы с постоянной скоростью 2 л/мин. Поглотительный патрон представляет собой стеклянную трубку с сорбентом, закрытую с обеих сторон пробками из стекловаты, фиксирующими поглотитель. Из поглотительного патрона пробу газовой фазы направляли в барботажное устройство, где находился фиксированный объем раствора йодида калия. Неадсорбированный молекулярный йод легко растворяется в йодиде калия, образуя соединение KI<sub>3</sub>. Далее отбирали аликвоту раствора из барботажного устройства и титровали ее тиосульфатом натрия в присутствии крахмала в качестве индикатора [12]. Остаточное содержание йода в аэрозоле определяли, используя закон эквивалентов по реакции  $2 S_2O_3^{2-} + I_2 = 2 I^- + S_4O_6^{2-}$ .

Содержание йода в исходном аэрозоле уточняли этим же способом, пропуская аэрозоль в барботажное устройство сразу из аспиратора. По разности содержания йода в газоаэрозольной смеси до сорбции и после сорбции в поглотительном патроне судили о сорбционной способности сорбента.

### **Сорбция молекулярного йода из водных растворов**

Растворимость йода в воде при температуре 25°C составляет 340 мг/л. Для изучения сорбционной активности сорбента по отношению к молекулярному йоду, растворенному в воде, готовили серию стандартных растворов йода с концентрациями 50–340 мг/л. Уточняли концентрацию полученных растворов, титруя их раствором тиосульфата натрия с концентрацией 0.01 М в присутствии крахмала. Далее по 100 мл раствора каждой концентрации помещали в конические колбы на 250 мл, приводили в контакт с сорбентом (1 г) и после установления сорбционного равновесия титрованием в тех же условиях определяли остаточное содержание йода в растворах. Из полученных результатов рассчитывали массу адсорбированного йода и степень извлечения его из раствора.

Для определения максимальной сорбционной емкости алюмосиликатного сорбента по отношению к молекулярному йоду использовали растворы йодида калия, растворимость йода в которых очень велика. Сорбцию вели из растворов с разной концентрацией йода. По полученным в результате титрования данным рассчитывали адсорбцию йода в расчете на 1 г сорбента и получали изотерму адсорбции Лэнгмюра как зависимость адсорбции от равновесной концентрации йода в растворе после установления сорбционного равновесия. Линейная анаморфоза

изотермы в координатах  $1/a - 1/c_{\text{равн}}$  ( $a$  – адсорбция в мг/г;  $c_{\text{равн}}$  – равновесная концентрация) позволяла графическим путем определить максимальную адсорбцию йода [13].

### Синтез льдообразующих агентов на основе алюмосиликатного сорбента

Исследуемый алюмосиликат обладает высокой сорбционной активностью к катионам переходных металлов. Это свойство позволяет получать серии импрегнированных сорбентов с различными специфическими свойствами. В данном случае импрегнирование проводили катионами серебра и меди для получения реагента активного воздействия на пересыщенные облака. В практике активных воздействий на облака хорошо зарекомендовал себя реагент  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ . Путем импрегнирования катионов серебра и меди, взятых в мольном соотношении 3:1, на поверхности алюмосиликатного сорбента и дальнейшей обработкой модифицированного сорбента раствором KI получали алюмосиликат, по развитой поверхности которого в виде мономолекулярного слоя равномерно распределено вещество  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### Сорбция паров йода из газовой среды алюмосиликатным сорбентом в статическом режиме

Сорбцию йода из паров, проводимую в герметично закрытом эксикаторе, осуществляли на сорбентах двух типов: базовом сорбенте, имеющем состав  $(\text{Na}_2\text{O})_1(\text{Al}_2\text{O}_3)_{2.6}(\text{SiO}_2)_1(\text{H}_2\text{O})_{11}$ , и модифицированном алюмосиликатном сорбенте, в состав которого введены катионы серебра. Оба сорбента имеют развитую удельную поверхность от 900 до 1000 м<sup>2</sup>/г. Сорбцию вели до полного насыщения сорбентов адсорбированным молекулярным йодом.

На рисунке 1 приведена зависимость насыщаемости сорбентов йодом от времени, полученная при температуре 25°C и давлении паров йода 41.2 Па. Насыщаемость выражена в миллиграммах адсорбированного йода в расчете на 1 г сорбента. Ее можно рассматривать как относительный привес массы сорбента за счет адсорбции йода. Как видно из рисунка, полная насыщаемость обоих сорбентов

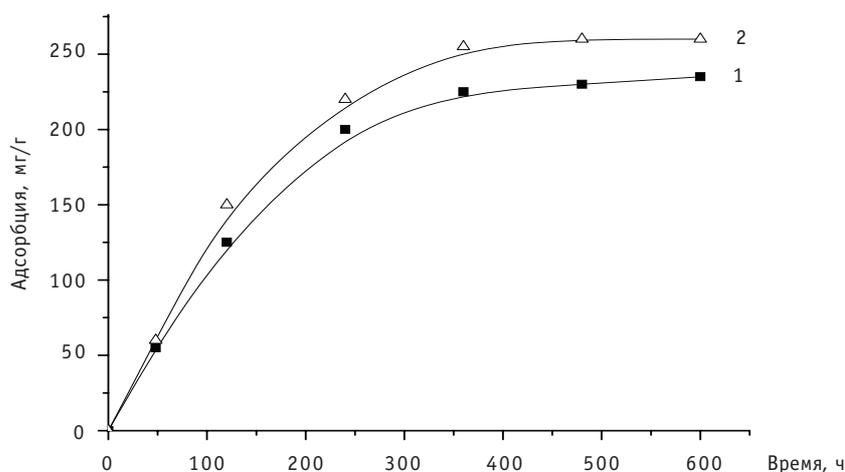


Рис. 1. Удельная сорбция йода из газовой фазы: 1 – на базовом алюмосиликатном сорбенте; 2 – на сорбенте с введенными катионами серебра

достигается за 400 часов (16–17 суток) и составляет 230 мг/г для базового сорбента и 260 мг/г для модифицированного сорбента.

В таблице 1 приведены данные по сорбции йода для двух типов сорбентов. Для каждого сорбента проводили три параллельных эксперимента.

Таблица 1

**Сорбция йода из газовой фазы при температуре 25°C и давлении паров йода 40.2 Па на алюмосиликатных сорбентах**

Сорбент	Исходная масса сорбента, г	Масса сорбента, г				$\Delta m_{\max}$	$\Delta m_{\max}$ на 1 г сорбента
		через 10сут	через 15 сут	через 20 сут	через 25 сут		
Базовый ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) <sub>1</sub> ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) <sub>2,6</sub> ( $\text{SiO}_2$ ) <sub>1</sub> ( $\text{H}_2\text{O}$ ) <sub>11</sub>	1.5559	1.8659	1.9059	1.9185	1.9190	0.3631	0.2334
	1.5586	1.8704	1.9147	1.9233	1.9243	0.3657	0.2346
	1.5651	1.8807	1.9238	1.9236	1.9335	0.3684	0.2354
Модифицированный катионами серебра	1.5333	1.8733	1.9133	1.9078	1.9333	0.4000	0.2600
	1.5406	1.8931	1.9142	1.9392	1.9408	0.4002	0.2598
	1.5465	1.8013	1.9327	1.9491	1.9511	0.4047	0.2616

Из полученных результатов видно, что максимально возможные сорбции молекулярного йода на обоих типах сорбентов практически не отличаются друг от друга и составляют для базового сорбента  $234 \pm 1.0$  мг/г, для сорбента, имеющего в своем составе серебро,  $260 \pm 2.0$  мг/г. Эти величины значительно превышают аналогичные показатели для сорбционных углеродистых материалов, используемых в системах вентиляции и спецгазоочистки на предприятиях атомной промышленности. Так для активированных углеродистых волокнистых материалов эта величина не превышает 25 мг/г, для активированных углей марки СКТ-3, используемых в фильтрах АЭС, она составляет примерно 12 мг/г [4]. С учетом того, что концентрация паров йода в вентиляционном воздухе на АЭС в стабильном рабочем режиме на входе в фильтры очень мала, использование алюмосиликатных сорбентов в фильтрах могло бы быть перспективным и значительно увеличить срок эксплуатации фильтров.

**Сорбция паров йода из газовой среды алюмосиликатным сорбентом в динамическом режиме**

При изучении сорбции паров йода в динамическом режиме были проведены одновременно три параллельных эксперимента. В каждом случае в камеру пробоподготовки помещали по 1 г металлического йода. Через сутки из камеры отбирали пробу газовой фазы объемом 1 м<sup>3</sup> и пропускали через барботажный сосуд, содержащий 5 л 0.1 М раствора йодида калия. По окончании отбора пробы аликвоту раствора йодида калия титровали 0.01 н раствором тиосульфата натрия. Общее содержание йода в газовой пробе, взятой из камеры пробоподготовки, рассчитывали по формуле

$$m(I_2) = C_S V_S V_B V_{ГП} / V_A,$$

где  $m(I_2)$  – масса йода, перешедшего в газообразное состояние в КПП;  $C_S$  – эквивалентная концентрация тиосульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ );  $V_S$  – объем  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , пошедший на титрование аликвоты раствора йодида калия из барботажного сосуда;  $V_B$  – объем йодида калия в барботажном сосуде;  $V_{ГП}$  – объем газовой пробы;  $V_A$  – объем

аликвоты йодида калия из барботажного сосуда, взятый для титрования тиосульфатом натрия.

Аналогичные операции проводили, отбирая пробу из вновь подготовленной газовой фазы КПП и пропуская ее через патрон с 10 г сорбента.

Для расчета коэффициента извлечения использовали формулу

$$K = m^*(I_2) / m(I_2) \cdot 100\%,$$

где  $m^*(I_2)$  – масса поглощенного сорбентом йода. В таблице 2 приведены результаты проведенных экспериментов по сорбции йода из газовой фазы в динамическом режиме. Коэффициент извлечения йода в этих условиях составляет  $99.5 \pm 0.2\%$ .

Таблица 2

**Сорбция йода из газовой фазы в динамическом режиме на алюмосиликатном сорбенте. Температура 25°C, давление паров йода 40.2 Па, скорость прокачки газовой фазы через сорбент 2 л/мин**

Номер пробы	$m(I_2)$ – масса йода до сорбции	$m^*(I_2)$ – масса поглощенного сорбентом йода	$K$ – коэффициент извлечения, %
1	0.0720	0.0718	99.7
2	0.0695	0.0692	99.5
3	0.0754	0.0753	99.9

**Сорбция йода из жидкой фазы алюмосиликатным сорбентом**

Для изучения сорбции йода из водных растворов была приготовлена серия стандартных растворов йода в 0.1 М растворе йодида калия с концентрациями 20–100 г/л. На основании полученных данных была построена изотерма адсорбции Ленгмюра (рис. 2) и определена максимальная сорбционная емкость сорбента по йоду. Сорбцию изучали на алюмосиликате двух типов, имеющих следующие составы:  $(Na_2O)_1(Al_2O_3)_{2.6}(SiO_2)_1(H_2O)_{11}$  и  $(Na_2O)_1(Al_2O_3)_{2.6}(SiO_2)_1$ . Последний, безводный, алюмосиликат был получен прокаливанием в течение двух часов при температуре 600°C исходного (первого) сорбента. На рисунке 2 представлены полученные изотермы адсорбции молекулярного йода из водных растворов для алюмосиликатных сорбентов и для сравнения приведены изотермы адсорбции йода для сорбентов природного происхождения – трепела и клиноптилолита.

Как видно, максимальной сорбционной емкостью (254 мг/г) обладает обезводженный термически модифицированный сорбент состава  $(Na_2O)_1(Al_2O_3)_{2.6}(SiO_2)_1$ . Базовый сорбент, в состав которого входит вода, имеет сорбционную емкость  $192 \pm 10$  мг/г. Близкую к нему емкость (180 мг/г) имеет природный цеолит клиноптилолит. Трепел, представляющий собой особую тонкодисперсную субстанцию на основе оксида кремния, практически не обладает сорбционной активностью по отношению к молекулярному йоду, растворенному в воде ( $a = 12.5$  мг/г). Следует отметить, что активированные угли в водных средах обладают очень высокой сорбционной емкостью к молекулярному йоду, которая составляет от 800 до 1100 мг/г. Тем не менее, вполне пригодным для сорбции молекулярного йода может быть и термически модифицированный алюмосиликат, поскольку максимальная растворимость йода в воде при 25°C составляет 340 мг/л.

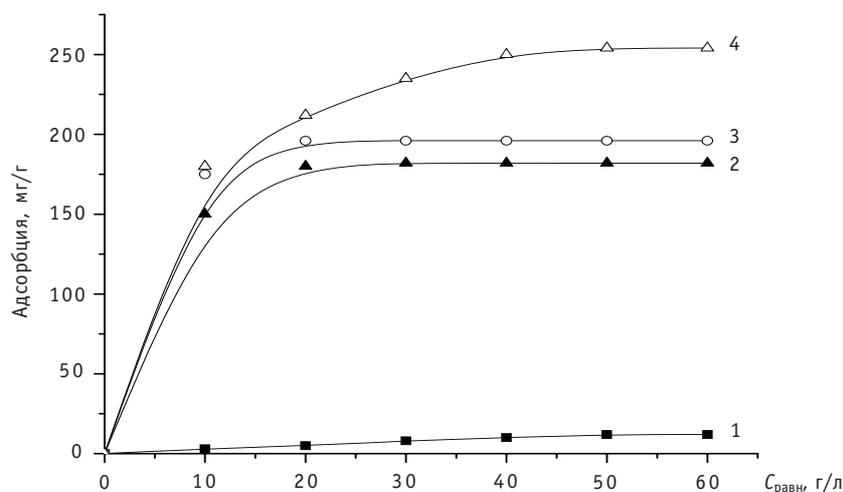


Рис. 2. Изотермы адсорбции йода из водных растворов на различных сорбентах: 1 – трепел; 2 – клиноптилолит; 3 – базовый алюмосиликатный сорбент; 4 – обезвоженный базовый алюмосиликатный сорбент

### Льдообразующая активность аэрозоля на основе модифицированного алюмосиликатного сорбента

Сорбционная емкость алюмосиликатного сорбента по меди составляет  $160 \pm 10$  мг/г, а по серебру  $360 \pm 16$  мг/г. Сорбент не обладает селективностью по отношению к катионам переходных металлов. На основании этих данных были приготовлены три раствора, содержащих нитрат серебра  $\text{AgNO}_3$  и нитрат меди  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  в соотношении 3:1, из которых велась одновременная сорбция на поверхности алюмосиликата катионов меди двухвалентной и катионов серебра. Растворы содержали в 100 мл 15, 30, 45 мг серебра и 5, 10, 15 мг меди соответственно. После установления сорбционного равновесия сорбент отфильтровывали, промывали и помещали в 0.1 М раствор йодида калия. Вследствие малой растворимости йодидов серебра и меди на поверхности сорбента происходило образование соответствующих йодидов. При этом медь двухвалентная превращалась в медь одновалентную в соответствии с окислительно-восстановительной реакцией  $\text{Cu}^{2+} + \text{I}^- = \text{Cu}^+ + 0.5 \text{I}_2$ . После этого сорбент отфильтровывали, промывали и сушили на воздухе. Полученную субстанцию исследовали на проявление льдообразующей активности. Для этого готовили в камере пробоподготовки аэрозоль, содержащий частицы алюмосиликата с адсорбированными на нем йодидами  $\text{AgI}$  и  $\text{CuI}$  в соотношении 3:1. Далее фиксированный объем аэрозоля поступал в климатическую камеру, где была создана переохлажденная облачная среда. Льдообразующая активность представляет собой количество льдообразующих частиц, полученных с 1 г вещества при данной температуре ( $-10^\circ\text{C}$ ) и определяется подсчетом количества снежинок, выпавших на единицу площади дна климатической камеры. Подсчет количества снежинок осуществляли с помощью цифрового оптического микроскопа Motic-3. Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 3.

Как видно из таблицы, аэрозоль, приготовленный на основе алюмосиликатного сорбента, по поверхности которого тонким слоем распределены йодиды серебра и меди (I) в количествах 98 и 45 мг ( $\text{Ag} - 45$  мг и  $\text{Cu} - 15$  мг) в расчете на 1 г сорбента, обладает льдообразующей активностью, близкой к активности аэрозольобразующего реагента  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ . Это позволяет предполагать, что на поверхности алюмосиликата действительно имеется тонкий слой соединения  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ . На долю

Таблица 3

**Льдообразующая активность аэрозоля на основе алюмосиликатного сорбента, модифицированного монослоем реагента  $Ag_3CuI_4$** 

Тип аэрозоля	Льдообразующая активность
$Ag_3CuI_4$	$5 \cdot 10^{13}$
Сорбент + $3AgI + CuI$ (Ag – 15 мг и Cu – 5 мг)	$7 \cdot 10^{10}$
Сорбент + $3AgI + CuI$ (Ag – 30 мг и Cu – 10 мг)	$2 \cdot 10^{12}$
Сорбент + $3AgI + CuI$ (Ag – 45 мг и Cu – 15 мг)	$8 \cdot 10^{12}$

серебра в алюмосиликате с распределенным на поверхности твердым раствором состава  $Ag_3CuI_4$  приходится 3.5% общей массы, в то время как в чистом реагенте этот показатель составляет 36%. Таким образом, использование модифицированного йодидами серебра и меди алюмосиликатного сорбента в качестве льдообразующего аэрозоля приводит к существенной экономии дорогостоящих серебро-содержащих реагентов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Из полученных результатов следует, что синтезированные новые типы термостойких алюмосиликатных адсорбентов обладают высокой сорбционной способностью по отношению не только к катионам тяжелых металлов и радионуклидов, находящихся в водных средах, но и к молекулярному йоду, находящемуся как в газовой фазе, так и в водных растворах. Максимальной сорбционной емкостью (254 мг/г) по отношению к молекулярному йоду, растворенному в воде, обладает термически модифицированный алюмосиликат. Статическая сорбционная емкость алюмосиликатов по отношению к йоду, находящемуся в газовой фазе, составляет 234 мг/г для базового сорбента и 260 мг/г – для сорбента, модифицированного катионами серебра. Эти величины на порядок больше соответствующих показателей у активированных углей марки СКТ-3 и углеродистых материалов, используемых в фильтрах АЭС [4]. Коэффициент извлечения йода из газовых сред в динамическом режиме достаточно высок – при непрерывной фильтрации газоаэрозольных смесей составляет 99.5%. Это говорит о том, что использование алюмосиликатных сорбентов в фильтрах для вентиляции воздуха на предприятиях атомной промышленности могло бы быть перспективным и значительно увеличить срок эксплуатации фильтров.

Обнаруженная высокая льдообразующая активность аэрозоля на основе алюмосиликатного сорбента, модифицированного монослоем реагента  $Ag_3CuI_4$ , позволяет рассматривать высокопористые алюмосиликатные сорбенты в качестве перспективного носителя для создания реагентов активного воздействия с пониженным содержанием дорогостоящих соединений серебра.

**Литература**

1. Четкин Ю.В., Якишин Е.К., Ещеркин В.М. Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
2. Справочник по ядерной электротехнологии/Пер. с англ. Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун; под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
3. Синев Н.М. Экономика ядерной энергетики. Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

4. Колобродов В.Г., Хажмурадов М.А., Григорова Т.К., Сергеев В.П. Исследование возможности использования активированных углеродных волокнистых материалов «Днепр» в системах вентиляции и спецгазоочистки АЭС//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. №4. – 2006. – С. 104–110.
5. Милинчук В.К., Шилина А.С. Патент РФ 2402486. 27.10.2010//Бюл. № 30.
6. Милинчук В.К., Шилина А.С. Патент РФ 2438974. 10.01.2012//Бюл. № 1.
7. Шилина А.С., Милинчук В.К. Сорбционные свойства нового типа алюмосиликатного сорбента //Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №3. – С. 24-30.
8. Шилина А.С., Милинчук В.К. Сорбционная очистка природных и промышленных вод от катионов тяжелых металлов и радионуклидов новым типом высокотемпературного алюмосиликатного адсорбента//Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т.10. – Вып. 2. – С. 237-245.
9. Тимофеев Н.Е., Мадякин Ф.П., Арутюнян А.С., Салин В.Н. Льдообразующие составы с ультрамалым содержанием йодида серебра/Труды Всес. семин. «Активные воздействия на градовые процессы и перспективы усовершенствования льдообразующих реагентов для практических активных воздействий» (Нальчик, 16-21 окт., 1989 г.). – М., 1991. – С. 220-224.
10. Сидоров А.И., Хван С.Б., Арутюнян А.С. и др. Разработка и испытания пиросоставов с ультрамалым содержанием йодистого серебра/Труды Всес. конф. «Активные воздействия на гидрометеорологические процессы» (Киев, 17-21 ноября, 1987 г.). – Л., 1990. – С. 467-471.
11. Барон Н.М., Квят Э.И., Подгорная Е.А. Краткий справочник физико-химических величин. – Л.: Химия, 1965. – 160 с.
12. Фадеева В.И., Шеховцова Т.Н., Иванов В.М. и др./ Под ред. Золотова Ю.А. Основы аналитической химии. Практическое руководство: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 463 с.
13. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. – СПб.: Лань, 2003. – 336 с.

Поступила в редакцию 12.05.2012

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ СТРАХОВОЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТУРБОМАШИНЫ

**С.Е. Белов, М.Н. Боровков, Н.Г. Кодочигов, Э.Г. Новинский**

*Открытое акционерное общество «Опытное конструкторское бюро  
машиностроения им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород*



Рассматриваются программа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию страховочных подшипников турбомашин РУ ГТ-МГР и некоторые итоги выполненных работ. Накапливаемый опыт в результате реализации данной программы исследований может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием вертикальных динамических машин.

**Ключевые слова:** реакторная установка, электромагнитный подшипник, страховочный подшипник, блок преобразования энергии, турбомашин, материалы пар трения, сегмент, демпфирующий блок.

**Key words:** reactor plant, electromagnetic bearing, catcher bearing, power conversion unit, turbomachine, friction pair materials, segment, damping unit.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание страховочных подшипников для турбомашин РУ ГТ-МГР, удерживающих в геометрической оси гибкий вертикальный ротор с большими массой и диаметральными размерами в случае потери питания электромагнитных подшипников, является сложной инженерной задачей. Актуальность и новизна задачи определяются особенностью компоновки турбомашин, высокими требованиями по надежности подшипниковых опор, отсутствием мирового опыта в создании подобных подшипников. Для верификации расчетных методик необходимо проведение всесторонних поэтапных экспериментов – от малоразмерных моделей до полномасштабных образцов страховочных подшипников. С этой целью в рамках проекта РУ ГТ-МГР запланировано проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Принцип проекта высокотемпературной газоохлаждаемой реакторной установки (РУ ВТГР) основывается на модульном гелийохлаждаемом реакторе, турбомашине (ТМ) на электромагнитных подшипниках (ЭМП), компактных высокоэффективных теплообменниках и высокопрочных корпусах из теплоустойчивых сталей. Реакторы данного типа способны обеспечить температуру теплоносителя до 1000°C. Им присущи высокая безопасность и высокоэффективное производство электроэнергии при минимальном влиянии на окружающую среду. В созданных

экспериментальных и опытно-промышленных ВТГР, использовался паротурбинный цикл, обеспечивающий надежную работу и снижающий технический риск создания АЭС. В паротурбинном цикле к.п.д. процесса не превышал 40 – 43% при температуре газа до 800°C на выходе из реактора. Возможности РУ ВТГР для производства электроэнергии существенно повышаются при использовании блока преобразования энергии (БПЭ) с прямым замкнутым газотурбинным циклом в первом контуре. В этом случае при температуре газа 850 – 950°C к.п.д. АЭС с РУ ВТГР может достигать порядка 48% и выше. Кроме того, прямой газотурбинный цикл преобразования энергии, по сравнению с паровым, значительно упрощает конструктивно-компоновочную схему энергоблока и сокращает число необходимого оборудования и обслуживающих систем. В связи с достижениями в области газовых турбин, высокоэффективных рекуператоров и ЭМП появилась реальная возможность разработки реакторной установки, содержащей безопасный модульный газоохлаждаемый реактор и БПЭ, реализующий высокоэффективный газотурбинный цикл Брайтона. Проект РУ ГТ-МГР, реализующий данную концепцию, приведен на рис. 1

Основным компонентом в БПЭ РУ ГТ-МГР является турбомашина, обеспечивающая циркуляцию гелия в первом контуре и преобразующая тепловую энергию теплоносителя в электроэнергию в прямом газотурбинном цикле [1].

Работоспособность ТМ реакторной установки ГТ-МГР (рис. 2) во многом определяется надежностью системы электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора общей массой порядка 68-ми тонн, длиной ~25-ти метров. Система электромагнитного подвеса ротора ТМ состоит из осевых и радиальных ЭМП, системы управления ЭМП и страховочных подшипников (СП).

Современные достижения в области разработки ЭМП позволили достаточно обоснованно подойти к выбору их в качестве опор для ротора ТМ. Несмотря на высокую надежность нельзя полностью исключить вероятность выхода из строя ЭМП

или их системы управления, например, при потере источника питания. В таких случаях в качестве резервных опор ротора используются страховочные подшипники, которые обеспечивают безаварийный «выбег» ротора до останова. Кроме того, страховочные подшипники используются при плановом отключении ЭМП остановленного ротора ТМ; динамических нагрузках, превышающих грузоподъемность ЭМП.

В процессе проектирования страховочных подшипников ТМ РУ ГТ-МГР принята конструктивная схема на подшипниках скольжения в связи с ее большей надежностью по сравнению с конструктивной схемой на подшипниках качения [2].

В настоящее время нет опыта по созданию страховочных подшипников для вертикальной ТМ, в которых вращается гибкий вертикальный ротор с большой массой и диаметральными размерами.

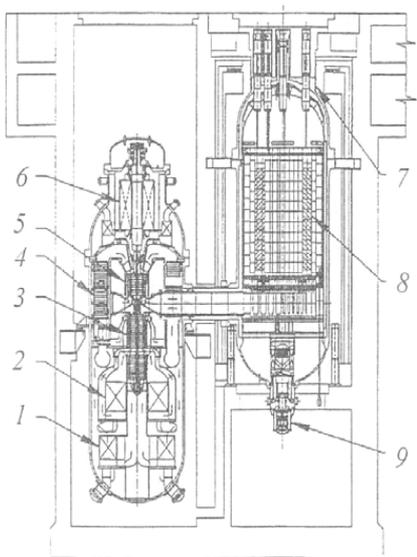


Рис. 1. Компоненка РУ ГТ-МГР: 1, 2 – концевой и промежуточный холодильники; 3 – компрессор; 4 – рекуператор; 5 – турбина; 6 – генератор; 7 – помещение для стержней СУЗ; 8 – активная зона; 9 – система охлаждения остановленного реактора

Чтобы обеспечить их надежную работоспособность, требуемые ресурс и срок службы необходимо проведение всесторонних поэтапных экспериментов – от малоразмерных моделей до полномасштабных образцов страховочных подшипников [3, 4]. С этой целью в рамках проекта РУ ГТ-МГР запланировано проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Комплекс работ включает в себя испытания материалов пар трения страховочных подшипников ТМ; определение газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника ТМ; испытания демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника, испытания макетов страховочных подшипников, опытных образцов страховочных подшипников в рамках испытаний полномасштабного турбокомпрессора. Последовательность и этапы разработки страховочных подшипников ТМ РУ ГТ-МГР представлена на рис. 3.

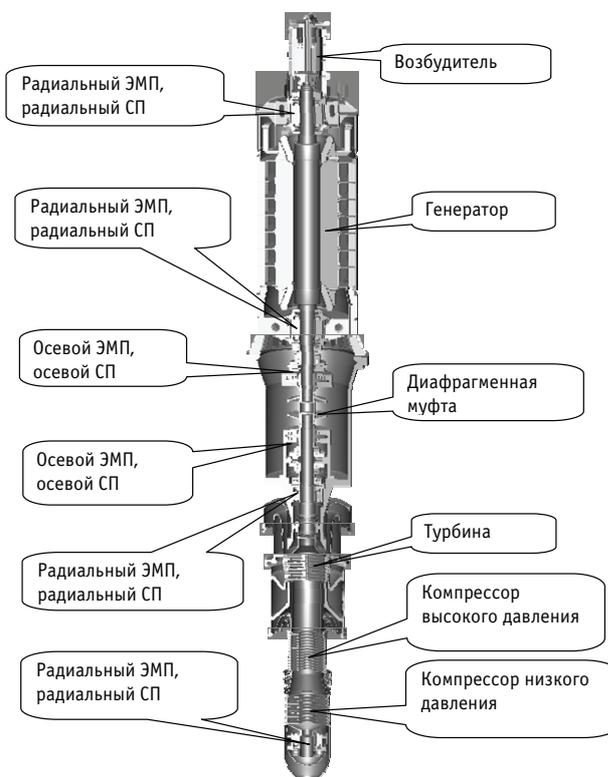


Рис. 2. Турбомашина ГТ-МГР

Последовательность и этапы разработки страховочных подшипников ТМ РУ ГТ-МГР представлена на рис. 3.



Рис. 3. Последовательность и этапы разработки СП

## НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ ПРОВЕДЕННЫХ НИОКР

### Предварительные испытания материалов пар трения

Предварительные испытания материалов пар трения проводились на специальных стендах предприятия (рис. 4), которые предназначены для проведения сравнительных испытаний на износостойкость различных сочетаний материалов пар трения скольжения в среде гелия [5, 6].

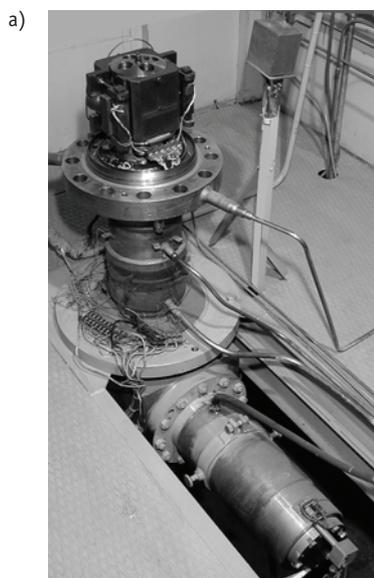


Рис. 4. Стенды для испытаний материалов пар трения в среде гелия: а) – стенд Л-1129; б) – трибометр TR 20 М 40

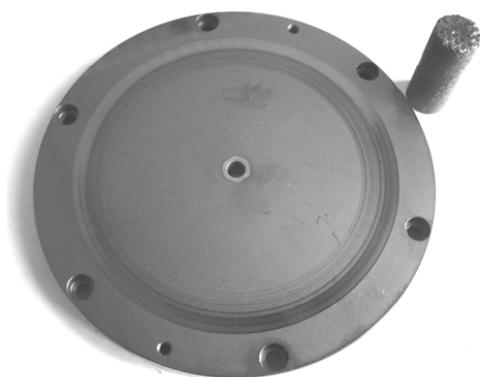


Рис. 5. Внешний вид образцов после испытаний

Исходя из условий эксплуатации и требований к материалам пар трения страховочных подшипников турбомашин РУ ГТ-МГР испытаниям подвергались различные антифрикционные покрытия, металлы, керамические материалы, композиционные материалы.

Испытания материалов пар трения (рис. 5) проводились при следующих параметрах:

- окружающая среда – гелий;
- скорость скольжения – от 0,14 (стенд Л-1129) до 10 м/с (трибометр TR 20 М 40);

- удельная нагрузка на образцы – до 1,4 МПа;
- путь трения – 600 м.

В процессе испытаний определялись триботехнические характеристики: коэффициент трения, линейный износ, интенсивность изнашивания.

По результатам испытаний более 100 различных сочетаний материалов пар трения было установлено, что наилучшие результаты показали сочетания антифрикционных покрытий с композиционными и металлокерамическими материалами. Коэффициент трения при этом не превышал 0,05. Интенсивность изнашивания не превышала значения  $10^{-9}$ .

#### **Определение газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника**

Осевой страховочный подшипник турбомашин РУ ГТ-МГР представляет собой осевой подшипник скольжения сухого трения с газостатической разгрузкой, физический контакт в котором имеет место в течение одной – двух секунд, до подачи газа в подшипник. Для подтверждения возможности создания газостатического подвеса и верификации расчетных методик были проведены испытания по опре-

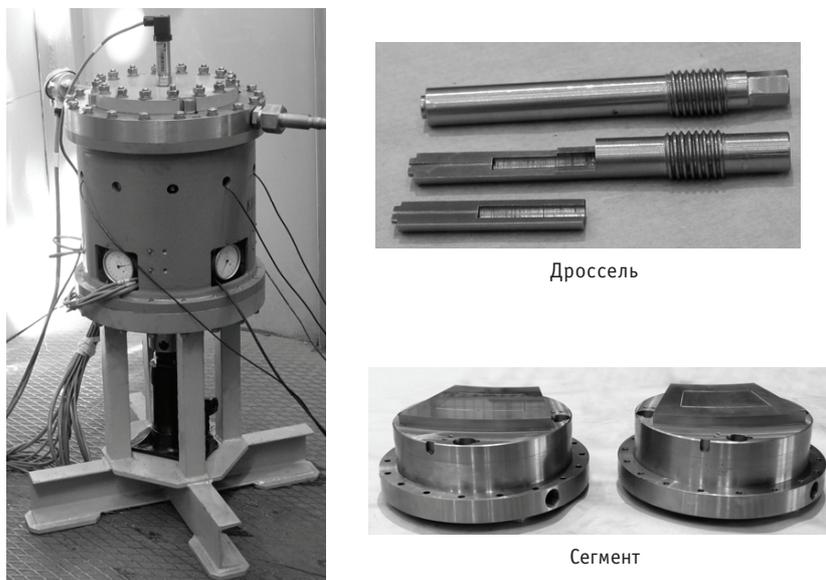


Рис. 6. Стенд для определения газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника

делению газостатических характеристик одного сегмента осевого СП на специальном стенде (рис. 6) [2].

На стенде были проведены исследования (без относительного скольжения торцов пары трения) газостатических характеристик одного сегмента осевого страховочного подшипника ТМ РУ ГТ-МГР, по результатам которых

- определена несущая способность сегмента при различных рабочих зазорах в паре трения и перепадах давления азота и гелия;
- определены оптимальные диаметры дросселей в сегменте, величины зазора в паре трения и рабочего давления;
- определены влияние качества поверхности рабочих торцов в паре трения на несущую способность сегмента и величины расходов азота и гелия в зазоре;
- подтверждена возможность создания системы газостатического подвеса осевого страховочного подшипника ТМ ГТ-МГР;
- выработаны рекомендации для оптимизации конструкции макета осевого страховочного подшипника.

### **Испытания демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника**

Демпфирующий блок устанавливается в радиальном направлении между каждой колодкой радиального страховочного подшипника скольжения и его внешним корпусом (рис. 7). Основным элементом демпфирующего блока является кольцевая фрикционная пружина, которая предназначена для снижения динамических радиальных сил и ограничения радиальных смещений ротора, вращающегося в радиальном страховочном подшипнике. Снижение сил, действующих на колодку в радиальном страховочном подшипнике, существенно зависит от демпфирующих характеристик пружин.

На экспериментальных стендах (рис. 8) проводятся испытания, целью которых являются исследования упругих и демпфирующих характеристик пружин при осевом сжатии и последующем снижении нагрузки а), подтверждения работоспособности пружин при циклических б) и ударных в) нагрузках. По результатам испы-

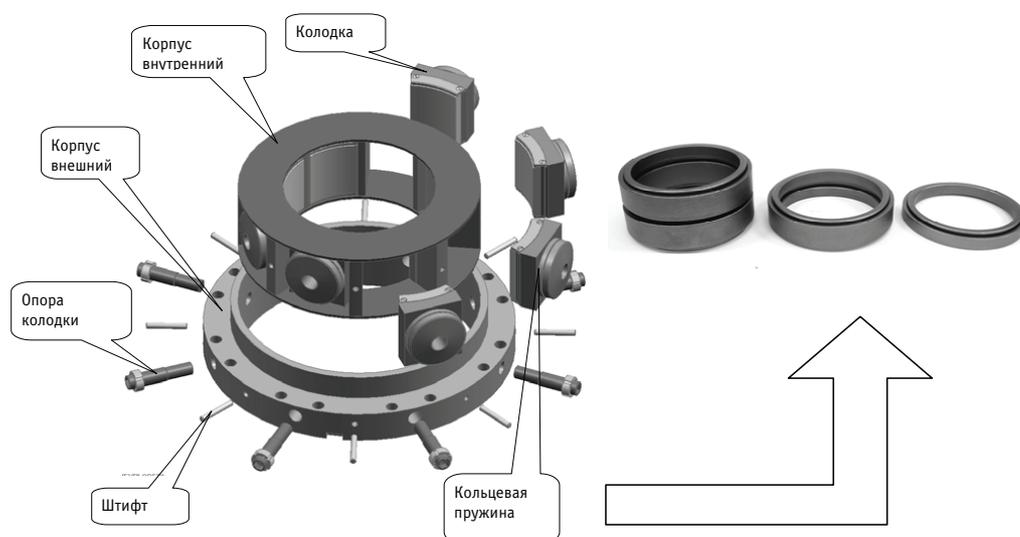


Рис. 7. Радиальный страховочный подшипник

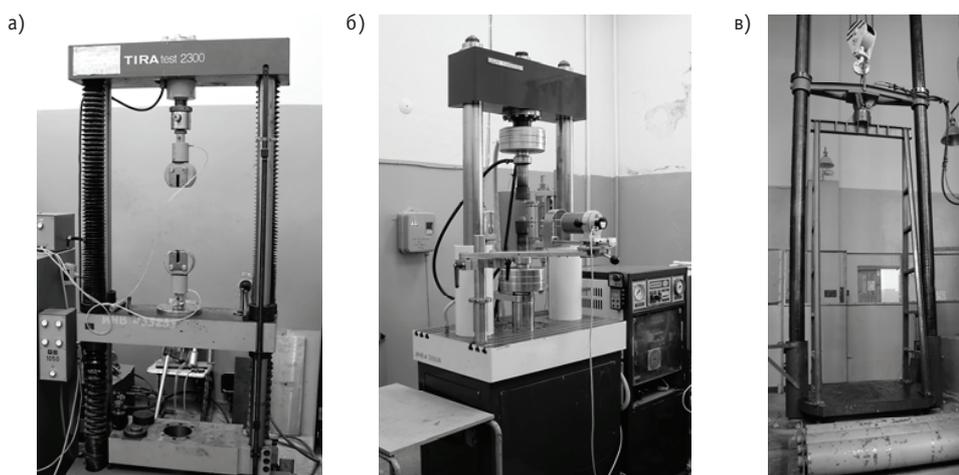


Рис. 8. Оборудование для испытаний демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника

таний были определены динамические силы и коэффициент поглощения энергии фрикционной пружиной.

По результатам испытаний демпфирующих блоков выбирался оптимальный блок для установки в макет радиального страховочного подшипника.

### Испытания макетов страховочных подшипников

Испытания макетов страховочных подшипников при натуральных скоростях скольжения и удельных нагрузках позволят экспериментально

- обосновать работоспособность макетов страховочных подшипников и системы подачи газостатического давления гелия в макет;
- определить коэффициент трения материалов рабочих пар, его зависимость от удельных нагрузок и скорости скольжения;
- определить износостойкость материалов пар трения, ее зависимость от скорости скольжения и удельных нагрузок;

- определить расчетные температуры и их распределение в материале роторных и статорных элементов макетов страховочных подшипников;
- определить статическую и динамическую жесткости и коэффициент демпфирования макетов страховочных подшипников.

Стенд для испытаний макетов страховочных подшипников состоит из следующих основных составных частей:

- ходовой части (рис. 9);
- электрооборудования;
- системы подачи гелия низкого давления;
- системы подачи гелия высокого давления;
- системы охлаждения;
- информационно-измерительной системы;
- пульта управления.

Основные технические характеристики стенда:

- рабочая среда – гелий;
- температура рабочей среды – до 60°C;
- давление рабочей среды – до 0.11 МПа;
- частота вращения ротора – до 5400 об/мин;
- масса ротора – 9000 кг;
- максимальная линейная скорость скольжения на наружном (внутреннем) диаметре макета осевого страховочного подшипника – 280/165 м/с;
- максимальная линейная скорость скольжения на наружном диаметре макета радиального страховочного подшипника – 140 м/с;
- расчетная удельная нагрузка на осевой страховочный подшипник – до 1,3 МПа;
- расчетная удельная нагрузка на радиальный страховочный подшипник – до 1,5 МПа.

В конце 2012 г. планируется завершить изготовление стенда, а в 2013 г. провести пусконаладочные работы и получить первые результаты испытаний макетов страховочных подшипников, по итогам которых будут изготовлены опытные образцы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В мировой практике отсутствует опыт создания подшипников, подобных страховочным подшипникам турбомшины, обеспечивающих безаварийный останов вращающегося гибкого вертикального ротора большой массы и диаметрального размера в случае потери питания ЭМП. В ОАО «ОКБМ Африкантов» реализуется комплексная программа исследований по созданию страховочных подшипников для уникальной вертикальной турбомшины, являющейся составной частью блока преобразования энергии РУ ГТ-МГР. Экспериментальные исследования позволят поэтапно, начиная от маломасштабных моделей, отработать конструкцию страховочных подшипников, получить необходимые данные для ведения проектных работ и приобрести опыт эксплуатации страховочных подшипников, который будет использован при испытаниях полномасштабного турбокомпрессора и эксплуатации штатной ТМ. Опыт, полученный в результате реализации данной програм-

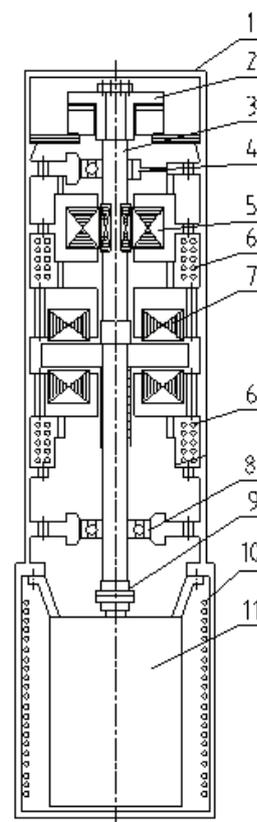


Рис. 9. Ходовая часть: 1 – корпус; 2 – макет осевого страховочного подшипника; 3 – ротор; 4 – макет радиального страховочного подшипника; 5 – радиальный ЭМП; 6 – холодильник; 7 – осевой ЭМП; 8 – шарикоподшипник; 9 – муфта; 10 – холодильник; 11 – электродвигатель

мы исследований, может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием динамических машин.

### **Литература**

1. Костин В.И., Кодочигов Н.Г., Белов С.Е., Васяев А.В., Головкин В.Ф., Шеню А. Развитие проекта блока преобразования энергии ГТ-МГР//Атомная энергия. – 2007. – Т. 102. – Вып. 1. – С. 57-63.
2. Белов С.Е., Боровков М.Н., Мордашов В.В., Юрков Д.Ю. Подходы к проектированию страховочных подшипников для турбомашин газоохлаждаемых реакторов/Сб. докл. V Научно-технической конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. – С. 521.
3. Боровков М.Н., Белов С.Е., Новинский Э.Г. Разработка страховочных подшипников вертикальной турбомшины установки ГТ-МГР//Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – №2(81). – С. 134.
4. Kodochigov N.G., Belov S.E., Borovkov M.N., et. al. Development of the GT-MHR vertical turbomachine design/Proc. of the IV International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology – HTR-2008 (September 28 – October 1, 2008, Washington, DC USA).
5. Кодочигов Н.Г., Белов С.Е., Шишкин В.А., Боровков М.Н., Ятманов А.В. Экспериментальные исследования материалов пар трения для резервных подшипников турбомшины модульного гелиевого реактора с газовой турбиной ГТ-МГР//Вопросы материаловедения. – 2006. – №2(46). – С. 199-203.
6. Kodochigov N.G., Belov S.E., Borovkov M.N., Baxi C.B. Tribological tests of friction pair materials for the GT-MHR turbomachine catcher bearings/Proc. of STLE/ASME International Joint Tribology Conference – IJTC-2008 (October, 2008, Miami, Florida, USA).

Поступила в редакцию 16.10.2012

## ОБ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА КИСЛОРОДА В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ

**Ю.А. Мусихин**

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



Рассмотрены основные положения контроля термодинамической активности кислорода в жидкометаллических теплоносителях методом ЭДС при помощи двухэлектродного электрохимического датчика кислорода с твердым кислородионным электролитом, контактирующим с теплоносителем, который одновременно является рабочим электродом датчика. ЭДС, развиваемая датчиком, пропорциональна логарифму активности кислорода. Отмечено, что адсорбция на электролите металлических примесей и окислов из теплоносителя приводит к поляризации рабочего электрода, вследствие чего уменьшается ЭДС и тем самым снижается точность контроля активности кислорода. Показано также, что процесс поляризации является многофакторным и локализован в пределах двойного электрического слоя, обусловленного разностью работ выхода контактирующих фаз. Приведены характеристики двойного слоя. Получены расчетные зависимости для работы выхода электрона из твердых электролитов и окислов металлов.

**Ключевые слова:** быстрый реактор, жидкометаллический теплоноситель, датчик кислорода, твердый электролит, электродная поляризация, работа выхода электрона.

**Key words:** fast reactor, liquid metal coolant, oxygen sensor, solid electrolyte, electrode polarization, electron work function.

Будущее ядерной энергетики в значительной степени определяется уровнем развития быстрых реакторов, охлаждаемых натрием, тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) свинцом, свинцом-висмутом [1].

Так в проектах перспективных быстрых реакторов БРЕСТ-300, БРЕСТ-1200 используется свинец [2], в реакторе СВБР-75/100 – свинец-висмут [3], а в проектах реакторов БН-800, 1200 и 1800 – натрий. Возможность использования свинца, свинца-висмута в качестве ТЖМТ в установках различного назначения (ядерные реакторы, электроядерные мишени, получение водяного пара и водорода, охлаждение термоядерных установок) была обоснована многолетними исследованиями на различных стендах и установках [4]. В основу проектов с натрием заложен

опыт успешной эксплуатации в течение 30-ти лет реактора БН-600 [5]. Для ТЖМТ было показано, что с целью обеспечения безаварийных режимов эксплуатации установок необходимо непрерывно контролировать термодинамическую активность кислорода в теплоносителе [6]. Целью контроля является поддержание в ТЖМТ такого кислородного режима, который обеспечивал бы формирование защитных окисных пленок на стенках проточных каналов, а также исключал бы образование окислов в теплоносителе [4, 7]. Термодинамическая активность кислорода в жидкометаллических теплоносителях (ЖМТ)  $a$  характеризует окислительную способность теплоносителя (окислительный потенциал) и выражается отношением

$$a = \frac{C}{C_n}, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация растворенного кислорода в ЖМТ;  $C_n$  – концентрация насыщения. Активность кислорода в ТЖМТ контролируют методом электродвижущих сил (метод ЭДС) с помощью разработанных электрохимических датчиков кислорода, чувствительным элементом в которых является окисный керамический электролит с кислородионной проводимостью [8, 9]. Аналогичные датчики для натрия находятся в стадии разработки [10]. В датчиках используют электролиты, не подверженные коррозии в ЖМТ.

### **ТВЕРДЫЕ ОКИСНЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТЫ: СОСТАВ, ИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА**

Окисные электролиты, которые в наибольшей степени используются на практике, являются твердыми растворами  $Me_xO_y \cdot Me_zO_q$  на основе простых окислов  $Me_xO_y$  ( $ZrO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $ThO_2$ ) с добавками компонентов  $Me_zO_q$  ( $CaO$ ,  $Y_2O_3$ ,  $ScO_3$ ). Данные окисные добавки обеспечивают высокую ионную проводимость и механическую прочность электролитов за счет стабилизации в решетке кубической структуры типа флюорита  $CaF_2$  [11].

Наибольшая ионная проводимость в окисных электролитах достигается при концентрациях стабилизирующих добавок 7–15 мол.% [12]. Окисные компоненты электролитов в исходном состоянии обладают электронной проводимостью  $p$ -типа, которая сохраняется и в твердых растворах.

Поэтому твердые электролиты в датчиках кислорода обладают смешанной ионно-электронной проводимостью. Данное обстоятельство учитывают на практике с помощью средних чисел переноса – ионного  $\bar{t}_i$  и электронного  $\bar{t}_e$  [11]. При этом данные числа равны ионной и электронной долям от общей проводимости, поэтому в твердых электролитах выполняется соотношение

$$\bar{t}_i + \bar{t}_e = 1. \quad (2)$$

Ионное число переноса  $\bar{t}_i$  электролита в составе датчика кислорода определяют экспериментально из метрологических измерений методом ЭДС характеристик датчика и заносят в паспорт на датчик. Принято считать кондиционным такой датчик, в котором  $\bar{t}_i = 0,95-1$ . С целью уменьшения доли электронной проводимости в электролитах используют при их изготовлении вещества и материалы особой чистоты.

Твердые электролиты получают по двум различным технологиям. По одной технологии [9, 13, 14] получают поликристаллические электролиты методами литья под давлением и шликерного литья с последующим обжигом при температурах выше 1273 К. В этом случае получают электролиты заданных размеров и форм. По другой технологии [15] получают монокристаллические электролиты – фианиты,

выращенные из расплавленной смеси окислов в виде бесформенных кристаллов, из которых механической обработкой изготавливают электролиты нужных форм и размеров. При рабочих температурах датчика фианитовые электролиты по сравнению с поликристаллическими обладают повышенной прочностью, теплопроводностью, ионной проводимостью, отсутствием открытой пористости. Данные преимущества очевидны для использования в датчиках кислорода фианитов вместо применяемых в настоящее время поликристаллических электролитов [8, 9].

### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ И КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМЫ ДАТЧИКА КИСЛОРОДА. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА

Электрохимический датчик кислорода работает по принципу гальванического концентрационного элемента (ГКЭ) с двумя жидкометаллическими электродами, разделенными твердым электролитом и окисным керамическим изолятором.

Один электрод является электродом сравнения с заданной активностью кислорода  $a = 1$ , а вторым электродом – рабочим – служит теплоноситель с активностью кислорода  $a \leq 1$ . Функциональная схема датчика приведена на рис. 1.

Видно, что при работе датчика протекает на электроде сравнения реакция ионизации атомов кислорода с последующим переносом анионов через электролит к рабочему электроду, где анионы разряжаются и переходят в теплоноситель.

При этом расчетная термодинамическая ЭДС датчика  $E_T$  определяется зависимостью

$$E_T = \frac{\mu_1 - \mu_2}{2F}, \quad (3)$$

где  $F$  – постоянная Фарадея.

Вследствие частичного шунтирования измерительной цепи электронной проводимостью электролита максимальная измеряемая ЭДС датчика  $E_0$  определяется произведением

$$E_0 = \bar{\epsilon}_i E_T. \quad (4)$$

Здесь отметим, что при условии  $\mu_1 < \mu_2$  электродные реакции (рис. 1) меняются местами, а направление движения зарядов изменится на противоположное.

Электродом сравнения в датчиках [8, 9] является система  $\text{Bi-Bi}_2\text{O}_3$  (температура плавления 544 К). Однако для расширения области рабочих температур датчика кислорода, что важно для свинца висмута и натрия, может быть использована система  $\text{In-In}_2\text{O}_3$  [16] (температура плавления 433 К) и система  $\text{Ga-Ga}_2\text{O}_3$  [17] (температура плавления 303 К). В указанных электродах сравнения химический потенциал кислорода равен  $\mu_1 = \Delta G_{\text{M}_2\text{O}_3}^0$ , где  $\Delta G_{\text{M}_2\text{O}_3}^0$  – стандартная свободная энергия образования соответствующего окисла. Для рабочего электрода справедливо ра-

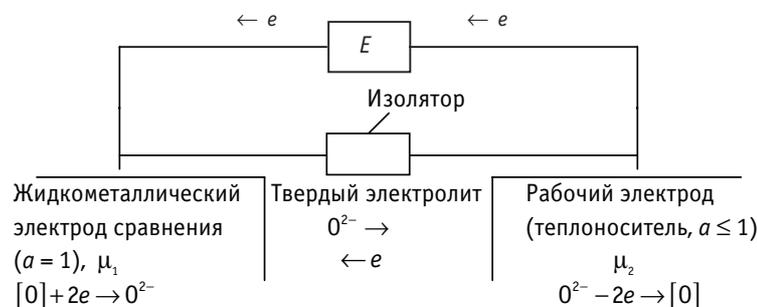


Рис. 1. Функциональная схема датчика кислорода ( $\mu_1 > \mu_2$ ), где  $\mu_1, \mu_2$  – химический потенциал растворенного кислорода  $[O]$  в жидких металлах

венство  $\mu_2 = \Delta G_{\text{окт}}^0 + RT \ln a$ , где  $\Delta G_{\text{окт}}^0$  – аналогичная энергия для окислов, образующихся в ЖМТ при активности кислорода  $a = 1$ . С учетом найденных выражений получаем из (3), (4) следующую зависимость для измеряемой ЭДС датчика:

$$E_0 = \frac{\bar{t}_i}{2F} (\Delta G_{\text{M}_2\text{O}_3}^0 - \Delta G_{\text{окт}}^0 - RT \ln a). \quad (5)$$

Данная зависимость является рабочей характеристикой датчика кислорода и позволяет определять активность кислорода в ЖМТ методом ЭДС. Так, например, для свинцово-висмутового теплоносителя характеристика (5) датчика с висмутовым электродом сравнения [8] имеет вид

$$E_0 = \bar{t}_i [0,088 - 9,91 \cdot 10^{-5} T(0,18 + \lg a)], \text{ В}, \quad (6)$$

где  $T$  – термодинамическая температура теплоносителя в зоне датчика.

С целью иллюстрации конструкций датчиков кислорода для ТЖМТ на рис. 2 приведена схема конструкции промышленного датчика [8], а на рис. 3 – схема датчика упрощенной конструкции [9]. В датчиках использован поликристаллический твердый электролит 90 мол.%  $\text{ZrO}_2 \cdot 10$  мол.%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ .

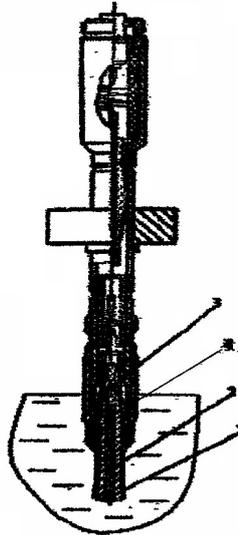


Рис. 2. Промышленный датчик кислорода для ТЖМТ: 1 – твердый электролит; 2 – висмутовый электрод сравнения; 3 – внутренний потенциальный вывод; 4 – керамический изолятор

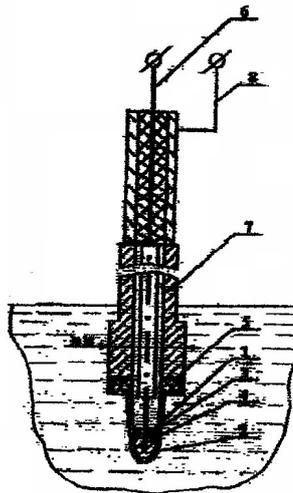


Рис. 3. Упрощенный датчик кислорода для ТЖМТ: 1 – твердый электролит; 2 – висмут; 3 – окись висмута; 4, 6 – внутренний потенциальный вывод; 5 – изолятор из ситалла; 7 – корпус; 8 – наружный потенциальный вывод

Из данных рисунков следует, что принципиально датчики отличаются лишь нижней (рабочей) частью. Верхняя часть содержит запорный блок из окисных материалов и высокоомный разъем для подключения к измерительному прибору. Наружным потенциальным выводом датчиков служит корпус. Твердый электролит в промышленном датчике изготовлен в форме цилиндра диаметром 4 мм и высотой 5 мм, запрессованного в керамический изолятор в виде трубки диаметрами 4, 10 и высотой 50 мм. Верхняя часть трубки заглушена стальной пробкой, а нижняя часть содержит электрод сравнения и герметично обжата корпусом датчика. Торцевая (рабочая) поверхность датчика обработана как единое целое. В упрощенном датчике электролит выполнен в форме пробирки высотой 15, наружным диаметром 10 и внутренним диаметром 4 мм. Пробирка герметично соединена с корпусом датчика при помощи ситалла.

### ПОЛЯРИЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ НА РАБОЧЕМ ЭЛЕКТРОДЕ ДАТЧИКА КИСЛОРОДА. РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Приведенные выше расчетные соотношения для датчика кислорода справедливы при наличии лишь одной потенциалопределяющей реакции на рабочем электроде (рис. 1), что характерно для чистых металлов и при отсутствии загрязнений рабочей поверхности электролита продуктами каких-либо дополнительных химических реакций. При этом на рабочем электроде отсутствуют какие-либо ограничения по разряду ионов кислорода и диффузионному переносу атомов с поверхности электролита в объем теплоносителя. В результате устанавливается на электроде электродный потенциал  $\varphi_{рЭ} = \varphi_0$ , в электролите – ионный ток обмена  $I_0$ , пропорциональный диффузионному потоку, а на поверхности электролита активность кислорода  $a_s$ , близкая активности кислорода в объеме теплоносителя  $a_v$ . В отличие от этого, как видно из рис. 2 и 3, на рабочем электроде датчика могут быть реализованы следующие факторы поляризации, изменяющие электродный потенциал:

- отложения окислов на поверхности электролита;
- адсорбция металлических примесей на электролите;
- образование микротрещин на поверхности электролита;
- уменьшение сопротивления межэлектродного изолятора;
- наличие открытых микропор на поверхности электролита.

Очевидно, что при длительной эксплуатации датчика кислорода в ЖМТ количество и степень влияния поляризующих факторов на электродный потенциал зависят от технологических режимов, проводимых в циркуляционном контуре.

Поэтому процесс поляризации рабочего электрода датчика кислорода в ЖМТ является многофакторным и нестационарным в плане доминирования во времени либо одного, либо нескольких факторов. При этом могут быть реализованы следующие основные типы поляризации:

- поляризация замедленного разряда ионов кислорода;
- поляризация диффузии, обусловленная уменьшением характеристик диффузионного переноса кислорода с поверхности электролита в объем теплоносителя;
- поляризация химических реакций, обусловленная взаимодействием кислорода с металлическими примесями на поверхности электролита.

Поляризующие факторы увеличивают ионный ток в цепи датчика ( $I > I_0$ ) и активность кислорода на поверхности электролита ( $a_s > a_v$ ), что приводит к увеличению электродного потенциала на величину поляризации  $\eta$  ( $\varphi_{рЭ} = \varphi_0 + \eta$ ). Поэтому измеряемая ЭДС датчика кислорода уменьшается на эту же величину и составляет

$$E = E_0 - \eta. \quad (7)$$

В первом приближении поляризация определяется зависимостями [18–20]

$$\eta = \sum \eta_{I,C,X}, \eta_I = \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{I}{I_0} \right), \eta_C = \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{C_s}{C_v} \right), \eta_X = - \frac{\sum \Delta G}{2F}, \quad (8)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\Delta G$  – энергия Гиббса дополнительных химических реакций.

Из выражений (5), (7) следует, что поляризация рабочего электрода датчика кислорода может снизить точность определения активности кислорода в ЖМТ. Данное обстоятельство приводит к необходимости разработки методов и средств контроля поляризации. Очевидно, что для решения этой задачи требуется такая обобщенная модель поляризации, которая включала бы в себя характеристики электрода, удовлетворяющие указанным типам поляризации. Такими характерис-

тиками являются структурные элементы двойного электрического слоя, который формируется на контакте электролит-среда и в котором протекают процессы поляризации [21]. Согласно зонной теории твердого тела [22], силовой характеристикой двойного слоя является контактная разность потенциалов  $\Delta\varphi_k$ , определяемая выражением

$$\Delta\varphi_k = \frac{W_1 - W_2}{e}, \quad (9)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $W_1, W_2$  – работа выхода электрона из контактирующих фаз (работа выхода фаз).

Оксиды металлов обладают либо электронной проводимостью n-типа, либо дырочной проводимостью p-типа [23] и при этом имеют широкую запрещенную зону энергий электронов [24], что позволяет использовать для оксидов электронные свойства полупроводников. Данное положение означает, что при образовании контакта двух фаз на рабочем электроде датчика кислорода (электролит-металл, электролит-окисел, окисел-металл) электроны проводимости переходят из фазы с меньшей работой выхода в фазу с большей работой выхода. В результате приконтактная область первой фазы заряжается положительно, а второй отрицательно, формируя тем самым двойной электрический слой, который можно представить в виде плоского конденсатора с контактной емкостью  $C_k$ , контактной площадью  $S_k$  и напряженностью контактного электрического поля  $H_k$ . Причем контактное поле проникает в каждую фазу лишь на длину экранирования Дебая  $L_d$ , обусловленную областью локализации объемных зарядов двойного слоя. Указанные характеристики двойного слоя определяются зависимостями [25, 26] в виде

$$L_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0|\Delta\varphi_k|}{[n]\cdot e^2}}, \quad H_k = \frac{\Delta\varphi_k}{L_{d1} + L_{d2}}, \quad C_k = \frac{S_k}{\frac{L_{d1}}{\varepsilon_1} + \frac{L_{d2}}{\varepsilon_2}}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость фазы;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $|\Delta\varphi_k|$  – модуль контактной разности потенциалов;  $[n]$  – концентрация электронов проводимости в фазе до образования контакта.

Для металлов  $L_d = 0$  вследствие высокой концентрации электронов проводимости. Поэтому при контакте металла с окисным электролитом либо с окислом контактное электрическое поле локализуется в приконтактном слое окисных фаз.

Из выражений (9), (10) следует, что для практического использования характеристик двойного слоя на рабочем электроде датчика кислорода необходимы данные по значениям работы выхода твердого окисного электролита и оксидов, встречающихся в технологиях ЖМТ. Такие данные отсутствуют в справочной литературе. Поэтому определим расчетные зависимости, позволяющие использовать характеристики двойного электрического слоя для моделирования процессов поляризации на рабочем электроде датчика кислорода.

В [27] приведены данные по работе выхода металлов и оксидов для различных методов определения. Нами были использованы средние арифметические значения работы выхода оксидов и рекомендованные значения работы выхода металлов (табл. 1–3).

В таблице 3 работа выхода  $W_{ок}^M$  равна меньшей, а работа  $W_{ок}^B$  – большей из величин  $W_{ок1}, W_{ок2}$ .

Данные табл. 1–3 приведены на рис. 4, 5, 7.

Из рисунков 4 и 5 следует, что между работой выхода простых оксидов и металлов наблюдаются линейные корреляционные зависимости, которые описываются выражениями

Таблица 1

**Работа выхода металлов и простых окислов с проводимостью n-типа**

Металл	Окись	Работа выхода, эВ	
		$W_M$	$W_{OK}$
Ca	CaO	2,80	2,06
Dy	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,25	2,64
Nd	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,20	2,80
Zr	ZrO <sub>2</sub>	3,90	4,45
Th	ThO <sub>2</sub>	3,30	3,18
Be	BeO	3,92	4,25
Ti	TiO <sub>2</sub>	3,95	3,87
Ta	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,12	4,65
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,25	4,25
Zn	ZnO	4,24	4,45
W	WO <sub>2</sub>	4,54	4,96
Mo	MoO <sub>3</sub>	4,30	4,25
Lu	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,14	3,08

Таблица 2

**Работа выхода металлов и простых окислов с проводимостью p-типа**

Металл	Окись	Работа выхода, эВ	
		$W_M$	$W_{OK}$
Y	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,30	3,10
Er	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,25	3,05
Gd	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,10	2,91
Ho	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,22	3,18
La	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,30	3,50
Co	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,41	5,65
Ni	NiO	4,50	5,25
Cu	Cu <sub>2</sub> O	4,40	5,03

$$W_{OK}(n) = -2.10 + 1.56W_M, \text{ эВ}, \quad (11)$$

$$W_{OK}(p) = -2.65 + 1.79W_M, \text{ эВ}. \quad (12)$$

Зависимости (11), (12) приведены на рис. 6.

Из рисунка 6 следует, что зависимость  $W_{OK}(p)$  расположена выше зависимости  $W_{OK}(n)$ . Данное положение ха-

рактерно для полупроводниковых структур [25].

Как видно из рис. 6, средняя разность между зависимостями  $W_{OK}(p)$  и  $W_{OK}(n)$  равна 0,3 эВ, что составляет 7% на уровне  $W_{OK} = 4$  эВ. Поскольку не всегда может быть установлен тип проводимости окислов, то целесообразно использовать для практических расчетов среднюю зависимость 3 рис. 6 в виде

$$W_{OK} = -2.37 + 1.67W_M, \text{ эВ}. \quad (13)$$

На рисунке 7 приведены данные по работе выхода двойных окислов. Эти данные обобщаются линейной зависимостью, которую следует использовать для определения работы выхода окисных электролитов в виде

Таблица 3

**Работа выхода простых и двойных окислов**

Двойные окислы OK1·OK2	Работа выхода, эВ			$\frac{2W_{OK}^M + W_{OK}^B}{2}, \text{ эВ}$
	$W_{OK1 \cdot OK2}$	$W_{OK1}$	$W_{OK2}$	
BaO·SrO	1,26	1,70	1,65	2,50
BaO·Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,18	1,70	4,65	4,03
BaO·WO <sub>3</sub>	2,81	1,70	6,15	4,77
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,96	2,91	3,50	4,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·TiO <sub>2</sub>	4,58	3,60	3,87	5,54
ZnO·TiO <sub>2</sub>	4,37	4,45	3,87	6,09
CaO·SrO	1,60	2,06	1,65	2,68

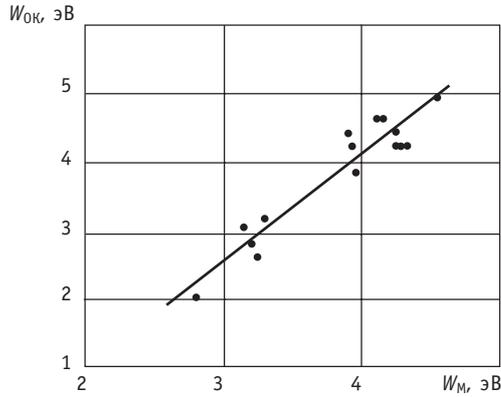


Рис. 4. Работа выхода простых окислов с проводимостью n-типа

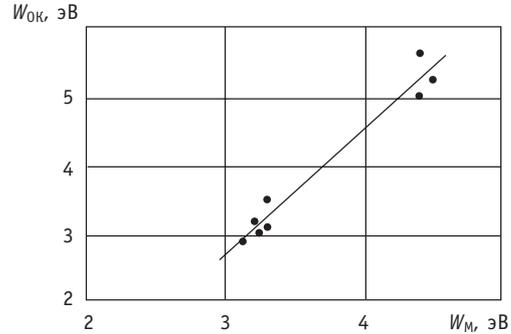


Рис. 5. Работа выхода простых окислов с проводимостью p-типа

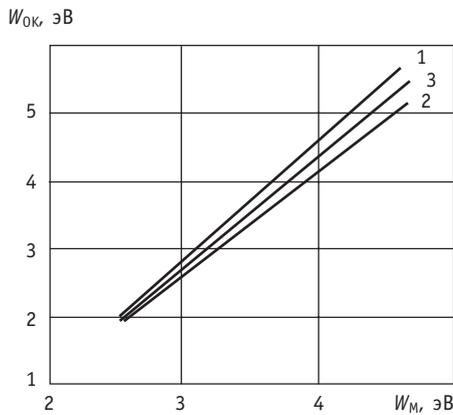


Рис. 6. 1 – работа выхода  $W_{OK}(p)$ ; 2 – работа выхода  $W_{OK}(n)$ ; 3 – усредненная зависимость  $W_{OK}$

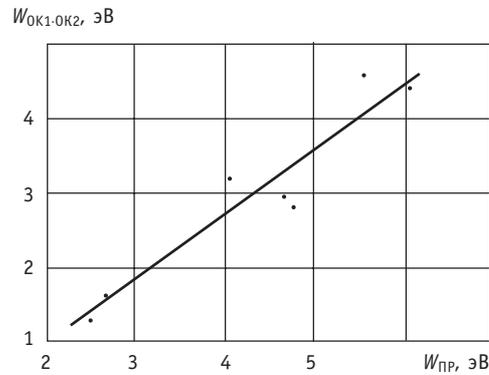


Рис. 7. Работа выхода двойных окислов:

$W_{np} = \frac{2W_{OK}^M + W_{OK}^B}{2}$  – приведенная работа выхода простых окислов

$$W_{OK1-OK2} = -0,83 + 0,44(2W_{OK}^M + W_{OK}^B), \quad (14)$$

где работа выхода окислов рассчитывается из соотношения (13).

Выражения (13), (14) позволяют рассчитывать поляризацию рабочего электрода датчика кислорода, используя уравнение Батлера-Фольмера [28] в виде

$$I = I_0 \cdot \left\{ \exp\left[\frac{\alpha n F \eta}{RT}\right] - \exp\left[-\frac{(1-\alpha) n F \eta}{RT}\right] \right\}, \quad (15)$$

где  $\alpha = 0,5$  – коэффициент переноса атомов кислорода через контакт;  $n = 2$  – количество электронов, участвующих в электродной реакции.

Ионные токи в зависимости (15) определяются выражениями

$$I = \bar{t}_i \sigma S_k H_k, \quad I_0 = \bar{t}_i \sigma S_k H_k^0, \quad (16)$$

где  $\sigma$  – общая ионноэлектронная удельная проводимость электролита;  $H_k^0$  – напряженность контактного электрического поля при отсутствии на электролите примесей и окисных отложений из теплоносителя.

После разложения экспонент (15) в ряд, учитывая зависимости (16), получаем в первом приближении расчетное выражение для поляризации в виде

$$\eta = \frac{RTH_k}{2FH_k^0}. \quad (17)$$

Так с учетом физических постоянных  $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ,  $F = 96486 \frac{\text{Дж}}{\text{В} \cdot \text{моль}}$  и зависимостей (10) получаем для контакта электролит-окисел расчетную поляризацию (17) в виде

$$\eta = 4,31 \cdot 10^{-5} \frac{|W_{\text{Э}} - W_{\text{ОК}}| L_{\text{ДЭ}} T}{|W_{\text{Э}} - W_{\text{Т}}| (L_{\text{ДЭ}} + L_{\text{ДОК}})}, \text{ В}, \quad (18)$$

где индексы Э, ОК, Т относятся к электролиту, окислу, теплоносителю соответственно, а прямые скобки указывают на модуль величины.

Полученные зависимости позволяют сделать следующие предварительные выводы об электродной поляризации датчика кислорода в теплоносителях натрия, свинец, свинец-висмут за счет окисных отложений на электролите. По справочным данным [27] рекомендованные значения работы выхода натрия, свинца, составляют 2,35; 4,0 эВ соответственно, что дает из выражения (13) значения работы выхода 1,55; 4,31 эВ основных окислов  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$  соответственно для состояния насыщения теплоносителей кислородом ( $\alpha = 1$ ).

Допуская приближенное равенство  $W_{\text{Т}} \cong W_{\text{ОК}}$ , получаем из выражений (18), (10) соотношения

$$\eta = 4,31 \cdot 10^{-5} \frac{T}{\left(1 + \frac{L_{\text{ДОК}}}{L_{\text{ДЭ}}}\right)}, \text{ В}, \quad \frac{L_{\text{ДОК}}}{L_{\text{ДЭ}}} \cong \sqrt{\frac{[n]_{\text{Э}}}{[n]_{\text{ОК}}}}. \quad (19)$$

Для указанных окислов справедливо неравенство  $[n]_{\text{ОК}} \gg [n]_{\text{Э}}$ , что приводит к соотношению

$$\eta = 4,31 \cdot 10^{-5} T, \text{ В}, \quad (20)$$

откуда получаем при температурах 600, 800 К значения электродной поляризации датчика кислорода в указанных теплоносителях  $2,6 \cdot 10^{-2}$ ;  $3,4 \cdot 10^{-2}$  В. Аналогичные результаты можно получить для окислов железа, хрома, никеля.

Таким образом, полученные расчетные зависимости позволяют моделировать и прогнозировать процессы поляризации рабочего электрода датчика кислорода в жидкометаллических теплоносителях.

### Литература

1. Ефанов А.Д., Козлов Ф.А. От выбора теплоносителей для ЯЭУ к атомной энергетике XXI века // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – № 2. – С. 99-102.
2. Орлов В.В., Леонов В.Н., Филин А.И. и др. Конструкция реакторов БРЕСТ электрической мощностью 300 и 1200 МВт/Сб. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 2. – С. 503-510.
3. Драгунов Ю.Г., Степанов В.С., Зродников А.В. и др. Реакторный модуль СВБР-75/100: повышенная безопасность, транспортабельность, возможность многоцелевого применения/Тез. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2003. – С. 16.
4. Громов Б.Ф., Орлов Ю.И., Мартынов П.Н. и др. Проблемы технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец-висмут, свинец)/Сб. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 1. – С. 92-106.
5. Ошканов Н.Н., Сараев О.М., Баканов М.В. и др. 30-летний опыт эксплуатации натриевого быстрого реактора БН-600//Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 186-191.
6. Шматко Б.А., Шимкевич А.Л. Диагностика коррозии и контроль технологических процессов методами активометрии в теплоносителе свинец-висмут/Сб. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 2. – С. 741-746.

7. Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Процессы шлакообразования в свинцово-висмутовом контуре. Предупреждение и ликвидация критических ситуаций/Сб. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 2. – С. 608-619.
8. Блохин В.А., Шимкевич А.Л., Мусихин Ю.А. и др. Опыт создания и эксплуатации твердоэлектродных активометров кислорода в теплоносителе свинец-висмут/Сб. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т.2. – С. 631-635.
9. Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Гулевский В.А. и др. Разработка электрохимического датчика капсульного типа для контроля кислорода в тяжелом теплоносителе. //Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – Вып. 5. – С. 360.
10. Козлов Ф.А., Кузнецов Э.К., Воробьева Т.А. и др. Электрохимическая ячейка для измерения активности кислорода в жидком натрии//Атомная энергия. – 1981. – Т. 51. – Вып. – 2. – С. 99-101.
11. Кофстад П. Отклонение от стехиометрии, диффузия и электропроводность в простых оксидах металлов/Пер. с англ. под ред. Н.Н. Семенова. – М.: Мир, 1975. – 396 с.
12. Хладик Дж. Физика электролитов/Пер. с англ. под ред. Я.М. Колотыркина. – М.: Мир, 1978. – 556 с.
13. Торопов Ю.С. Исследование процессов получения и свойств твердых электролитов на основе  $ZrO_2$ ; автореферат дисс... на соиск. уч. ст. к.т.н. – Свердловск, 1975.
14. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов: Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 480 с.
15. Рубашев М.А., Бердов Г.И., Гаврилов В.Н. и др. Термостойкие диэлектрики/Под ред. Н.Д. Десяткова. – М.: Атомиздат, 1980. – 246 с.
16. Иофис Н.А., Мусихин Ю.А., Шимкевич А.Л. и др. Электрические свойства фианитов в области 430–750 К// Неорганические материалы. – 1985. – Т. 21. – №2. – С. 330.
17. Мусихин Ю.А., Блохин В.А., Иевлева Ж.И. Электрические свойства фианитов в области 300–700 К/ Тез. докл. Межотраслевой конференции «Теплофизика-91» (12-15 ноября 1991г.), Сб. тез. докл. «Использование жидких металлов в народном хозяйстве». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1993. – С. 121-122.
18. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Основы теоретической электрохимии: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 240 с.
19. Фрумкин А.Н., Багоцкий В.С., Иофа З.А. и др. Кинетика электродных процессов: Учебное пособие для университетов. – Московский университет, 1952. – 315 с.
20. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988. – 496 с.
21. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов/Пер. с англ. под ред. А.Н. Фрумкина. – М.: Мир, 1967. – 352 с.
22. Фридрихов С.А., Мовнин С.М. Физические основы электронной техники: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1982. – 608 с.
23. Крылов О.В., Киселев В.Ф. Адсорбция и катализ на переходных металлах и их оксидах. – М.: Химия, 1981. – 288 с.
24. Физико-химические свойства окислов: Справочник /Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
25. Шалимова К.В. Физика полупроводников: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 392 с.
26. Горбачев В.В., Спицына Л.Г. Физика полупроводников и металлов: Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1982. – 435 с.
27. Фоменко В.С., Подчерняева И.А. Эмиссионные и адсорбционные свойства веществ и материалов: Справочник /Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Атомиздат, 1975. – 320 с.
28. Плэмбек Дж. Электрохимические методы анализа. Основы теории и применение/Пер. с англ. под ред. С.Г. Майрановского. – М.: Мир, 1985. – 504 с.

Поступила в редакцию 10.07.2012

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ АЭС, РАБОТАЮЩИХ НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ВОДЫ

**В.М. Абдулкадыров, Г.П. Богословская, В.А. Грабежная**

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



Основной задачей реакторных установок 4-го поколения является повышение КПД при соответствии самым высоким требованиям безопасности. Для разработки проекта одного из перспективных направлений – АЭС на сверхкритических параметрах (СКП) воды – требуется анализ и оценка термодинамического цикла с учетом особенностей работы на высоких параметрах.

В настоящее время работы по проектированию реакторных установок на сверхкритических параметрах проводятся в разных странах (Россия, Канада, Япония, Корея, Китай, США, Евросоюз и др.). Кроме отличий в конструкции, использованных материалах и компонентах активной зоны реактора предлагаются различные варианты тепловой схемы установки. При этом заявляются КПД от 43 до 48%. Анализ схем и варианты расчеты позволяют оптимизировать схему ЯЭУ с СКП и выявить пути дальнейших исследований при обосновании концепции для АЭС данного типа с использованием, в совокупности, опыта атомной и тепловой энергетики.

**Ключевые слова:** АЭС, реактор на сверхкритических параметрах воды, термодинамический цикл, генерация IV, турбина, активная зона, регенеративная установка, сепаратор-пароперегреватель, КПД цикла.

**Key words:** NPP, supercritical water reactor, thermodynamic cycle, Generation IV, turbine, reactor core, regenerative set, steam separator, cycle efficiency.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время конкуренция в сфере выработки электроэнергии определяется такими показателями энергоэффективности, как коэффициент полезного действия (КПД), экологичность, возобновляемость и т.д. Современные атомные электростанции при должном поддержании безопасности являются экологичным, а, в перспективе, при создании замкнутого топливного цикла и возобновляемым источником электроэнергии. Однако показатель КПД для АЭС остается низким по сравнению с современными ТЭС. Увеличить КПД позволит повышение начальных термодинамических параметров ядерных энергетических установок [1].

Предварительные оценки показывают, что повышение давления до 25 МПа и температуры теплоносителя на выходе из реактора до 540°C позволяет повысить

КПД установок (до 45%) и снизить экологическое воздействие путем уменьшения потерь тепла в термодинамическом цикле от 67 (ВВЭР-1000) до 55% (ВВЭР СКД) [2–6].

Одним из наиболее перспективных типов ЯЭУ, выбранных в рамках международного проекта «Генерация IV», является АЭС с легководным реактором на сверхкритических параметрах теплоносителя (SCWR). Разработки перспективных водоохлаждаемых реакторов четвертого поколения на воде сверхкритических параметров проводятся в Европе, США, Канаде, Японии, Южной Корее [2, 7–9].

В России переход на сверхкритические параметры в водоохлаждаемых реакторах рассматривается как естественное продолжение разработок ВВЭР. В настоящее время проводятся оценки физических и теплогидравлических характеристик реактора ВВЭР-СКД [2, 10 – 15].

Рассматриваются два варианта компоновки активной зоны с рабочим давлением теплоносителя – 25 МПа, выходной температурой теплоносителя от 500 до 550°C:

- с тепловым спектром нейтронов для работы в открытом топливном цикле; в качестве топлива предполагается использовать  $UO_2$ ;
- с быстрым спектром нейтронов для работы в замкнутом топливном цикле с рециклом всех актинидов. В этом случае предполагается централизованное размещение завода по переработке топлива.

В большинстве проектов АЭС с реакторами, охлаждаемыми водой сверхкритических параметров, в качестве основного варианта рассматривается одноконтурная установка с подачей пара из реактора на турбину и с промежуточным перегревом пара после первой ступени цилиндра высокого давления турбины. В этом случае, кроме достижения сравнительно высокого КПД, существенно снижаются капитальные затраты, сокращается число единиц оборудования, уменьшаются размеры защитной оболочки. Предполагается максимальное использование заводской технологии изготовления оборудования и применение освоенных промышленностью турбин, корпусов реакторов, теплообменного оборудования, что положительно влияет на экономические характеристики и надежность установок. Успешный опыт эксплуатации энергоблоков сверхкритического давления на органическом топливе на протяжении последних 40–50-ти лет позволяет в значительной мере использовать освоенное оборудование и отработанные технологии, в том числе

- турбоустановки СКД мощностью от 850 до 1200 МВт;
- материалы контура циркуляции и основного теплотехнического оборудования.

### **ЗАРУБЕЖНЫЕ РАЗРАБОТКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ АЭС, РАБОТАЮЩИХ НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ВОДЫ**

Впервые разработку концептуального проекта реактора, охлаждаемого водой сверхкритических параметров, в основу которого был заложен кипящий реактор, начали в университете в Токио в 1989 г. [16]. Были предложены два варианта реактора: на тепловых (SCLWR-H) и на быстрых нейтронах (SCFR-H). Основное различие этих двух реакторов заключалось в присутствии замедлителя в активной зоне теплового реактора. Топливная сборка на тот момент представляла собой гексагональную упаковку, состоящую из твэлов и водяных элементов (каналов), служащих замедлителем нейтронов. Впоследствии исследователи пришли к квадратной упаковке твэлов для реактора на тепловых нейтронах. В проведенных расчетах проекта АЭС мощностью 1570 МВт (эл.) достигался КПД 44%. Однако расчеты, представленные в [17], показали превышение максимально допустимой температуры

оболочки твэла (620°C) в так называемых горячих ячейках на 82,9°C (702,9°C). Не допустить превышения максимальной температуры оболочки твэла можно двумя способами: увеличить массовую скорость течения теплоносителя в каналах путем уменьшения относительного шага расположения твэлов либо снизить подогрев теплоносителя в активной зоне посредством увеличения расхода теплоносителя. В Токийском университете выбрали первый вариант, в Корее – второй. В обоих проектах температура пара на выходе из активной зоны реактора составляет 510°C.

**Корея** предлагает свой проект одноконтурной установки SCWR с внутренней рециркуляцией потока теплоносителя. Расход теплоносителя через активную зону более чем в три раза превышает референтный, однако прирост расхода питательной воды отличается менее чем на 40%.

В термодинамический цикл установки SCWR заложены характеристики усовершенствованного кипящего реактора (ABWR), разработанного «Дженерал Электрик», и энергоблока СКД тепловой станции на органическом топливе [18] с двухступенчатым промежуточным перегревом пара и восьмиступенчатой системой подогрева питательной воды. КПД такой установки составляет 43,68 %, что несколько ниже референтного значения (44 %), но, по мнению разработчиков, является приемлемым.

В **Японии** при разработке АЭС на сверхкритических параметрах воды учитывался опыт, накопленный при эксплуатации энергоблоков СКД в тепловой энергетике, и опыт освоения атомных станций с реакторами PWR и BWR. Авторы, по возможности, пытались упростить конструкцию энергоблока. Основной принцип – максимальное использование существующих оборудования, технологий и стандартов. Корпус реактора подобен используемому в PWR. Теплоноситель сверхкритических параметров подается в реактор насосами, подобными насосам BWR. Отпадает необходимость в рециркуляционных насосах, не нужны системы сепарации пара. Внутренняя поверхность корпуса реактора охлаждается питательной водой (280°C). Тракт холодной питательной воды является одновременно и защитной оболочкой от радиации. Турбина состоит из одного цилиндра высокого давления (HP-T), одного цилиндра среднего давления (IP-T) и двух цилиндров низкого давления (LP-T). Тепловая схема турбины состоит из восьми ступеней регенеративного подогрева воды, включая деаэратор. Предусмотрен двухступенчатый перегрев пара. Пар после цилиндра среднего давления выводится в промежуточный сепаратор влаги и вторичный пароперегреватель (MSH). Вторичный перегрев пара осуществляется на первой ступени за счет пара отбора цилиндра среднего давления, а затем за счет пара после цилиндра высокого давления. КПД блока составляет 42%. Проектная электрическая мощность установки – 950 МВт. Одноконтурная схема циркуляции.

В Массачусетском технологическом институте (**США**) разработан проект одноконтурной SCWR [19]. Паротурбинный цикл блока схож с паротурбинным циклом тепловой станции, работающей на органическом топливе и охлаждаемой водой сверхкритических параметров. Одним из условий проекта было максимальное использование имеющегося на сегодня оборудования.

В схеме используются одновальный турбогенератор; по одному цилиндру высокого и промежуточного давления, три цилиндра низкого давления; между цилиндрами высокого (промежуточного) давления расположен регенеративный сепаратор-пароперегреватель; восемь регенеративных подогревателей питательной воды (три подогревателя высокого давления, деаэратор и четыре подогревателя низкого давления) доводят температуру питательной воды до 280°C. Проектная выработка электроэнергии – 1600 МВт, КПД станции – 44,8 %.

В Канаде на базе существующего промышленного энергоблока CANDU ведутся проработки новой двухконтурной реакторной установки на сверхкритические параметры воды с вторичным перегревом пар в активной зоне реактора – Ultra-CANDU+ [20, 21]. В цикле предлагается использовать существующие в Канаде турбины на сверхкритические параметры воды с двойным перегревом пара, которые служат для выработки электроэнергии на тепловых электростанциях, КПД которых доходит до 55%. Острый пар, поступающий из реактора на турбину, после прохождения цилиндра высокого давления вновь подается в реактор для вторичного перегрева, но уже при существенно более низком давлении 7 МПа и температуре 350°C. При этом давлении и температуре 700°C перегретый пар поступает в цилиндр среднего давления турбины. Для организации такого тракта предусматривается иное выполнение и активной зоны, и тепловыделяющих элементов (подробности можно найти, например, в [21]). Выполненные расчеты показывают, что применение вторичного перегрева позволит увеличить КПД энергоблока до 48% и более.

Предварительные расчетные параметры блока: тепловая мощность – 2540 МВт, электрическая – 1220 МВт, КПД – 48% [22]. На вход в реактор подается питательная вода при 350 °С, температура острого пара на выходе из реактора – 625 °С. В качестве замедлителя используется тяжелая вода, теплоносителем является легкая вода. Данную схему можно использовать как для выработки электроэнергии, так и для теплофикационных целей, а также для получения водорода [22].

### **ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ВВЭР-СКД**

В ГНЦ РФ-ФЭИ разработана термодинамическая схема для реактора со сверхкритическими параметрами воды. При этом ориентировались на существующие турбины СКД, освоенные в тепловой энергетике, с учетом их модификации для использования с ядерным реактором корпусного типа.

Для реакторной установки ВВЭР-СКД мощностью 1600 МВт предложены две турбины К-800-240 с начальными параметрами пара давлением  $P = 24,5$  МПа и температурой  $t = 540$ – $560$ °С.

Одним из отличий термодинамического цикла АЭС с реактором СКП от цикла ТЭС является способ организации промежуточного перегрева. В схеме ТЭС промежуточный перегрев осуществляется подачей всего потока выхлопа цилиндра высокого давления (ЦВД) турбины в трубную систему котла, которая предназначена для перегрева пара. В схеме АЭС необходим теплообменник (сепаратор-пароперегреватель) для перегрева выхлопа одного из цилиндров турбины и повышения КПД установки.

Сепаратор-перегреватель (СПП) представляет собой поверхностный теплообменный аппарат. Греющим паром пароперегревателя является свежий пар, поступающий из главного парового коллектора через регулирующий клапан СПП. Перегрев свежим паром снижает термический КПД цикла. Положительное влияние такого перегрева пара сказывается на существенном понижении потерь от влажности в последующих ступенях турбины, на повышении внутреннего относительно КПД и надежности турбины. На рисунке 1 показана принципиальная тепловая схема для реактора на СКП, разработанная авторами, с указанием параметров цикла.

При оценке параметров СПП были определены его конструктивные характеристики с учетом особенностей работы на СКП воды.

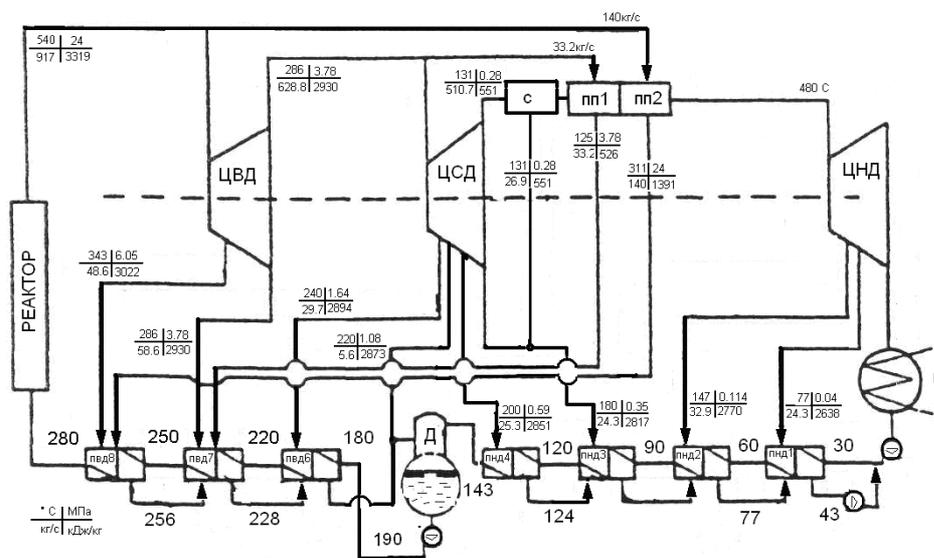


Рис. 1. Тепловая схема реакторной установки на сверхкритических параметрах воды

С целью оптимизации термодинамического цикла были рассмотрены варианты организации промперегрева после цилиндров высокого и среднего давления. Установлено, что поверхность теплообмена, следовательно, и металлоемкость при расположении промперегрева после ЦВД меньше на 20%, чем при расположении его после ЦСД. При этом КПД у второго варианта компоновки выше на ~3%. К тому же влажность на последних ступенях турбины выше у первого варианта. Таким образом, можно уменьшить металлоемкость СПП без существенного снижения КПД, однако при этом из-за имеющейся влажности на последних ступенях турбины необходимо применять лопатки, изготовленные из более дорогих сплавов, что экономически неоправданно.

Также рассматривалась возможность включения одноступенчатого СПП, разработанного на машиностроительном заводе «ЗиО-Подольск», вместо двухступенчатого. Оценивалась эффективность размещения его в схеме с учетом влияния на КПД и надежность турбоустановки. Получено, что при этом на перегрев затрачивается большее количество острого пара, тем самым расход на собственные нужды увеличивается и КПД снижается.

Таким образом, наиболее оптимальной представляется схема, показанная на рис. 1, с двухступенчатым СПП после ЦСД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ термодинамических циклов АЭС с реакторами на СКП позволил обобщить решения, принятые специалистами разных стран.

1. Предполагается максимальное использование заводской технологии изготовления оборудования и применение освоенных промышленностью турбин, корпусов реакторов, теплообменного оборудования, что положительно влияет на экономические характеристики и надежность установок. Успешный опыт эксплуатации энергоблоков сверхкритического давления на органическом топливе, на протяжении последних 40–50-ти лет позволяет использовать

- турбоустановки СКД мощностью от 850 до 1200 МВт;
- материалы контура циркуляции и основного теплотехнического оборудования.

2. Во всех проектах давление острого пара равно или близко к 25 МПа.
3. Температура острого пара варьируется от 500 (США) до 625°C (Канада). Температура питательной воды изменяется от 280 до 350°C. Коэффициент полезного действия энергоустановки в проектах составляет  $\sim 44 \pm 1\%$  и только в канадском проекте (Ultra-CANDU<sup>+</sup>) он достигает 48%, где отмечается высокое, по сравнению с другими проектами, значение температуры острого пара (625°C). Изменение температуры острого пара на выходе из реакторной установки в пределах 50°C не приводит к росту КПД. Чем выше температура пара на входе в часть низкого давления турбины, тем больше КПД установки.
4. В тех случаях, когда на выходе из реакторной установки температура острого пара не превышает 510°C, для увеличения КПД необходимо устанавливать сепараторы-пароперегреватели. И только при температуре острого пара свыше 550°C отпадает необходимость в сепарации пара.
5. Оптимизация схемы показывает, что при компоновке с перегревом пара после цилиндра среднего давления (ЦСД) реализуются наиболее эффективные параметры цикла. Однако при этом возрастает металлоемкость СПП по сравнению с вариантом компоновки промперегрева после ЦВД.
6. Использование одноступенчатого СПП не оказывает негативного влияния на металлоемкость, но при этом возрастает потребность в остром паре для промперегрева, тем самым увеличивая потери на собственные нужды по сравнению с двухступенчатым СПП.

### Литература

1. Семченков Ю.М., Духовенский А.А., Прошин А.А. и др. Проблемы и перспективы легководных реакторов нового поколения со сверхкритическим давлением/Труды отраслевого научно-технического семинара «Реакторы на сверхкритических параметрах воды» (Обнинск, 6-7 сентября 2007 г.). – С. 48 – 61 (CD).
2. Кириллов П.Л. Сверхкритические параметры – будущее реакторов с водным теплоносителем и АЭС/Обзор//Атомная техника за рубежом. – 2001. – № 6. – С. 3-8.
3. Алещенков П.И. и др. Энергетические блоки с ядерными реакторами на докритических и сверхкритических параметрах/В сборнике «Опыт эксплуатации АЭС и пути развития атомной энергетики». – Обнинск: ФЭИ, 1974. – С. 99-100.
4. Баранаев Ю.Д., Кириллов П.Л., Поплавский В.М., Шарапов В.Н. Ядерные реакторы на воде сверхкритического давления//Атомная энергия. – 2004. – Т. 94. – Вып. 5. – С. 374-380.
5. Долгов В.В. Энергоблоки на основе ВВЭР с закритическими параметрами теплоносителя//Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. Вып. 4. – С. 277-280.
6. Драгунов Ю.Г., Рыжков С.Б., Никитенко М.П. и др. Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами (ВВЭР-СКД) – перспективные реакторы 4-го поколения/Труды отраслевого научно-технического семинара «Реакторы на сверхкритических параметрах воды» (Обнинск, 6-7 сентября 2007 г.). – С. 16 – 26. (CD).
7. McCreery G.E., Condie K.D., McEligot D.M., Buongiorno J. A supercritical water loop for heat transfer of Generation-IV supercritical light water reactors/In Proc. of the Int. Conf. on Global environment and Advanced Nuclear Power Plants (GENES4/ANP2003) (Kyoto, Japan, 2003). – Paper 1010 (CD).
8. Oka Y. and Koshizuka S. Design concept of once-through cycle supercritical pressure light water cooled reactors/In Proc. of the First Intern. Symp. on Supercritical Water-Cooled Reactors (SCR-2000) (Tokyo, Japan, 2000). – Paper 101 (CD).
9. Duffey R.B., Hopwood J., Khartabil H., Pioro I. The future of nuclear: SCWR Generation IV high performance channels/In Proc. of the 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-11) (Tokyo, Japan, 2003). – Paper ICONE-36222 (CD).
10. A technology Roadmap for Generation IV nuclear energy systems// Generation IV International Forum, GIF-002-00, December 2002, [http://nuclear.inl.gov/gen4/docs/gen\\_iv\\_roadmap.pdf](http://nuclear.inl.gov/gen4/docs/gen_iv_roadmap.pdf).
11. Generation IV nuclear energy systems ten-year program plan/Prepared for the U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy under DOE Idaho Operations Office Contract DE-AC07-05ID14517,

- March 2005. – <http://nuclear.inl.gov/deliverables/docs/gen-iv-10-yr-program-plan.pdf>.
12. Пономарев-Степной Н.Н., Филиппов Г.А. и др. Перспективы применения микротвэлов в ВВЭР // Атомная энергия. – 1999. – Т. 86. – Вып. 6.
13. Грабежная В.А., Кириллов П.Л. Теплообмен при сверхкритических давлениях и границы ухудшения теплообмена // Теплоэнергетика. – 2006. – № 4. – С. 46-51.
14. Филиппов Г.А., Кухаркин Н.Е., Гришанин Е. И. и др. Перспективы создания прямоточного корпусного реактора с перегревом пара // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – Вып. 3. – С. 197-204.
15. Драгунов Ю.Г., Махин В.М. и др. Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами (ВВЭР СКД) – перспективные реакторы 4-го поколения / Доклад на V Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: ОКБ ГИДРОПРЕСС, 2007.
16. Oka Y. and Koshizuka S. Concept and design of a super-pressure, direct cycle light water reactor // Nucl. Tech. – 1993. – V. 103. – P. 295-302.
17. Kang H. and Bae Y. Conceptual design of a supercritical water-cooled reactor with an internal recirculation flow / In Proc. of the Int. Conf. On Global Environment and Advanced Nuclear Power Plant (GENES4/ANP2003), 2003, Kyoto, Japan. – Paper 1023 (CD).
18. Shioiri A., Moriya K., Oka Y. et al. Development of supercritical-water cooled power reactor conducted by a Japanese join team / In Proc. of the Int. Conf. On Global Environment and Advanced Nuclear Power Plant (GENES4/ANP2003), 2003, Kyoto, Japan. – Paper 1121 (CD).
19. Middleton B.D. and Buongiorno J. Supercritical Water Reactor Cycle for Medium Power Applications. – MIT-ANP-TR-110. – 2006 (June).
20. Duffey R., Pioro I. and Kirillov P. Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactors (SCWRs): Review and Status / Труды отраслевого научно-технического семинара «Реакторы на сверхкритических параметрах воды» (Обнинск, 6-7 сентября 2007 г.). (CD).
21. Duffey R., Kuran S. and Pioro I. Designing high efficiency reactors using ultra-supercritical technology / In Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Symposium on SCRW – Design and Technology (SCWR2007), 2007, Shanghai, China. – Paper No. SCWR2007-1002 (CD).
22. Brady D., Duffey R., Khartabil H. et al. Generation IV reactor development in Canada / In Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Symposium on SCRW – Design and Technology (SCWR2007) (Shanghai, China, 2007). – Paper No. SCWR2007-P057 (CD).

Поступила в редакцию 16.08.2012

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ АВАРИЮ «МЕЖКОНТУРНАЯ НЕПЛОТНОСТЬ ПГ» В РУ С ТЯЖЕЛЫМИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

**А.В. Безносков, Т.А. Бокова, О.О. Новожилова, А.К. Матюнин,  
В.Л. Химич, С.Н. Пичков**

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



Представлены результаты анализа экспериментов и расчетно-теоретических исследований процессов, сопровождающих потенциально опасную аварийную ситуацию «межконтурная неплотность парогенератора (ПГ)» в реакторных установках со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Приведены результаты исследований процессов при возникновении микротечей, эксплуатационно-допустимой и большой течей рабочего тела в реакторный контур, рекомендации по действиям эксплуатационного персонала при подобных авариях. Представлен обзор экспериментальных исследований, выполненных в НГТУ, по структуре и характеристикам двухкомпонентных потоков при различных расходах рабочего тела в поток свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей при их температуре до 600°C, скоростях потока от 0,1 до 5,0 м/с, содержании «легкой» фазы от 1–3 до 50% объемных.

**Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, парогенератор, межконтурная неплотность ПГ, течь, отверстие истечения, струйное истечение, пузырьковое истечение, экспериментальные исследования.

**Key words:** fast reactor, steam generator, intercontour leak of a steam generator, leak, holes outflow, jet flow, bubble flow, experimental studies.

## ВВЕДЕНИЕ

В реакторных контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем авария «межконтурная неплотность парогенератора» является одной из наиболее потенциально опасных. По мнению специалистов, последствия такой аварии привели к разрушению активной зоны одного из реакторов отечественной АПЛ проекта 645 и вывода ее из эксплуатации. Подобная авария произошла на одной из отечественных серийных АПЛ проекта 705.

© *А.В. Безносков, Т.А. Бокова, О.О. Новожилова, А.К. Матюнин, В.Л. Химич, С.Н. Пичков, 2012*

При возникновении такой аварии должно быть исключено поступление воды и ограничено поступление водяного пара с потоком свинцового или свинцово-висмутного теплоносителя в активную зону реактора на быстрых нейтронах во избежание неуправляемого увеличения реактивности и мощности реактора. В проектах установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) в парогенераторах контура рабочего тела рабочее давление составляет от 40 до 160 – 240 кгс/см<sup>2</sup> при давлении в реакторном контуре, незначительно превышающем 1,0 кгс/см<sup>2</sup> (ата). При аварийном поступлении воды и (или) пара в реакторный контур должна быть исключена его переопрессовка во избежание разрушения его элементов, либо реакторный контур должен выдерживать давление рабочего тела, что технически сложно и дорого.

Менее опасно потенциальное влияние других процессов, сопровождающих рассматриваемую аварию, на потребительские качества реакторного контура (рис. 1).

Признаками аварии «межконтурная неплотность ПГ» в зависимости от схемных и конструктивных решений реакторного контура могут быть появление и накопление в конденсаторах пара, другом оборудовании и трубопроводах системы газа; колебание и возрастание свободного уровня ТЖМТ в оборудовании контура (в реакторном блоке); увеличение радиоактивности (гамма-активности и др.) в системе газа за счет выхода радиоактивных примесей из теплоносителя и с поверхностей контура в паровые пузыри, которые затем сепарируются на свободных поверхностях теплоносителя и выходят в объем системы газа; пульсация реактивности и потока нейтронов в активной зоне реактора (по показаниям ионизационных камер), особенно при изменении давления в активной зоне (при изменении числа оборотов главных циркуляционных насосов или давления газа в системе).

С точки зрения контроля за наступлением рассматриваемой аварии и алгоритма действий персонала и систем автоматики целесообразно выделить следующие ситуации.

- Микротечь ПГ, при которой отсутствует заметное возрастание давления в системе газа и возрастание свободного уровня в соответствующем оборудовании контура. В этом случае возможны возрастание и последующая стабилизация влагосодержания в газе системы газа, а также длительный, малозаметный процесс накопления конденсата воды в конденсаторах пара или другом оборудовании системы газа. Особенностью такой аварии является практическая невозможность обнаружения течи и глушения места неплотности, т.к. при осушении соответствующей секции ПГ и снижении в ней температуры возможно «закрытие» отверстия истечения. При данной аварии будет происходить увеличение окислительного потенциала теплоносителя, что способствует доформированию защитных оксидных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура. Каких-либо оперативных действий по уменьшению мощности реакторной установки или ее вывода из действий не требуется.

- Эксплуатационно-допустимая течь ПГ, при которой фиксируются эксплуатационно-допустимые возрастания давления в системе газа и свободного уровня ТЖМТ в соответствующем оборудовании контура. Основным признаком такой аварии является постоянная конденсация пара в конденсаторах пара и другом оборудовании системы газа. За счет диссоциации молекул воды в ТЖМТ будет происходить увеличение окислительного потенциала теплоносителя, что способствует доформированию защитных оксидных покрытий на конструкционных материалах контура. При увеличении окислительного потенциала теплоносителя в «холодных» зонах контура возможно образование твердой фазы оксидов теплоносителя, по-

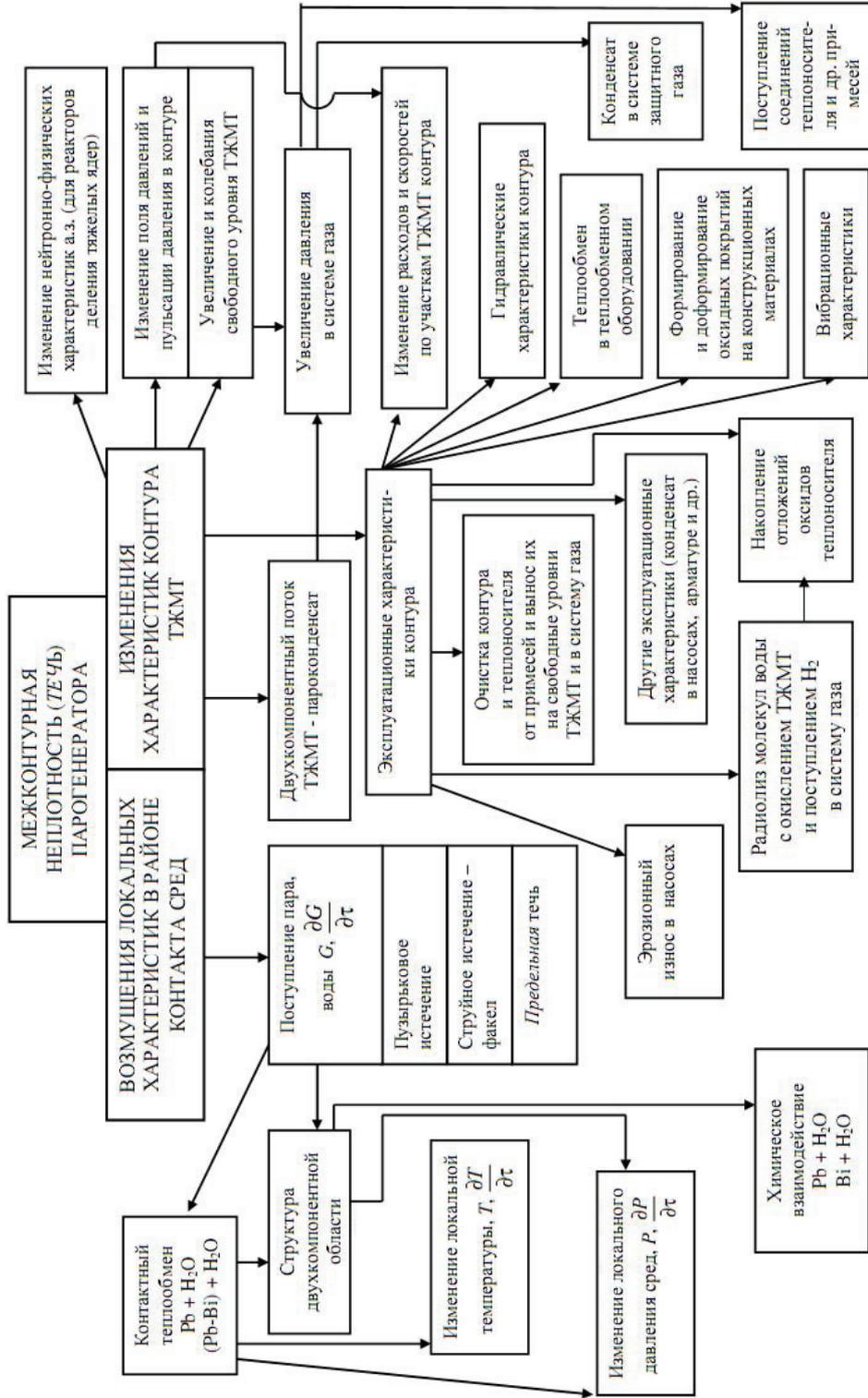


Рис. 1. Блок-схема процессов при течи ПГ

тому в последующем потребуется проведение очистки контура путем обработки его двухкомпонентными восстановительными газовыми смесями. При этом нет необходимости в немедленном прекращении работы контура, т.к. для ПГ с ТЖМТ не характерно самопроизвольное развитие течи парогенератора в отличие от ПГ с натриевым теплоносителем.

- Большая течь ПГ, при которой происходит возрастание свободного уровня теплоносителя до эксплуатационно-недопустимых пределов. При достаточно большом количестве рабочего тела, поступающего в реакторный контур, происходит образование сплошного парового канала от места течи до свободного уровня теплоносителя [1]. Такая авария требует немедленного срабатывания аварийной защиты реактора.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЗЫРЬКОВОГО И СТРУЙНОГО (ФАКЕЛЬНОГО) ИСТЕЧЕНИЯ ВОДЫ И ПАРА В ТЖМТ**

В случае пузырькового истечения поступление рабочего тела в объем ТЖМТ осуществляется отдельными пузырьками больших или меньших размеров с тем или иным агрегатным состоянием или сериями пузырей. Проведенные авторами эксперименты показывают, что струйное (факельное) истечение может реализовываться с размерами истечения от сотен микрон до размера, эквивалентного внутреннему диаметру трубки ПГ. В общем случае, в процессе истечения под воздействием возникающих возмущений (бесконечно малых на границе раздела со стороны паровой оболочки и конечных со стороны ТЖМТ) на поверхности струи формируются короткие и длинные (по сравнению с радиусом струи) волны. Амплитуда волн быстро возрастает во времени. Происходит отрыв мелких пузырьков и «распыл» струи за счет возрастания амплитуды коротких волн. Возможен «срыв» и захват капель теплоносителя в паровой объем. При увеличении размера истечения и, соответственно, масштаба струй определяющее влияние на процесс дробления будет оказывать взаимодействие динамического напора струи и рабочего тела с элементами конструкций канала ПГ в районе истечения. Как показывают результаты экспериментов и расчетно-теоретического анализа [1], длина сплошной струи рабочего тела относительно невелика и не превышает средний размер отверстия истечения более чем на два порядка. Образующиеся в результате «распыла» пузыри «легкой» фазы захватываются потоком теплоносителя, формируя двухкомпонентный поток, или всплывают в объем ТЖМТ за счет архимедовых сил.

В НГТУ проведен цикл экспериментальных исследований характеристик отрыва пузырьков и их серий от отверстий истечения, характеристик двухкомпонентного потока ТЖМТ-«легкая» фаза и разрыва пузырей на свободной поверхности свинцового и свинцово-висмутного теплоносителей. В экспериментах в качестве «легкой» фазы использовались водяной пар, пароводяная смесь, конденсат и газы (Ar, N<sub>2</sub>, He и их смеси). Диапазон используемых круглых отверстий истечения составлял от 0,5 до 10,0 мм, плоских щелей (1,0–2,0)×(10–20) мм, перепад давлений на отверстиях истечения от 1,0 до 240 кгс/см<sup>2</sup>, при заглублениях отверстий истечения от свободной поверхности жидкометаллических теплоносителей от 200 до 3500 мм при средних скоростях формирующегося двухкомпонентного потока от 0,0 до 3–5 м/с. Температура теплоносителей варьировалась от 350 до 600°C, «легкой» фазы от 20 до 200–300°C. Контроль за размерами пузырей «легкой» фазы, скоростями их движения в составе двухкомпонентного потока и сериями пузырей осуществлялся электроконтактными времяпролетными (трехэлектродными) датчиками с чувствительностью 0,5–1,0 мм и микротермопреобразователями с

диаметрами чувствительных элементов от 0,3 до 3,0 мм с обработкой сигналов от первичных датчиков на ПК. Варьировались заглубления чувствительных элементов датчиков под свободный уровень ТЖМТ, их ориентация относительно отверстий истечения и положение относительно оси и стенок каналов, ограничивающих двухкомпонентный поток. Процессы разрыва пузырей и «легкой» фазы на свободной поверхности ТЖМТ фиксировались видео- и фотосъемкой. Акустическими датчиками фиксировались моменты образования (истечения и отрыва) одиночных пузырей и их серий, а также последующих разрывов пузырей на свободной поверхности свинца или эвтектики свинцово-висмут в процессе барботажа. Контроль положения и вертикального перемещения – «набухания» и опускания участков свободной поверхности ТЖМТ производился электроконтактными датчиками («свечками»), визуально, а также видео- и фотоаппаратурой.

Примеры информации о размерах скорости всплытия пузырей «легкой» фазы в свинцовом теплоносителе при пузырьковом и струйном истечении представлены на рис. 2 и 3, примеры разрыва пузырей на рис. 4 и 5.

В случае образования межконтурной неплотности ПГ, соответствующей пузырьковому или струйному (факельному) истечению в районе экономайзерного участка, происходит поступление воды через отверстие истечения в реакторный контур. Температура питательной или котловой воды может находиться в диапазоне

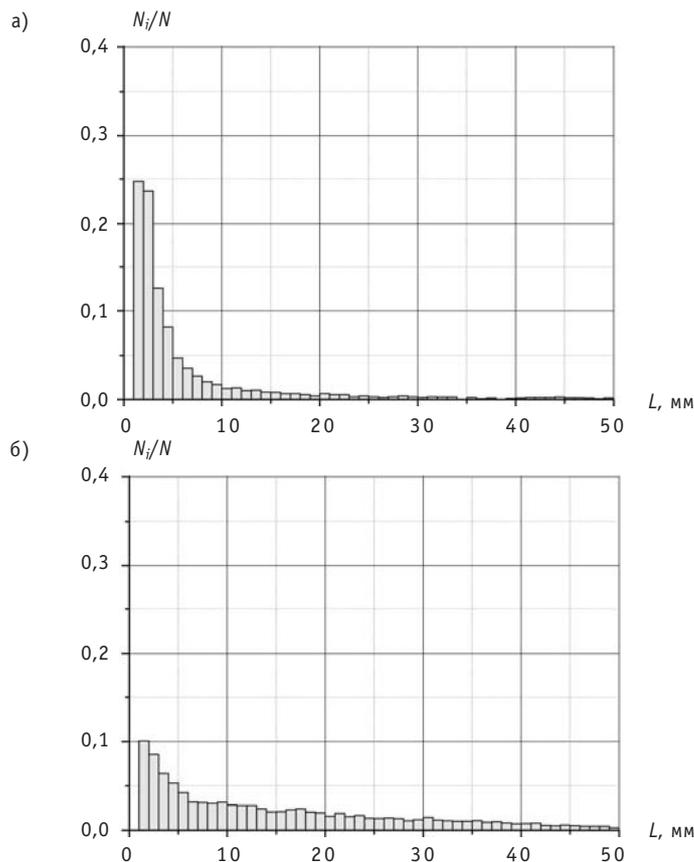


Рис. 2. Гистограмма распределения хорд паровых пузырей, ввод воды, пара через горизонтально ориентированную щель  $0,8 \times 10,0$  мм, заглубленную под уровень свинца на 1900 мм, средняя температура свинца  $460^\circ\text{C}$ , температура воды –  $20^\circ\text{C}$ , средний расход воды –  $2$  кг/ч: а) – заглубление электроконтактного датчика –  $830$  мм; б) – заглубление электроконтактного датчика –  $1740$  мм

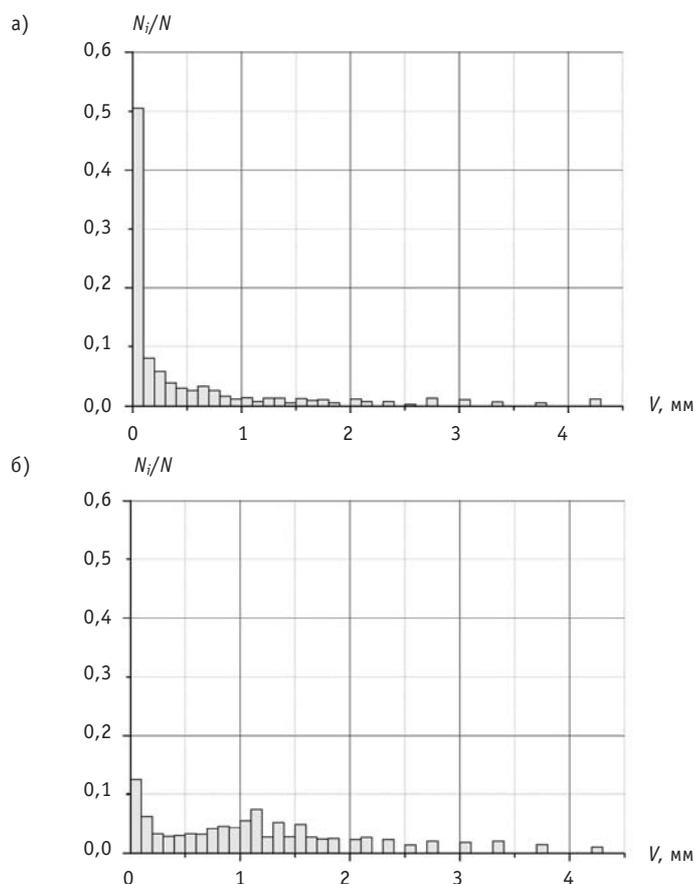


Рис. 3. Гистограмма распределения скорости всплытия паровых (пароводяных) пузырей, ввод воды, пара через горизонтально ориентированную щель  $0,8 \times 10,0$  мм, заглубленную под уровень свинца на 1900 мм, средняя температура свинца  $460^\circ\text{C}$ , температура воды  $- 20^\circ\text{C}$ , средний расход воды - 2 кг/ч: а) – заглубление электроконтактного датчика – 830 мм; б) – заглубление электроконтактного датчика – 1740 мм

от  $100^\circ\text{C}$  до температуры насыщения при давлении в водяной полости вблизи отверстия истечения ( $250\text{--}300^\circ\text{C}$ ). В потоке воды в канале отверстия истечения и непосредственно за ним вследствие резкого увеличения скорости и на два порядка меньшего давления в реакторном контуре давление в истекающей струе будет уменьшаться. Часть воды в объеме этой струи будет испаряться, деформируя и разбивая струю на капли конденсата, окруженные паровой оболочкой переменной толщины. Температура конденсата в капле уменьшается до значения температуры насыщения при давлении в локальном прилежащем объеме ТЖМТ (если она была выше этой величины). В более вероятном случае размер формирующегося пузыря превышает 0,5 мм, и силами поверхностного натяжения, увеличивающими давление внутри пузыря, можно пренебречь. Объемное вскипание капель конденсата будет стремиться дробить капли конденсата и, соответственно, уменьшать размер пузыря. Чем больше перепад давления на отверстии истечения при «факельном» (струйном) истечении, тем мельче будут пузыри в объеме жидкометаллического теплоносителя (при прочих равных условиях).

В результате этих процессов и процесса теплообмена между ТЖМТ и средами (вода, пар) в пузыре в потоке теплоносителя в реакторном контуре вблизи отверстия истечения формируются пузыри с каплей конденсата, окруженной паровой

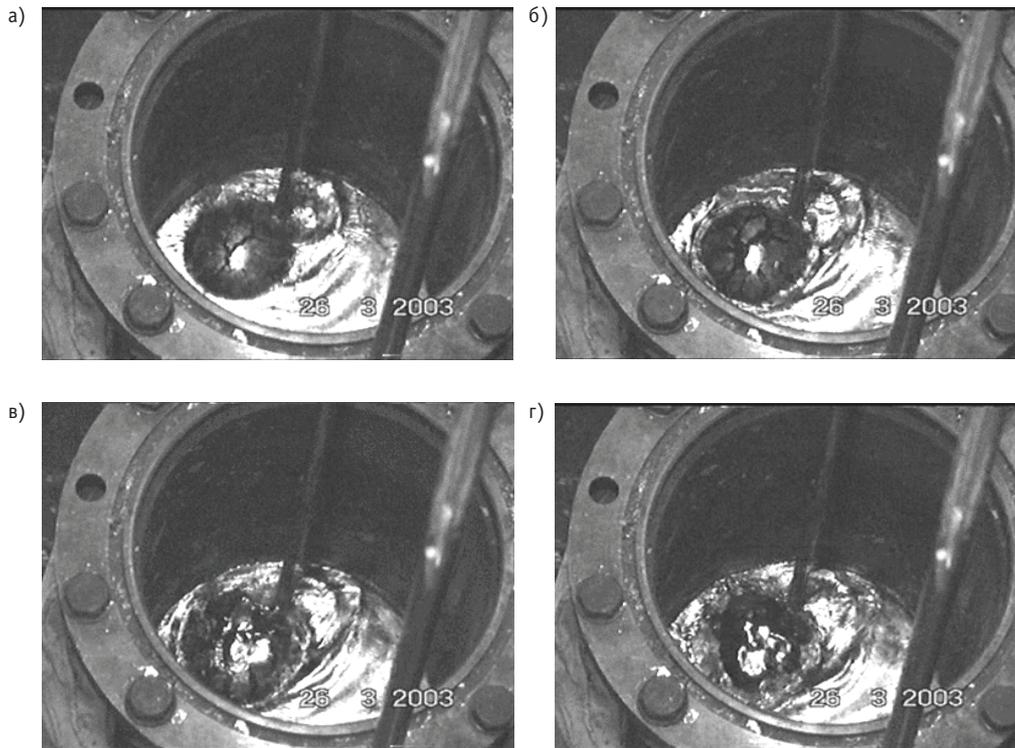


Рис. 4. Последовательные кадры вида свободной поверхности свинца при начале барботаж аргона. Разрыв первого большого пузыря

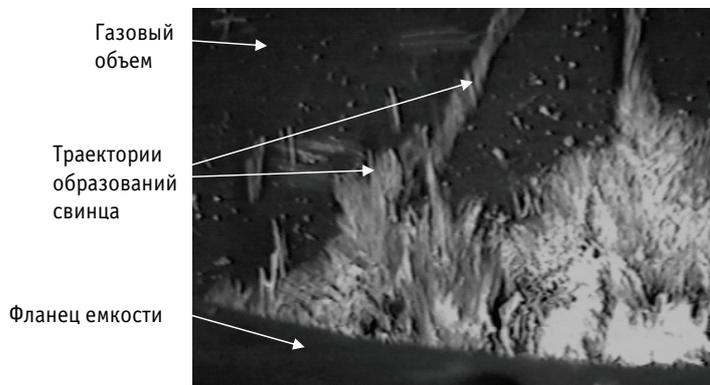


Рис. 5. Фотография газового объема емкости диаметром 350 мм при барботаж аргона через слой свинца толщиной 410 мм. Отверстие истечения – круглое (диаметром 2,0 мм) удельная барботажная нагрузка –  $100 \text{ м}^3/\text{дм}^3$  на  $1 \text{ м}^2$  поверхности свинца

прослойкой. При дальнейшем движении такого пузыря в составе двухкомпонентного потока теплообмен между ТЖМТ, водой и паром, находящемся в объеме пузыря, осуществляется за счет

- конвективной теплоотдачи от ТЖМТ к пару на границе пузыря;
- конвективного переноса тепла в паровой прослойке от внешней поверхности контакта со свинцом до внутренней поверхности с каплей конденсата;
- передачи тепла излучением от поверхности контакта пузыря с паром (вероятно, в значительной мере покрытой примесями) к объему пара в паровой прослойке и к поверхности капли конденсата;

- конвективного теплообмена внутри капли конденсата.

Температура пара в пузыре близка к температуре насыщения при давлении внутри пузыря. После завершения испарения капли конденсата начинается перегрев пара. В процессе испарения и перегрева объем пузыря увеличивается. В момент разрыва пузыря на свободной поверхности ТЖМТ возникают динамические эффекты с волнообразованием, пульсациями давления и вибрациями оборудования контура.

В процессе экспериментов с вводом пара, газа, воды в ТЖМТ при рассматриваемых режимах истечения практически всегда фиксируется пульсирующий характер истечения «легкой» фазы из отверстия истечения – пузыри поступают в объем теплоносителя сериями.

Выполненные в НГТУ расчетно-теоретические и экспериментальные исследования [2, 3] показывают, что исходя из зависимости скорости всплытия от размеров пузырей и расчетной длительности испарения рабочего тела можно определить расстояние, которое могли бы пройти (не сепарируясь) капли рабочего тела до полного испарения (рис. 6).

Проведенные эксперименты показали, что капли воды с начальной температурой 20–110°C размером в несколько миллиметров полностью испаряются, всплывая в свинце с температурой 400–500°C на пути в несколько метров.

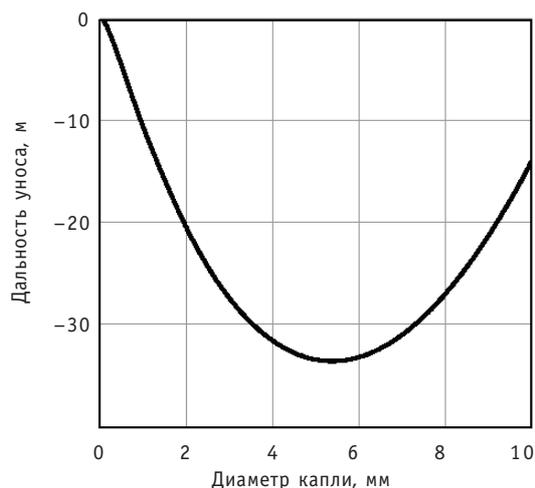


Рис. 6. Дальность уноса пузырей до полного испарения

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТЕЧЕНИЯ С НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ТЖМТ И РАБОЧЕГО ТЕЛА И С ОБРАЗОВАНИЕМ СПЛОШНОГО КАНАЛА ВОДЯНОГО ПАРА ОТ МЕСТА ИСТЕЧЕНИЯ ДО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЖМТ**

Проведенные в НГТУ эксперименты с подачей водяного пара и воды под давлением до 240 кгс/см<sup>2</sup> в «свободный» и затесненный объем свинца с температурой до 600°C с заглублением отверстия истечения диаметром 10 мм под уровень свинца до 3,5 м показали следующее. В кольцевом зазоре между трубкой 14×2 мм и соосной трубкой 54×4 мм, установленной в емкости диаметром ~300 мм, средняя скорость подъема фронта раздела свинца и водяного пара составила около 30 м/с на высоте 1,5 м выше отверстия истечения при расходе пара 20–50 кг/с. Поверхность фронта имела существенную неравномерность по высоте в поперечном

сечении канала. Фиксировались значительные динамические (ударные) нагрузки на элементы конструкции, приводящие к их разрушению. После установки в кольцевой зазор подъемного участка фронта дроссельной решетки с коэффициентом сопротивления  $\sim 10$ , имитирующей сопротивление трубной системы ПГ, скорость подъема фронта снизилась до 4,0–6,0 м/с (при прочих равных условиях), т.е. более чем в пять раз. Динамические (ударные) нагрузки практически исчезли. Вероятно, в месте установки дросселя происходила гомогенизация смеси свинец—рабочее тело, замедление и уменьшение скорости подъема фронта. При подаче пара в кольцевой зазор (наряду с описанным верхним фронтом) фиксировался нижний (опускной) фронт с аналогичными характеристиками.

В процессе исследований с самопроизвольным формированием сплошного парового (газопарового) канала от места истечения до свободной поверхности ТЖМТ варьировались заглубления отверстий истечения до свободной поверхности от 200 до 1500–2000 мм. При этом подача «легкой» фазы производилась в «свободный» объем теплоносителя и в объем, затесненный вертикальными трубками с давлением пара перед отверстием истечения до 80 кгс/см<sup>2</sup>. В начальный момент истечения в процессе образования сплошного парового канала происходил выброс тяжелого жидкометаллического теплоносителя из объема над участком поступления пара в объем над свободным уровнем ТЖМТ. На рисунке 7 представлены последовательные видеок кадры верхней части емкости с трубной системой, одна из труб которой сообщалась с генератором насыщенного пара при давлении 80 кгс/см<sup>2</sup>. Крышка емкости была демонтирована, емкость была накрыта слоем стеклоткани, и свободная поверхность ТЖМТ сообщалась с атмосферой помещения. Перепад давления на отверстии истечения диаметром 1,0 мм составлял около 80 кгс/см<sup>2</sup>, температура свинца  $\sim 450^\circ\text{C}$ . После образования сплошного парового канала процесс стабилизируется. Из емкости выбрасывалась смесь мелкодисперсной фазы свинца в объеме пара. Свинец захватывается со стенок парового канала, дробится на мелкие фракции и транспортируется паровым потоком в виде мелкодисперсной фазы. Остаточных деформаций трубок, расположенных вблизи отверстия истечения, а также каких-либо разрушений элементов дистанционирующих трубок не обнаружено.

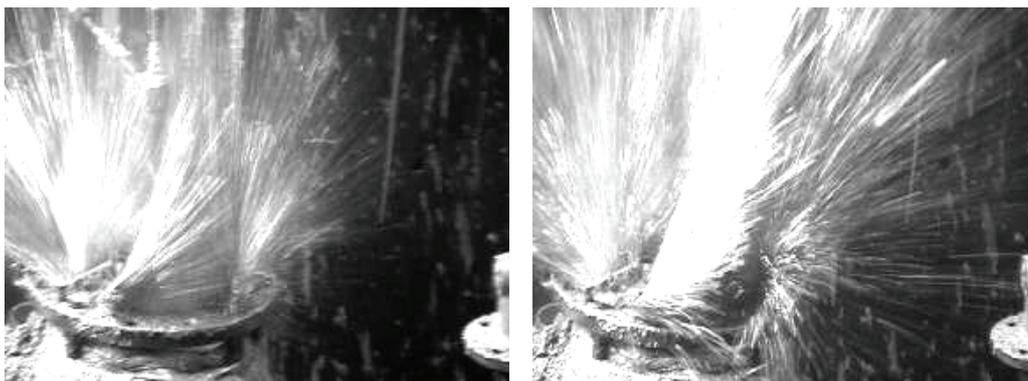


Рис. 7. Два кадра (через 0,08 с) в процессе выброса капель свинца из экспериментальной емкости

По результатам анализа результатов экспериментальных и расчетно-теоретических исследований авторами была предложена конструктивная схема ядерной энергетической установки с ТЖМТ с горизонтальными парогенераторами [3], которая исключает поступление воды и водяного пара в активную зону реактора и переопрессовку реакторного контура при возникновении аварии «межконтурная

неплотность ПГ» при любом возможном расходе истечения рабочего тела в реакторный контур.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Результаты представленных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований рекомендуется использовать при разработке проектной и эксплуатационной документации реакторных установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Для развития данной тематики рекомендуется проведение работ по исследованию напряженно-деформированного состояния моделей труб ПГ при аварии «межконтурная неплотность ПГ». Исследования планируется проводить, контролируя содержание термодинамической активности кислорода в теплоносителе, с применением массообенников различных конструкций.

**Работа проводилась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.**

### **Литература**

1. *Безносков А.В.* Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / *А.В. Безносков, Т.А. Бокова.* – Н.Новгород: Литера, 2012. – 535 с.: ил.
2. *Безносков А.В.* Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих межконтурную неплотность парогенератора со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем, и оптимизация его конструкции / *А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.А. Молодцов* // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 4. – С. 3-18.
3. *Безносков А.В.* Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело / *А.В. Безносков и др.* // Атомная энергия. – 2005. – Вып. 3. – Т. 98. – С. 182-187.

Поступила в редакцию 12.04.2012

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ Pb И Pb-Bi В НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ, ЖИДКИХ И ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

**В.В. Ульянов, В.А. Гулевский, П.Н. Мартынов, А.С. Фомин,**

**В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, С.-А.С. Ниязов**

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



Приведены результаты исследований, доказывающие перспективность применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей Pb и Pb-Bi в новых технологиях получения водяного пара, пресной воды, легких фракций нефтепродуктов, водорода, синтез-газа и других технологических продуктов.

Разработаны и испытаны макетные образцы испарителя и опреснителя воды с прямоконтактным жидкометаллическим подводом тепла. Результаты испытаний показали преимущества разработанных макетных образцов по сравнению с прямоконтактными моделями, разрабатываемыми в Японии.

Изготовлены и испытаны демонстрационные образцы генераторов водорода на основе процессов электрохимического разложения воды и оксидной конверсии газообразных углеводородов в свинцовом теплоносителе. Выявлено, что более предпочтительным для дальнейшей разработки является генератор водорода на основе электрохимического разложения воды.

Обоснована перспективность изучения процессов взаимодействия нефтепродуктов (мазута, кубовых остатков, битуминозных песков и др.) с тяжелыми теплоносителями с точки зрения углубленной переработки нефти и нефтепродуктов.

**Ключевые слова:** прямой контакт, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, опреснитель, генератор водорода, переработка нефтепродуктов.

**Key words:** direct contact, heavy liquid metal coolant, desalination, hydrogen generator, refining petroleum products.

Применение тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) Pb и Pb-Bi в реакторных установках (РУ) обусловлено целым рядом их преимуществ [1, 2]. Они слабо активируются в реакторных условиях, обладают достаточно хорошими ядерно-физическими свойствами, в условиях герметичной РУ практически не могут оказывать токсическое действие на обслуживающий персонал и население прилегающих территорий. Они невзрывоопасны, так как химически слабо актив-

© **В.В. Ульянов, В.А. Гулевский, П.Н. Мартынов, А.С. Фомин, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, С.-А.С. Ниязов, 2012**

ны, при температурах ниже точки кипения не происходит интенсивного парообразования, а давление их насыщенного пара при рабочих температурах очень мало. Pb и Pb-Bi обладают сравнительно низкой теплоемкостью, поэтому при извлечении из реактора вместе с оборудованием (например, при ремонтах) быстро замерзают, что предотвращает загрязнение ими рабочей зоны.

ТЖМТ имеют также физико-химические особенности, которые позволяют рассматривать не только принципиально новые и более эффективные схемы производства тепла и электричества в ЯЭУ, но и варианты получения при непосредственном смешении ТЖМТ с перерабатываемыми средами в контурах ЯЭУ таких ценных технологических продуктов, как водород, синтез-газ, нефтепродукты, пресная вода и водяной пар [3, 4].

Разработки прямоконтактных технологий и устройств, проводимые в ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» можно условно разделить на три направления: получение водяного пара и пресной воды; производство водорода и синтез-газа; повышение глубины переработки нефтепродуктов (мазут, кубовые остатки, битуминозные пески и др.).

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ВОДЯНОГО ПАРА И ПРЕСНОЙ ВОДЫ В ТЖМТ**

В рамках первого направления на сегодняшний день достигнуто следующее:

- спроектированы и изготовлены макетные образцы прямоконтактных испарителя и опреснителя (рис. 1 – фотография работающего макетного образца с «принудительной» циркуляцией теплоносителя);
- разработана методика расчета теплообмена при прямом смешении жидкого металла с водой;
- проведены испытания созданных макетных образцов (температура расплава Pb-Bi, подаваемого в зону испарения воды, от 150 до 450°C, давление в макетных образцах – 1,1–3,0 бар, расход воды через зону испарения изменялся от 0,5 до 8 кг/ч, объем зоны испарения ~ 2,5 л).

Полученные при испытаниях данные показали преимущества испытанных макетных образцов по сравнению с прямоконтактными моделями, разработанными



Рис. 1. Макетный образец прямоконтактного испарителя с «принудительной» циркуляцией теплоносителя

японскими исследователями – основными конкурентами российских разработчиков прямоконтактных систем. Определенные по результатам испытаний значения усредненного объемного коэффициента теплообмена существенно выше, чем в экспериментах, выполненных в частном институте CRIEPI (Токио, Япония), и близки к данным, полученным в Токийском технологическом институте (хотя последние были получены в условиях, более благоприятных для процессов теплообмена, – при высоком давлении в системе – вплоть до 5,0 МПа) [5]. Указанные преимущества достигнуты за счет эффективной конструкции диспергатора пароводяной смеси (цилиндр с вертикальными прорезями в нижней половине) и удачной конструкции макетных образцов. Благодаря этому инжекция воды осуществлялась не только по центру зоны испарения (как это происходило у японских исследователей), а практически во весь объем расплава. Поэтому при проведении испытаний в прямоконтактном теплообмене участвовал больший, чем в японских моделях, объем жидкометаллического теплоносителя.

Выполненный расчет кожухотрубной модели на основании режимных параметров при проведении экспериментов с макетными образцами показал существенное преимущество (уменьшение размеров и повышение эффективности теплообмена) прямоконтактных систем по сравнению с кожухотрубными.

Во всех режимах испытаний макетные образцы работали устойчиво и без «паровых взрывов». Установление и изменение режима работы макетных образцов не вызывало каких-либо затруднений и осложнений.

Дополнительно был сделан анализ примесей свинца и соли в полученном конденсате. Анализ проведен аккредитованным испытательным лабораторным центром г. Обнинска, его результаты приведены в табл. 1. Видно, что содержание свинца и соли в конденсате соответствует нормам ГОСТ по питьевой воде.

Таблица 1

#### Примеси свинца и соли в конденсате

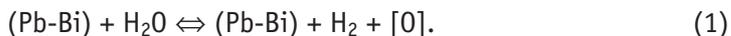
Примесь	Суммарное содержание в пробе, мг/л	Нормы по ГОСТ, мг/л
Свинец	0,012±0,003	≤0,03
Соли	<100	350

Полученные результаты убедительно продемонстрировали преимущества прямоконтактных технологий испарения и опреснения воды, главными из которых являются высокий объемный коэффициент теплообмена при смешении ТЖМТ с водой, простота конструкции и технологичность изготовления аппаратов для их реализации.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА И СИНТЕЗ-ГАЗА В ТЖМТ

В рамках второго направления предлагается создание генераторов водорода и синтез-газа на основе следующих процессов: разложение водяного пара, оксидная конверсия газообразных углеводородов.

При взаимодействии водяного пара с расплавом Pb-Bi ( $t = 400\text{--}1000^\circ\text{C}$ ) протекает реакция



Возможная схема процесса представлена на рис. 2. Для интенсификации процесса получения водорода необходимо постоянно отводить растворенный в расплаве кислород из зоны реакции. Это можно осуществить при помощи специаль-

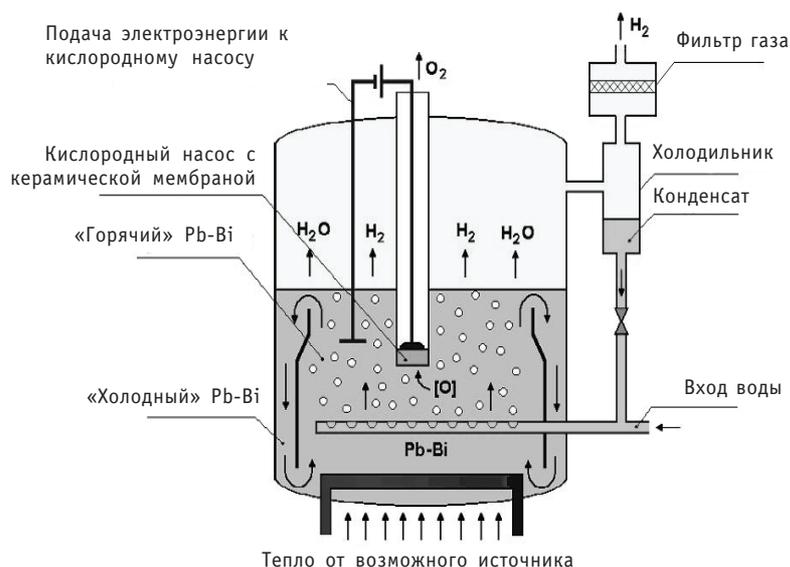


Рис. 2. Производство водорода при электролизе воды

ного кислородного насоса, состоящего из керамики, имеющей ионную проводимость по кислороду. В проводимых исследованиях использовался кислородный насос на основе датчика контроля кислорода, разрабатываемого при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.526.12.6008).

Термодинамический анализ [6] показал, что в реакции (1) теоретически возможно разложение (на водород и кислорода) от 50 до 95 %об. от количества вступающего в реакцию с расплавом Pb-Bi водяного пара.

Для проведения экспериментальных исследований был создан демонстрационный образец (рис. 3) установки для электрохимического разложения воды в Pb-Bi

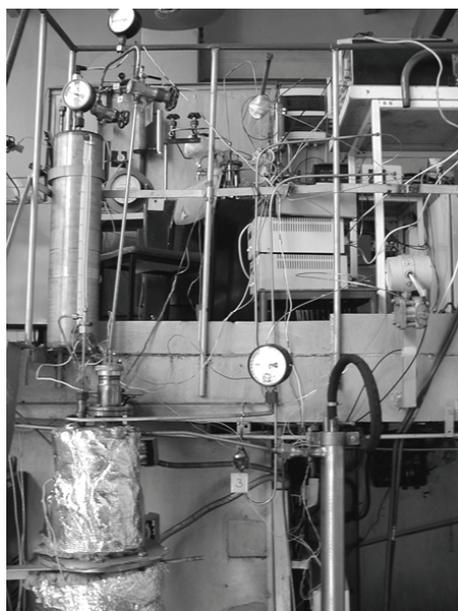


Рис. 3. Демонстрационный образец генератора водорода при электрохимическом разложении воды в Pb-Bi

с производительностью по водороду более 5 л/ч и проведены его испытания.

Условия проведения испытания демонстрационного образца для электрохимического разложения воды в Pb-Vi: температура – от 620 до 830°C; разность потенциалов между внешним и внутренним электродами насоса – от 1,4 до 1,78 В; расход подаваемой в Pb-Vi воды – от 5 до 6 г/ч.

Результаты испытания демонстрационного образца генератора водорода для электрохимического разложения воды в Pb-Vi позволили получить производительность по водороду 7,1 л/ч при температуре 830°C (ожидалась производительность на уровне ~ 5 л/ч).

При оксидной конверсии (рис. 4) углеводородов (при  $t \geq 500^\circ\text{C}$ ) возможна реакция



Оксидная конверсия может протекать при более низких температурах по сравнению с традиционной паровой конверсией. Повышение эффективности конверсии происходит за счет новых, ранее не применяемых процессов: окисление углеводородов оксидами теплоносителя, присутствующими в зоне реакции в растворенном в расплаве виде и (или) в виде твердой фазы.

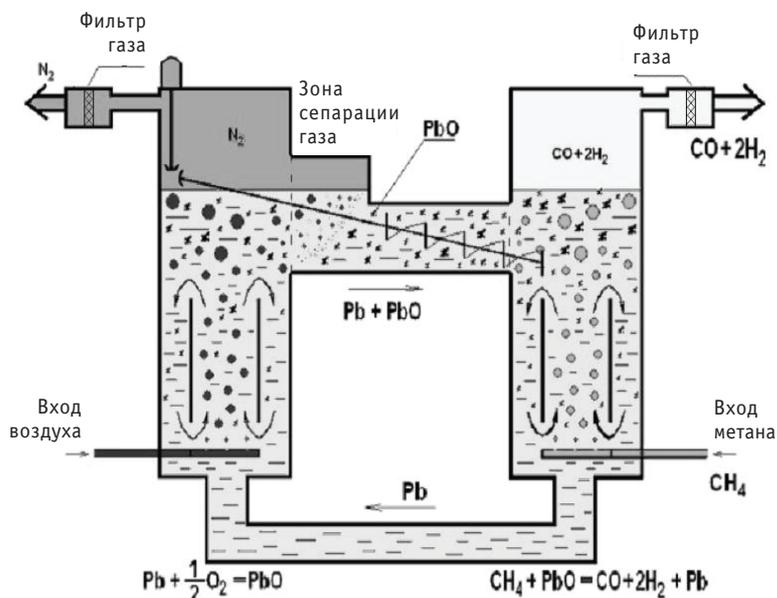


Рис. 4. Производство водорода (сингаза) при взаимодействии метана с оксидами в расплаве Pb или Pb-Vi

Непрерывное получение PbO возможно непосредственно в контуре циркуляции при окислении жидкого металла кислородом воздуха по реакции



При протекании реакции (3) выделяется тепло [2], которого достаточно для обеспечения теплом реакции (2). Таким образом, система для реализации реакций (2) и (3) может не нуждаться в непрерывном подводе тепла.

В ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» создан демонстрационный образец (рис. 5) установки для оксидной конверсии газообразных углеводородов в Pb-Vi с производительностью по водороду более 50 л/ч и проведены его испытания.

Условия проведения испытания демонстрационного образца для конверсии газообразных углеводородов в Pb-Vi: температура – от 500 до 650°C; вид перера-

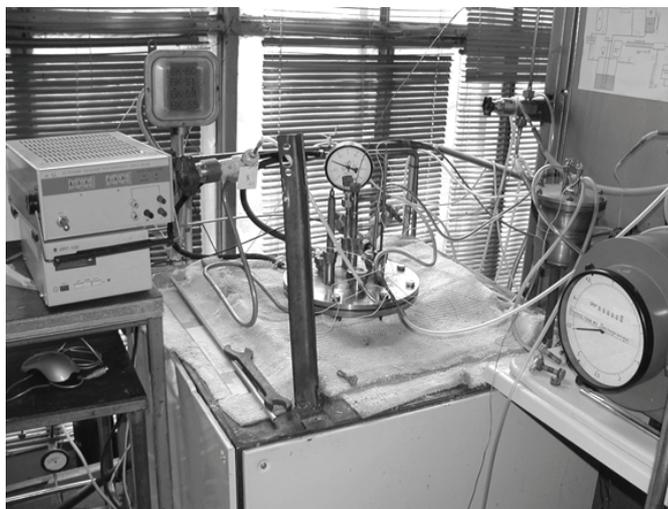


Рис. 5. Демонстрационный образец генератора водорода при оксидной конверсии газообразных углеводородов в Pb-Bi

батываемого углеводорода – метан; катализатор конверсии – никель; оксид, используемый в конверсии, – PbO; расход газов через демонстрационный образец – 150 л/ч.

Результаты испытания демонстрационного образца генератора водорода для конверсии газообразных углеводородов в Pb-Bi позволили получить производительность по водороду 93 л/ч при температуре 600°C (ожидалась производительность на уровне ~50 л/ч).

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований обоих процессов, вследствие чего

- обоснован выбор процесса генерации водорода при электрохимическом разложении воды в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе Pb-Bi как наиболее предпочтительного для использования в дальнейшем в разрабатываемых новых технологии и оборудовании;

- разработаны рекомендации по реализации процесса генерации водорода при электрохимическом разложении воды в теплоносителе Pb-Bi:

- использование методики проведения исследований процессов, протекающих при взаимодействии теплоносителя Pb-Bi с перерабатываемыми средами; конструкции демонстрационных образцов генераторов водорода; конструкции кислородного насоса; смеси порошков графита и меди в качестве высокотемпературного токосъемника, контактирующего с воздухом;

- проведение расчетных и экспериментальных исследований, направленных на обоснование оптимальной циркуляции среды «теплоноситель Pb-Bi – водяной пар»; предотвращения выноса за пределы прямоточного аппарата капель и аэрозолей теплоносителя Pb-Bi и его возврата в технологический цикл; новых перспективных материалов кислородных насосов, имеющих повышенную ионную проводимость.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ТЖМТ**

В рамках третьего направления предлагается повысить глубину переработки нефти и очистку ее от серы при прямоточном жидкометаллическом подводе тепла к перерабатываемому нефтепродукту.

Известно [7], что за последние десять лет производственные мощности отечественных нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) снизились на 53 млн. т за счет вывода из производства наиболее изношенного и устаревшего оборудования. Однако и на оставшихся мощностях российских НПЗ выход светлых нефтепродуктов из тонны нефти существенно ниже, чем на зарубежных предприятиях. На НПЗ России глубина переработки нефти не превышает 68 – 70% против 90% в США и 80% в Европе.

Повысить глубину переработки возможно только за счет внедрения новых технологий, позволяющих более полно извлекать топливные фракции из нефти при ее первичной перегонке, выпускать наиболее ценные нефтепродукты. Увеличение глубины переработки с 65 до 70% обеспечивает экономию более 30 млн. т нефти. Капитальные же вложения при приросте производства нефтепродуктов на одну тонну в 3,5 раза меньше, чем при добыче необходимого дополнительного количества нефти.

Кроме того, нефть, добываемая в России, является высокосернистой (содержание серы около 1,3%). Из-за этого ее стоимость ниже, чем у известной марки Brent. Решение проблемы очистки от серы самой нефти или производимых из нее нефтепродуктов позволит повысить их себестоимость на мировом рынке.

Применение теплообменных аппаратов с жидким металлом при переработке нефти и ее тяжелых фракций, например, мазута, позволит заметно увеличить срок службы нагревательных устройств (теплообменных поверхностей) за счет существенного снижения (вплоть до полной ликвидации) процессов смоло- и коксоотложений, которые приводят к периодическим остановкам аппаратов для выжигания твердых продуктов распада углеводородов.

К настоящему времени проведен первый этап исследований, целью которого являлось исследование физико-химических процессов, протекающих при прямом контакте нефтепродуктов с ТЖМТ, определение принципиальной возможности применения этих процессов для очистки нефтепродуктов от серы и дополнительного извлечения из них легких фракций. При этом выявлено следующее.

- Подтверждена принципиальная возможность прямоконтактной жидкометаллической переработки кубовых остатков для дополнительного извлечения из них легких фракций.
- Взаимодействие расплавов на основе свинца с «тяжелыми» нефтепродуктами (после их обезвоживания) происходит при температурах от 130 до 450°C спокойно (без «паровых» взрывов и гидравлических ударов).
- Выявлены затруднения (снижение расхода очищаемой среды при заданном перепаде давления на фильтре) при проведении режимов фильтрации нефтепродуктов при температурах ниже 200°C. Не исключено, что в дальнейших разработках прямоконтактных технологий переработки нефтепродуктов более предпочтительно будет применение расплава свинца.
- Выявлено интенсивное выделение легких фракций из тяжелых нефтепродуктов (мазута, гудрона – продуктов первичной переработки нефти) при относительно низких (от 350 до 450°C) температурах. Результат подтверждает высокоэффективный теплообмен при прямом контакте фаз, а также позволяет предположить наличие каталитических свойств расплавов Pb-Bi и Pb.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведены расчетные и экспериментальные исследования, результаты которых показывают перспективность применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей Pb-Bi и Pb в новых технологиях получения водяного пара, пресной воды, легких фракций нефтепродуктов, водорода, синтез-газа и других продуктов.

Разработаны, изготовлены и успешно испытаны макетные образцы испарителя и опреснителя воды. Результаты испытаний показали преимущества испытанных макетных образцов по сравнению с прямоконтактными моделями, разрабатываемыми в Японии.

Изготовлены и испытаны демонстрационные образцы генераторов водорода на основе процессов электрохимического разложения воды и оксидной конверсии газообразных углеводородов в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе. Выявлено, что более предпочтительным для дальнейшей разработки является генератор водорода на основе электрохимического разложения воды.

Проведен первый этап исследований процессов взаимодействия нефтепродуктов (мазута, кубовых остатков, битуминозных песков и др.) с теплоносителем Pb-Bi, показавших принципиальную возможность углубленной переработки нефтепродуктов при прямоконтактном жидкометаллическом подводе тепла.

Необходимо продолжать исследования данного направления науки и техники, чтобы перейти от работ по созданию научно-технического задела к опытно-конструкторским разработкам и созданию опытных образцов новых аппаратов с жидкометаллической греющей средой.

**Настоящие исследования проводятся при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (ГК № 16.526.12.6008).**

### **Литература**

1. Мартынов П.Н., Гулевский В.А., Ульянов В.В. и др. Гидродинамические проблемы технологии ТЖМТ в РУ петлевой и моноблочной конструкции // ВАНТ. Серия «Физика ядерных реакторов». 2008. – Вып. 4. – С. 15-33.
2. Громов Б.Ф., Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Гулевский В.А. Проблемы технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец-висмут, свинец) // Международная конференция «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Т. 1. – Обнинск, 1999. – С. 92-106.
3. Martynov P.N., Gulevich A.V., Orlov Yu.I., Gulevsky V.A. Water and Hydrogen in Heavy Liquid Metal Coolant Technology // Progress in Nuclear Energy. – 2005. – V. 47. – Iss. 1-4. – P. 604-615.
4. Gulevich A.V., Martynov P.N., Gulevsky V.A., Ulyanov V.V. Technologies for hydrogen production based on direct contact of gaseous hydrocarbons and evaporated water with molten Pb and Pb-Bi // Energy Conversion and Management. – 2008. – V. 49. – Iss. 5. – P. 1946-1950.
5. Takahashi M., Uchida Sh., Hata K. et al. Pb-Bi – cooled Direct Contact Boiling Water Small Reactor // Progress in Nuclear Energy. – 2005. – V. 47. – Iss. 1-4. – P. 190-201.
6. Мартынов П.Н., Ульянов В.В., Гулевский В.А. и др. Исследование процессов получения водорода при взаимодействии паров воды и органических газов с жидкометаллическим теплоносителем (Pb, Pb-Bi) ядерной энергетической установки // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. – 2006. – Вып. 10. – С. 138-146.
7. Зайко А. Синтез без анализа // Энергия промышленного роста. 2006. – № 4 [5], <http://www.epr-magazine.ru/prompolitics/maintheme/himprom/>.

Поступила в редакцию 25.09.2012

## СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛИ 15Х2НМФАА И ЕЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ВЫДЕРЖЕК И ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ КОРПУСА РЕАКТОРА

**Б.А. Гурович, Е.А.Кулешова, Д.А.Мальцев, С.В.Федотова, А.С. Фролов,  
О.О.Забусов, М.А.Салтыков**  
*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва*



В работе проведен комплекс микроструктурных исследований (ПЭМ, РЭМ и Оже) материалов образцов-свидетелей корпусов реакторов ВВЭР-1000 в исходном состоянии, после длительных термических выдержек (до 180 тыс. ч) и облучения.

Показано, что в необлучаемых элементах корпуса реактора сдвиг критической температуры хрупкости может быть обусловлен, в основном, развитием обратимой отпускной хрупкости. При этом ее вклад в охрупчивание материала растет с увеличением времени эксплуатации и может стать определяющим при продлении срока службы КР ВВЭР-1000 до 60-ти и более лет. Установлен уровень зернограничных сегрегаций в различных состояниях. Экспериментально показано, что в сталях КР наблюдается радиационно-стимулированная диффузия фосфора к границам зерен.

**Ключевые слова:** стали корпусов реакторов, радиационное охрупчивание, фазовые превращения, зернограничные сегрегации, радиационно-индуцированные преципитаты, радиационные дефекты.

**Key words:** Reactor pressure vessel steels, radiation embrittlement, phase transformations, grain-boundary segregations, radiation-induced precipitates, radiation defects.

Эксплуатация материалов корпусов реакторов (КР) типа ВВЭР в условиях нейтронного облучения и длительного воздействия рабочих температур приводит к деградации их свойств, проявляющейся в увеличении температуры вязко-хрупкого перехода. Проведенные ранее исследования [1, 2] показали, что охрупчивание материалов корпусов КР ВВЭР может быть обусловлено действием как упрочняющих механизмов за счет образования радиационных дефектов и радиационно-индуцированных преципитатов, так и неупрочняющих механизмов за счет развития обратимой отпускной хрупкости. При этом вклад теплового охрупчивания

© *Б.А. Гурович, Е.А.Кулешова, Д.А.Мальцев, С.В.Федотова, А.С. Фролов, О.О.Забусов, М.А.Салтыков, 2012*

становится особенно существенным при длительных временах термических выдержек (до 200 тыс. часов и более), что особенно актуально для материалов КР ВВЭР-1000 из-за повышенного по сравнению с ВВЭР-440 содержания никеля – основного элемента, способствующего развитию сегрегационных процессов. Влияние никеля на охрупчивание материалов КР ВВЭР-1000 заключается и в том, что он входит в состав радиационно-индуцированных преципитатов, приводящих, наряду с радиационными дефектами, к упрочнению материалов под облучением. Таким образом, для анализа работоспособности корпуса и достоверного обоснования продления срока эксплуатации КР ВВЭР-1000 до 60–80-ти лет возникает необходимость исследования процессов, протекающих как при облучении, так и при длительном температурном старении при рабочих температурах КР.

Поскольку темп и величина охрупчивания материалов КР определяются структурными изменениями, происходящими в процессе эксплуатации, в данной работе проведены структурные исследования стали 15Х2НМФАА и ее сварных соединений после длительных термических выдержек и облучения при рабочих температурах.

### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Охрупчивание материалов оценивали по сдвигу температуры ВХП на температурной зависимости ударной вязкости образцов Шарпи с V-образным надрезом.

Фрактографические исследования с целью определения доли хрупкого межзеренного разрушения в изломах образцов Шарпи, коррелирующей с уровнем зернограницных сегрегаций примесей, проводили на стандартных образцах-свидетелях с содержанием никеля 1,0–1,9 мас.% в исходном состоянии, а также после термической выдержки до 200000 часов без облучения. Для оценки влияния длительных выдержек при рабочих температурах на склонность к развитию отпускной хрупкости корпусных сталей были использованы данные, полученные в данной работе, а также обширная база данных по образцам-свидетелям ВВЭР-1000, накопленная в НИЦ «Курчатовский институт» [3]. Поверхности разрушения испытанных на ударный изгиб образцов Шарпи исследовали на рентгеновском микроанализаторе SXR-50 в радиоактивном исполнении (Сатеса, Франция), установленном в защитной камере и растровом электронном микроскопе Supra 40-VP (Zeiss, Германия). Долю участков с различным типом разрушения в общей поверхности излома после испытаний при различных температурах оценивали методом Глаголева [4]. Относительная погрешность определения доли хрупкого (вязкого) разрушения на поверхностях разрушения образцов при фрактографических исследованиях не хуже 10–15%.

Исследования фазового состава проводили методами сканирующей электронной микроскопии с помощью растрового микроскопа SUPRA 40 VP (Zeiss, Германия). Объемную плотность фазовых выделений измеряли методами СЭМ. Для определения типа выделений фаз были проведены дополнительные ТЭМ-исследования с помощью высокоразрешающего микроскопа Titan 300 (FEI, США). Исследование проводили на образцах-свидетелях металла сварного шва (МШ) Калининской АЭС (блок 2) и основном металле (ОМ) Балаковской АЭС, блок 3 в исходном состоянии и в состояниях после длительных термических выдержек при рабочей температуре и облучения.

Химический состав, длительность изотермических выдержек и флюенс исследованных материалов приведены в табл. 1 и 2.

Трансмиссионные электронно-микроскопические исследования, проводили с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Titan 80-300

Таблица 1

**Химический состав исследованных материалов**

Элемент масс, %	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	V	Mo
ОМ Балаковской АЭС (блок 3)	0,14	0,23	0,38	1,91	1,33	0,04	0,016	0,009	0,10	0,54
МШ Калининской АЭС (блок 2)	0,07	0,33	0,81	1,78	1,61	0,06	0,013	0,009	0,03	0,58

Таблица 2

**Состояния исследованных материалов**

Материал	Первая выгрузка	Вторая выгрузка	Третья выгрузка	
МШ Калининской АЭС (блок 2)	–	67 032 ч	136 656 ч	136 656ч + облучение $\Phi=28 \times 10^{22}$ н/м <sup>2</sup>
ОМ Балаковской АЭС (блок 3)	36 048 ч	89 400 ч	136 896 ч	136 896ч + облучение $\Phi=60 \times 10^{22}$ н/м <sup>2</sup>

(FEI, США) при ускоряющем напряжении 300 кВ. При определении плотности радиационных дефектов и преципитатов измеряли толщину образца на исследуемом участке с использованием метода дифракции электронов в сходящемся пучке [5]. При этом относительная погрешность измерений не хуже 10–15%.

Исследования методом оже-электронной спектроскопии (ОЭС) производились с помощью спектрометра PHI 700 (США). Для оценки влияния облучения на концентрацию фосфора на границах зерен было проведено исследование поверхностей разрушения двух МШ корпусов реакторов ВВЭР-1000 с высоким содержанием никеля и характерным для данного типа материалов содержанием фосфора в состояниях после выдержки под действием облучения при рабочей температуре КР (~ 300°C): МШ второго блока Калининской АЭС и МШ первого блока Балаковской АЭС. Химический состав и параметры облучения исследованных материалов представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Параметры облучения и химический состав материалов, исследованных методом ОЭС**

Материал	Состояние	Химический состав, мас. %								
		C	Ni	P	Cu	S	Mn	Si	Cr	Mo
МШ Калининской АЭС (блок 2)	136 656 ч + обл. $\Phi=30 \times 10^{22}$ н/м <sup>2</sup>	0,06	1,64	0,008	0,03	0,008	0,76	0,36	1,72	0,63
МШ Балаковской АЭС (блок 1)	105 936 ч + обл. $\Phi=35 \times 10^{22}$ н/м <sup>2</sup>	0,07	1,88	0,009	0,03	0,010	1,10	0,31	1,72	0,68

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

ТЭМ-исследования показали, что в исследованных образцах-свидетелях ОМ и МШ присутствуют выделения только карбидных и карбонитридных фаз.

Расшифровка микродифракционных картин исследованных фаз в образцах ОМ и МШ в исходном состоянии, после термических выдержек и облучения методами ТЭМ показали, наряду с  $\alpha$ -Fe, наличие следующих фаз (рис. 1, 2).

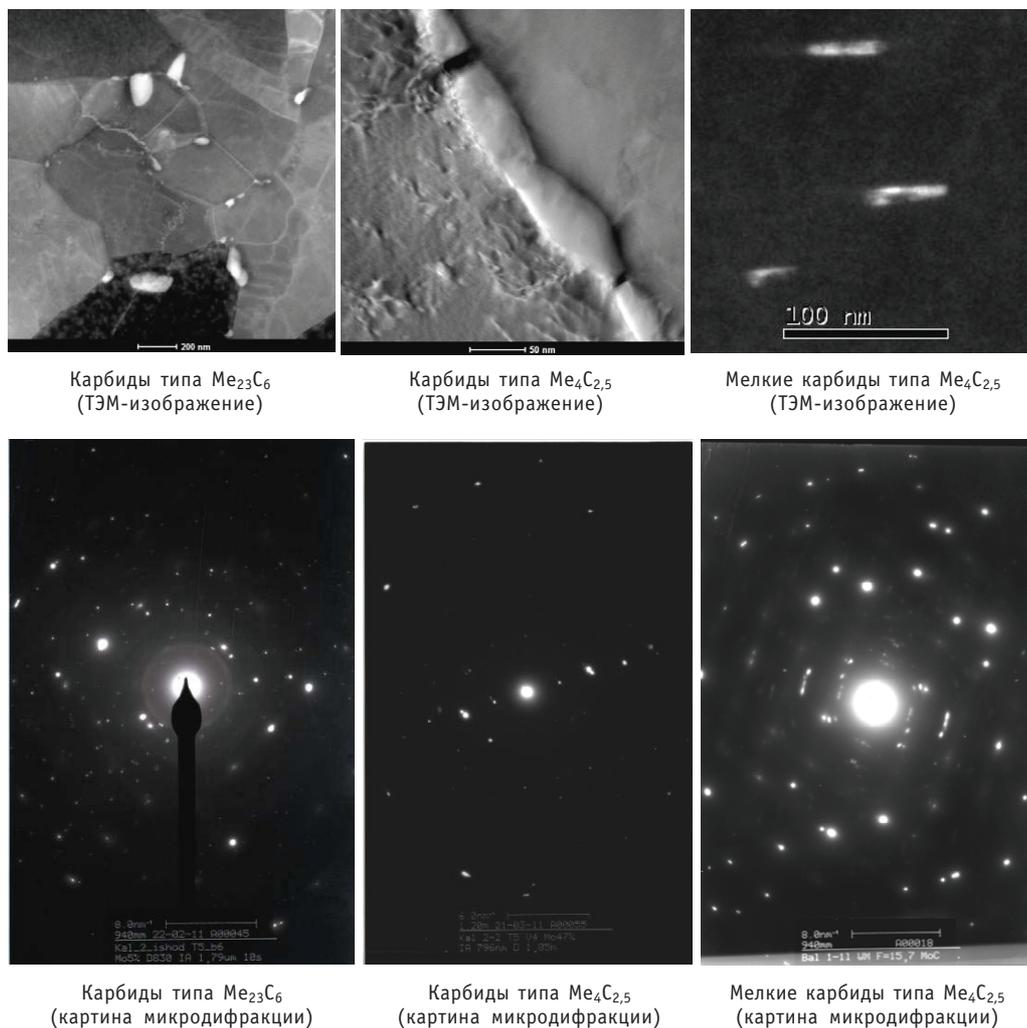


Рис. 1. Карбидные фазы в металле сварного шва стали 15X2NMФАА

В металле сварного шва обнаружены карбиды трех типов.

- $Me_{23}C_6$  на основе хрома, которые имеют состав  $(Cr, Mo)_{23}C_6$  с переменным содержанием молибдена и небольшими добавками железа и марганца, располагаются как в теле зерна, так и по границам зерен и субзерен.

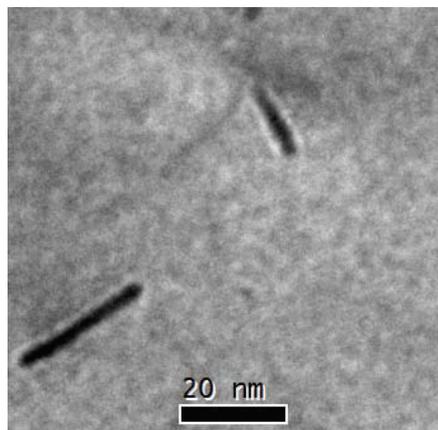
Карбиды  $(Cr, Mo)_{23}C_6$  с низким переменным содержанием молибдена имеют объемно-центрированную кристаллическую решетку с периодом 10,640 Å, увеличивающимся по мере роста содержания молибдена до 10,900 Å.

- Карбиды  $Me_4C_{2,5}$  на основе молибдена имеют состав  $Mo_3CrC_{2,5}$  с добавками железа, никеля, марганца и кремния. Они характеризуются более плоской морфологией, имеют гексагональную кристаллическую решетку с периодами решетки  $A = 2,982$  Å и  $C = 28,810$  Å и располагаются только по границам зерен и субзерен.

- Карбиды на основе молибдена, имеющие преимущественно дискообразную форму, существенно меньшие размеры и большую плотность по сравнению с карбидами типа  $(Cr, Mo)_{23}C_6$ . Карбиды этого типа имеют состав  $Mo_{3,08}Cr_{0,92}C_{2,5}$  и гексагональную кристаллическую решетку с периодами решетки  $A = 2,982$  Å и  $C = 28,810$  Å и располагаются, главным образом, в теле зерна.



Карбиды типа  $Me_{23}C_6$   
(ТЭМ-изображение)



Карбонитриды типа  $V(C,N)$   
(ТЭМ-изображение)



Карбиды типа  $Me_{23}C_6$   
(картина микродифракции)



Карбонитриды типа  $V(C,N)$   
(картина микродифракции)

Рис. 2. Карбидные фазы в основном металле стали 15Х2НМФАА

В образцах **ОМ** обнаружены выделения двух типов:

- карбиды типа  $Me_{23}C_6$ , аналогичные обнаруженным в металле сварного шва (на основе хрома, имеющие объемно-центрированную кристаллическую решетку с периодом 10,640 Å, располагающиеся в теле зерна и по границам зерен и субзерен), но имеющие состав  $(Cr,V)_{23}C_6$  с переменным содержанием ванадия и небольшими добавками железа, молибдена и марганца;

- карбонитриды  $V(C,N)$ , имеющие дискообразную форму, объемно-центрированную кристаллическую решетку с периодом 5,949 Å и располагающиеся преимущественно в теле зерна.

В сталях КР ВВЭР-1000 после облучения в широком интервале флюенсов быстрых присутствуют радиационно-индуцированные структурные составляющие – радиационные дефекты – дислокационные петли, преципитаты, обогащенные никелем, кремнием и марганцем. В основном металле радиационно-индуцированными являются также карбонитриды ванадия [6, 7].

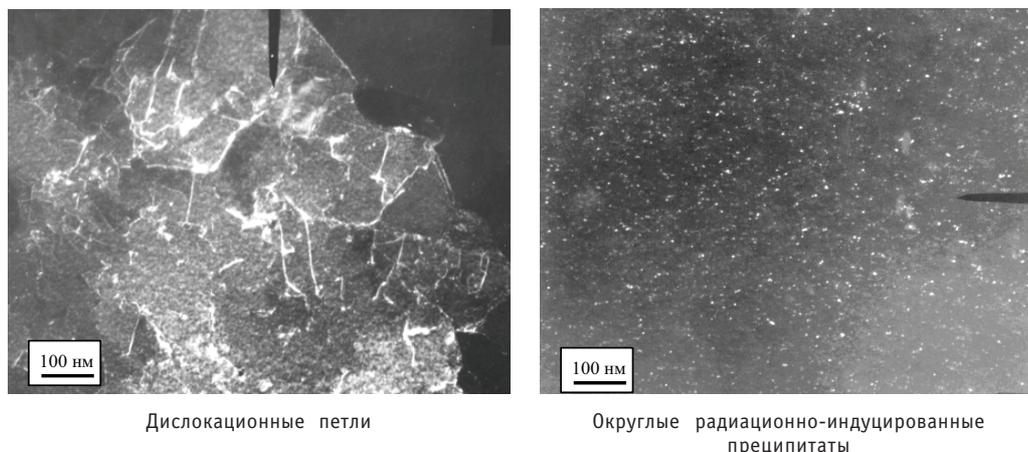


Рис. 3. ТЭМ-изображения радиационно-индуцированных изменений в МШ стали 15X2NMФА под облучением

В таблице 4 представлены результаты СЭМ-анализа изменения плотности и размеров карбидов разного типа после различных изотермических выдержек и облучения МШ и ОМ ВВЭР-1000.

Типичные ТЭМ-изображения различных элементов структуры после длительной температурной выдержки и облучения образцов МШ представлены на рис. 3.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Проведение фрактографических исследований позволяет экспрессно оценивать степень развития отпускной хрупкости (образование зернограничных сегрегаций примесей, в первую очередь, фосфора) по максимальной доле хрупкой межзеренной составляющей в изломах испытанных образцов Шарпи.

Существующая зависимость доли хрупкого межзеренного разрушения от величины аустенитного зерна [1] осложняет анализ результатов фрактографических исследований образцов корпусных сталей ВВЭР, для которых размер зерна колеблется в широких пределах (от 50 до 400 мкм). Поэтому для исключения влияния размера зерна на долю хрупкого межзеренного разрушения рассматривались образцы с приблизительно одинаковыми средними размерами зерен (100–150 мкм).

Кроме того, существует температурная зависимость доли хрупкого межзеренного разрушения в образцах Шарпи ОМ и МШ: появление этой составляющей излома наблюдается при температуре испытания, соответствующей нижнему шельфу. Доля ее возрастает по мере приближения к температуре вязко-хрупкого перехода, достигая максимальной величины, характерной для данного состояния стали, чуть ниже температуры вязко-хрупкого перехода, а затем резко уменьшается при повышении температуры испытаний до области верхнего шельфа. В связи с этим для исследований отбирались образцы, испытанные в области вязко-хрупкого перехода – области максимального проявления хрупкого межзеренного разрушения.

На основании анализа базы данных результатов фрактографических исследований образцов-свидетелей КР ВВЭР-1000 построена зависимость доли хрупкого межзеренного разрушения от содержания никеля в стали, продолжительности термической выдержки и дозы облучения (рис. 4).

Таблица 4

**Поверхностная плотность и средние размеры выделений в МШ и ОМ образцов-свидетелей в различных состояниях**

Время изотермической выдержки	Карбонитриды V(C,N)		Мелкие карбиды Mo <sub>3</sub> C <sub>25</sub>		Карбиды Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>		Крупные карбиды Mo <sub>3</sub> C <sub>25</sub>		Радиационно-индуцированные преципитаты		Дислокационные петли	
	Средний размер, нм	Плотность, ×10 <sup>21</sup> м <sup>-3</sup>	Средний размер, нм	Плотность, ×10 <sup>21</sup> м <sup>-3</sup>	Средний размер, нм	Плотность, ×10 <sup>19</sup> м <sup>-3</sup>	Средний размер, нм	Плотность, ×10 <sup>19</sup> м <sup>-3</sup>	Средний размер, нм	Плотность, ×10 <sup>21</sup> м <sup>-3</sup>	Средний размер, нм	Плотность, ×10 <sup>21</sup> м <sup>-3</sup>
Металл сварного шва (Калининская АЭС, блок 2)												
Исходное	-	-	24±6	0,9±0,1	90±40	1,7±0,3	90±70	1,2±0,3	-	-	-	-
136 6564	-	-	22±5	1,0±0,1	70±20	1,8±0,3	100±60	1,0±0,2	-	-	-	-
136 656 + облучение до 28×10 <sup>22</sup> н/м <sup>2</sup>	-	-	23±6	1,7±0,3	80±30	1,7±0,4	110±60	1,1±0,1	200±40	2,0±1,0	4,5±0,5	3,5±0,5
Основной металл (Балаковская АЭС, блок 3)												
Исходное	19±4	4,3±1,3	-	-	130±70	4,8±0,7	-	-	-	-	-	-
36 048 ч	21±5	4,0±0,8	-	-	130±60	4,3±0,6	-	-	-	-	-	-
89 400 ч	22±5	4,2±0,5	-	-	120±60	4,9±0,6	-	-	-	-	-	-
136 896 ч	22±5	4,3±0,8	-	-	130±60	4,7±0,8	-	-	-	-	-	-
136 896 + облучение до 60×10 <sup>22</sup> н/м <sup>2</sup>	12±3	8,7±1,7	-	-	120±60	4,9±0,5	-	-	90±10	2,0±1,0	5,5±0,5	4,0±1,0

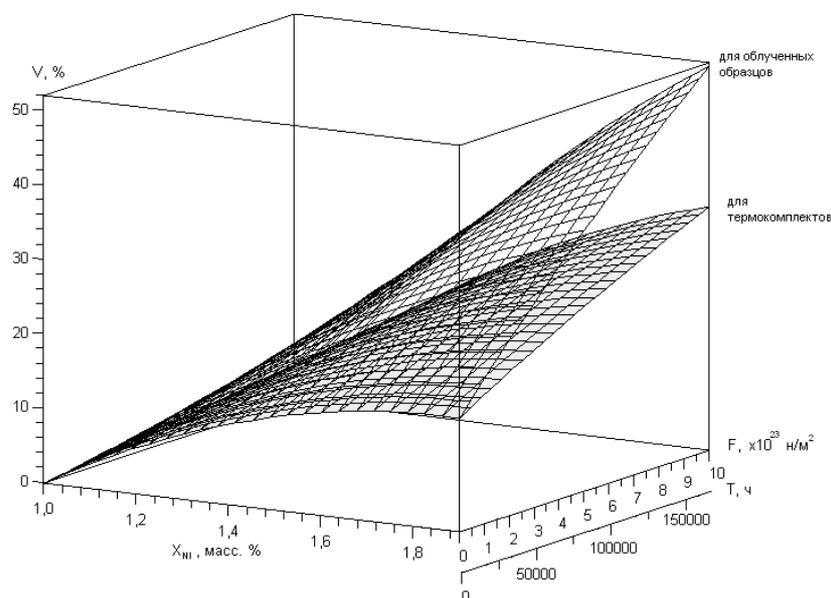


Рис. 4. Зависимость доли хрупкого межзеренного разрушения образцов Шарпи материалов КР ВВЭР-1000 от содержания никеля, длительности изотермической выдержки и дозы облучения

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕЖЗЕРЕННЫХ СЕГРЕГАЦИЙ ФОСФОРА

Для подтверждения результатов фрактографических исследований, позволяющих экспрессно оценить степень развития сегрегационных процессов, методом оже-электронной спектроскопии проведены прямые исследования уровня сегрегаций фосфора на границе зерна. Экспериментальные данные приведены в виде процента покрытия границы зерна монослоем фосфора и отнормированы на общее число измерений. На рисунках 5, 6 представлены зависимости изменения концентрации фосфора на границах зерна в исследованных материалах в различных состояниях.

Сводные данные обработки результатов измерений уровня сегрегаций фосфора образцов-свидетелей МШ Калининской и Балаковской АЭС в различных состояниях представлены в табл. 5.



Рис. 5. Концентрация фосфора на поверхностях межзеренного разрушения образцов контрольного, 2-го, 3-го температурных комплектов и лучевого комплекта образцов-свидетелей МШ Калининской АЭС (блок 2)



Рис. 6. Концентрация фосфора на поверхностях межзеренного разрушения образцов контрольного и лучевого комплектов образцов-свидетелей МШ Балаковской АЭС (блок 1)

Таблица 5

**Данные для оценки кинетики равновесной межзеренной сегрегации фосфора**

Материал	Время выдержки, ч	Флюенс, $10^{22} \text{ м}^{-2}$	Максимум экспериментального распределения, % покрытия ГЗ монослоем Р	Мода теоретического распределения, % покрытия ГЗ монослоем Р
МШ Калининской АЭС, блок 2 (1,64 мас. % Ni, 0,008 мас. % P)				
Исходное состояние	0	–	10	11
Термокомплект 2	67032	–	14	14
Термокомплект 3	136656	–	17	15
Облученные образцы	136656	30	18	18
МШ Балаковской АЭС, блок 1 (1,88 мас. % Ni, 0,009 мас. % P)				
Исходное состояние	0	–	17	17
Облученные образцы	105 936	35	23	22

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Анализ базы данных механических испытаний образцов [8], которая включает в себя более 100 экспериментальных точек для ОМ и МШ в рамках исследований образцов-свидетелей 15-ти действующих КР ВВЭР-1000 России и Украины, показал, что для температурного старения в диапазоне температур 310–320°C характерен большой разброс свойств (рис. 7).

Для оценки механизмов, действующих при длительном воздействии рабочих температур КР, были проведены СЭМ- и ТЭМ-исследования, которые показали, что в исследованных образцах-свидетелях ОМ и МШ температурных комплектов присутствуют выделения только карбидных и карбонитридных фаз, а предполагаемые ранее выделения других фаз отсутствуют.

Анализ табл. 4 показывает, что длительная температурная выдержка (до ~140 000 ч при температуре 300–320°C) не вызывает существенных изменений плотности и размеров карбидных и карбонитридных фаз в исследованных материалах. Исследования также показали, что микротвердость исследованных образцов после различных изотермических выдержек не изменяется, т.е. не происходит дополнительного отпуска бейнита отпуска, полученного после штатной термообработки (табл. 6).

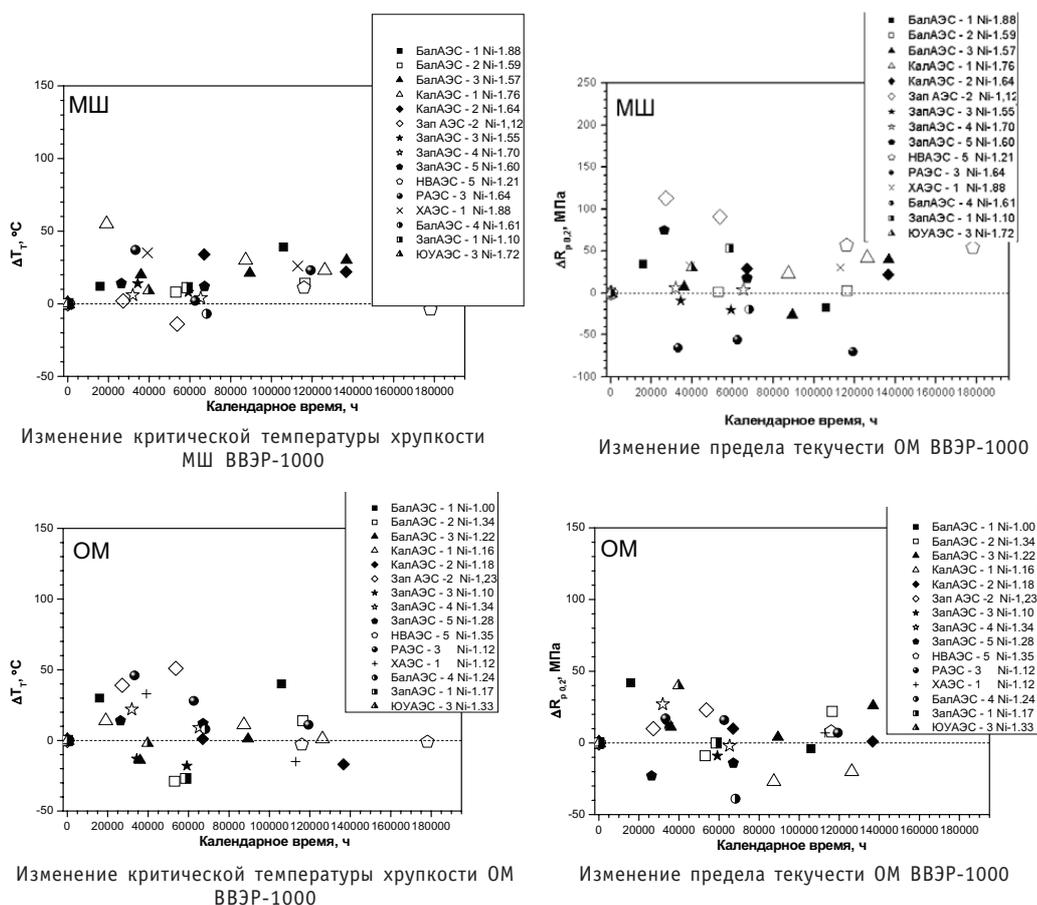


Рис. 7. Изменение прочностных характеристик ОМ и МШ тепловых комплектов образцов-свидетелей ВВЭР-1000

Таким образом, в образцах-свидетелях ОМ и МШ исследованных температурных комплектов при временах выдержки от ~10 000 до 140 000 часов и температуре 300 – 320°C состав фаз, их размеры и плотность практически не изменяются, поэтому не должен изменяться и предел текучести сталей. Однако накопление зернограницных сегрегаций фосфора может приводить к росту критической температуры хрупкости по мере увеличения изотермической выдержки. В большей степени это проявляется на металле сварного шва с повышенным содержанием ни-

Таблица 6

**Микротвердость образцов-свидетелей ОМ и МШ ВВЭР-1000 в различных состояниях**

ОМ Балаковская 3				
	Исходное	36 048 ч	89 400 ч	136 896 ч
$\langle H_k \rangle$ , HRC	278±13	252±9	256±9	262±7
МШ Калининская 2				
	Исходное	–	67 032ч	136 656ч
$\langle H_k \rangle$ , HRC	216±4	–	222±6	218±7

келя (рис. 7). Кажущееся изменение предела текучести (рис. 7), вероятно, обусловлено разбросом свойств, вызванным некоторой неоднородностью химического состава основного металла.

При совместном воздействии длительной температурной выдержки и облучения МШ до флюенса  $28 \times 10^{22}$  н/м<sup>2</sup> плотность и размеры крупных карбидных фаз типа  $(Cr, Mo)_{23}C_6$  и  $Mo_3CrC_{2,5}$  не изменяются, в то время как плотность мелких карбидов на основе молибдена в исследованных образцах несколько увеличивается. Облучение ОМ до флюенса  $60 \times 10^{22}$  н/м<sup>2</sup> также не приводит к изменению плотности и размеров крупных карбидов типа  $(Cr, V)_{23}C_6$ , но сопровождается увеличением плотности карбонитридов  $V(C, N)$ .

Стоит отметить, что плотность радиационно-индуцированных элементов структуры в облученных образцах более чем на порядок выше, чем плотность мелких карбидов и радиационных дефектов, в связи с чем стоит ожидать, что именно образование радиационно-индуцированных преципитатов вносит определяющий вклад в упрочнение исследованных материалов под облучением.

Анализ зависимости доли хрупкого межзеренного разрушения от содержания никеля, продолжительности изотермической выдержки и дозы облучения показывает, что процесс образования сегрегаций примесей (прежде всего фосфора) не прекращается на протяжении всего периода эксплуатации и зависит от содержания никеля в стали. Увеличение содержания никеля в стали способствует интенсификации процессов образования сегрегаций уже в исходном состоянии при медленном охлаждении после штатной термической обработки. При увеличении дозы облучения растет вклад радиационной составляющей, при этом, чем больше содержание никеля в стали, тем выше вклад радиационной составляющей (разница в доли хрупкого межзеренного разрушения для облученных образцов по сравнению с термокомплексом растет по мере роста дозы облучения и концентрации никеля в стали). Темп образования сегрегаций постепенно замедляется при увеличении содержания никеля и дозы облучения.

Таким образом, в исследованных образцах термокомплектов механизмом, отвечающим за сдвиг критической температуры хрупкости, может являться образование сегрегаций примесей (прежде всего фосфора) по границам зерен, что проявляется также в появлении хрупкого межзеренного разрушения в изломах образцов Шарпи. Необходимо отметить, что вклад сегрегационного механизма становится особенно существенным при больших временах изотермических выдержек в материалах с повышенным содержанием примесей, к которым относятся прежде всего обечайки зоны патрубков.

В облученных материалах увеличение критической температуры хрупкости обусловлено развитием сегрегационных процессов и образованием радиационно-индуцированных элементов структуры: наноразмерных округлых преципитатов и радиационных дефектов – дислокационных петель.

Исследования методами оже-электронной спектроскопии подтверждают данные фрактографических исследований и показывают дополнительное увеличение концентрации примесей (фосфора) на границах зерен под облучением (табл. 5). Диффузия фосфора в материале, подвергающемся действию облучения, стимулирована образованием радиационных дефектов – вакансий, междоузлий и их комплексов, которые в свою очередь, образуя комплексы с примесными атомами, облегчают движение последних по объему зерна и адсорбцию на стоках, в том числе на границах зерен.

Следует отметить еще один важный факт – существенное различие в уровнях межзеренной сегрегации фосфора на границах зерен в исходном состоянии МШ

Калининской и Балаковской АЭС, что можно объяснить различием в уровнях межзеренной сегрегации фосфора в контрольных комплектах МШ Калининской и Балаковской АЭС, принимая во внимание более высокое содержание никеля в последнем.

## ВЫВОДЫ

1. Фазовый состав исследованных образцов-свидетелей ОМ и МШ температурных комплектов в процессе изотермических выдержек от ~10 000 до 140 000 часов при рабочей температуре 300–320°C значимо не изменяется по сравнению с исходным состоянием и представлен  $\alpha$ -железом, карбидами и карбонитридами. Присутствие иных фаз не обнаружено.

2. Размеры и плотность карбидов и карбонитридов в процессе длительной температурной выдержки при рабочей температуре реактора практически не изменяются. Таким образом, показано, что структурные предпосылки для изменения прочностных характеристик исследованных образцов ОМ и МШ в интервале температур 300–320°C до ~ 140 000 часов отсутствуют.

3. Доля хрупкого межзеренного разрушения и зернограничная концентрация фосфора растут с увеличением содержания никеля в стали и продолжительности выдержки при рабочей температуре КР, что может стать определяющим фактором при продлении срока службы до 60-ти и более лет.

4. Экспериментально показано, что в сталях КР наблюдается радиационно-стимулированная диффузия фосфора к границам зерен.

## Литература

1. Gurovich B.A., Kuleshova E.A., Nikolaev Yu.A., Shtrombakh Ya.I. Assessment of relative contributions from different mechanisms to radiation embrittlement of reactor pressure vessel steels//J. Nucl. Mat. – 1997. – Vol. 246. – P. 91-120.
2. Gurovich B.A., Kuleshova E.A., Prihodko K.E., Lavrenchuk O.V., Shtrombakh Ya.I. The principal structural changes proceeding in Russian pressure vessel steels as a result of neutron irradiation, recovery annealing and re-irradiation//J. Nucl. Mat. – 1998. – Vol. 264. – P. 333-353.
3. Гурович Б.А., Кулешова Е.А., Федотова С.В., Мальцев Д.А., Фролов А.С. Влияние химического состава и структурных параметров сталей корпусов реакторов ВВЭР на склонность к охрупчиванию, обусловленному образованием зернограничных сегрегаций, в том числе в условиях, характерных для длительной эксплуатации энергетических установок/Материалы VII МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (Подольск, Россия 17-20 мая 2011 г.). – Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
4. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
5. Kelly P., Jostons A., Blake R., Napier J. The determination of foil thickness by scanning transmission electron microscopy//Phys. Status Solidi (A). – 1975. – Vol. 31. – P. 771.
6. Gurovich B.A., Kuleshova E.A., Shtrombakh Ya.I., Erak D.Yu., Chernobaeva A.A., Zabusov O.O. Fine structure behaviour of VVER-1000 RPV materials under irradiation// Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 389. – P. 490-496
7. Miller M.K., Chernobaeva A.A., Shtrombakh Y.I., Russell K.F., Nanstad R.K., Erak D.Y., Zabusov O.O. Evolution of the nanostructure of VVER-1000 RPV materials under neutron irradiation and post irradiation annealing//Journal of Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 385. – P. 615-622.
8. Создание и анализ базы данных по длительному термическому старению стали 15Х2НМФА (15Х2НМФА-А, 15Х2НМФА класс 1) и ее сварных соединений; разработка нормативных зависимостей для консервативной оценки ниспадающей части зависимости сдвига критической температуры хрупкости стали марки 15Х2НМФА и ее сварных соединений от времени термического старения/Отчет НИЦ «Курчатовский институт» по проекту АЭС-2006. – М., 2009.

Поступила в редакцию 25.06.2012

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ НА СКОРОСТЬ ОКИСЛЕНИЯ В СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

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



Проведены сравнительные испытания по окислению образцов нержавеющей аустенитной стали (18% Cr и 8%Ni) в состоянии поставки и после механической полировки в газовых средах (технический аргон и водяной пар) и теплоносителе Pb-Bi. Путем проведения металлофизических исследований окисленных образцов показано, что механическая полировка существенно снижает скорость окисления поверхности образцов. Этот эффект особенно заметен при окислении стали в тяжелом теплоносителе.

**Ключевые слова:** установка, скорость окисления, оксидные покрытия, металлографический анализ, ионные пучки.

**Key words:** research facility, the oxidation rate, oxide coatings, metallographic analysis, ion beams.

Для успешной эксплуатации конструкционных сталей в тяжелых теплоносителях, содержащих свинец, необходимо, чтобы на их поверхностях, контактирующих с металлическим расплавом, присутствовали защитные покрытия [1–3]. В противном случае на этой границе протекают коррозионные процессы, приводящие к снижению ресурса работы соответствующего оборудования. При повышенных температурах интенсивность жидкометаллической коррозии столь высока, что использование в этих условиях сталей теряет практический смысл.

Одним из наиболее распространенных способов формирования на поверхности стали защитного антикоррозионного покрытия является операция пассивации (оксидирования) стальной поверхности. Применительно к сталям, используемым в реакторных установках со свинцово-висмутовым теплоносителем, эта операция проводилась как в различных газовых окислительных средах (водяной пар, углекислый газ), так и непосредственно в самом теплоносителе [4].

По месту проведения операции оксидирования различают режимы внеконтурной пассивации стальных поверхностей, когда отдельные узлы оборудования подвергаются оксидированию в специальных емкостях, и внутриконтурной пассивации, проводящиеся непосредственно в первом контуре реакторной установки. В последнем случае оксидирование поверхностей осуществляется за счет растворенного в теплоносителе кислорода.

© 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, 2012

Дальнейшая эксплуатация конструкционных сталей в составе реакторной установки в условиях отсутствия жидкометаллической коррозии протекает в окислительном режиме их взаимодействия с теплоносителем. Очевидно, что чем меньше скорость окисления стали, тем выше ресурс ее работы. Поэтому желательно со стороны теплоносителя создать такие условия, которые обеспечили бы достижение максимального ресурса.

В работе [5] была предложена методика оценки интенсивности окисления различных сталей в тяжелых металлах как функции условий окисления. В частности, для стали ЭП-823 в области рабочей концентрации кислорода в теплоносителе было получено уравнение для оценки скорости окисления в каждый момент времени:

$$q(\tau) = \frac{A}{\delta(\tau)} \cdot p_{O_2}^{0,125} \cdot \exp\left(-\frac{30000}{T}\right),$$

где  $\delta(\tau)$  – толщина оксидной пленки в момент времени  $\tau$ ;  $p_{O_2}$  – парциальное давление кислорода в газовой фазе, равновесное с теплоносителем данного состава, определяемое с помощью датчиков термодинамической активности кислорода [6];  $T$  – температура, К;  $A$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий другие условия окисления стали, не вошедшие в явном виде в формулу.

Анализ вычисленных значений параметра  $A$  по имеющимся в литературе многочисленным экспериментальным данным зависимости толщины оксидной пленки от времени  $\delta(\tau)$  для сталей ЭП-823 показал значительный их разброс при, казалось бы, одинаковых условиях окисления. Например, численные значения константы  $A$  для температуры окисления 650°C различались более чем в 50 раз. Это указывает на наличие неучтенного фактора, оказывающего серьезное влияние на скорость окисления. Одним из таких факторов может быть исходная подготовка поверхности, о которой не всегда сообщается при описании экспериментов.

Выполненный в дальнейшем для более широкого круга конструкционных сталей анализ подтвердил это предположение. Так, при анализе экспериментальных данных было отмечено, что максимальные значения параметра  $A$  получены в тех случаях, когда поверхность стали перед экспозицией образцов в теплоносителе подвергалась химической или электрохимической полировке (травлению) [5]. Эти результаты можно объяснить тем, что при воздействии кислот на поверхность стали, в первую очередь, протравливается межзеренное пространство, из которого удаляются компоненты стали, располагающиеся по границам зерен. Так для сталей, содержащих в качестве легирующей добавки кремний, при этом происходит его «вымывание». Результатом такой предварительной обработки поверхности является образование облегченных путей диффузии для кислорода и металлических компонентов, что и определяет высокие скорости протекания окислительного процесса, в первую очередь, на начальной стадии.

В тех случаях, когда специальная подготовка поверхности стали не использовалась, численные значения параметра  $A$  характеризовались умеренными величинами, хотя их разброс был также значителен. Оставаясь в рамках изложенных выше представлений, эти результаты можно объяснить наличием естественных различий в технологии получения испытываемых образцов сталей, которые, в конечном счете, определяли исходное состояние поверхности (соотношение между обычными и облегченными путями развития диффузионных процессов).

Крайне низкие значения параметра  $A$ , наблюдавшиеся в ходе анализа, из-за отсутствия каких-либо дополнительных указаний было трудно объяснить в рамках рассматриваемого механизма окисления. Однако собственные экспериментальные наблюдения показали, что в случаях проведения предварительной меха-

нической полировки стальной поверхности измеряемые потоки кислорода были существенно меньше, чем при проведении опытов со сталью в состоянии поставки.

Подтверждение этому было найдено в литературе [6]. Оказалось, что в результате механической полировки стальной поверхности происходит пластическая деформация поверхностных зерен, вследствие чего «запечатывается» межзеренное пространство, являющееся основным проводником кислорода в матрицу стали, что и приводит к повышению коррозионной стойкости. Однако целенаправленных исследований по влиянию подготовки поверхности на скорость окисления сталей в тяжелых теплоносителях до сих пор не проводилось.

Методически экспериментальные исследования были построены на сравнении результатов окисления образцов стали, которые отличались только исходным состоянием поверхности. Для этого перед экспонированием образцов в окислительных средах половина их общего количества подвергалась механической полировке наждачной бумагой М40. Остальные образцы оставались в исходном состоянии. Образцы размером  $15 \times 10 \times 1,5$  мм изготавливались из нержавеющей аустенитной стали (18% Cr и 8% Ni) и помещались на специальном штоке в реакционную емкость экспериментальной установки (рис. 1).

Установка состоит из обогреваемой реакционной емкости, в которую помещают образцы, и проводят режим окисления в газовой или жидкометаллической среде. В качестве газовой среды использовали технический аргон (содержание кислорода  $\sim 0,01\%$  по объему), а также смесь технического аргона и водяного пара (содержание влаги на уровне точки росы  $60^\circ\text{C}$ ). Для проведения режимов окисления в водяном паре установка снабжена увлажнителем газовых смесей, который смонтирован на входе в реакционную емкость, и конденсатором водяного пара, расположенным на выходе из реакционной емкости. Для испытания режима окисления образцов в жидком металле предусмотрена возможность помещения стакана с расплавом в реакционную емкость. В верхней части реакционной емкости размещена шлюзовая камера для отсадки или замены образцов без нарушения режима работы реакционной емкости. Установка снабжена электрическими на-

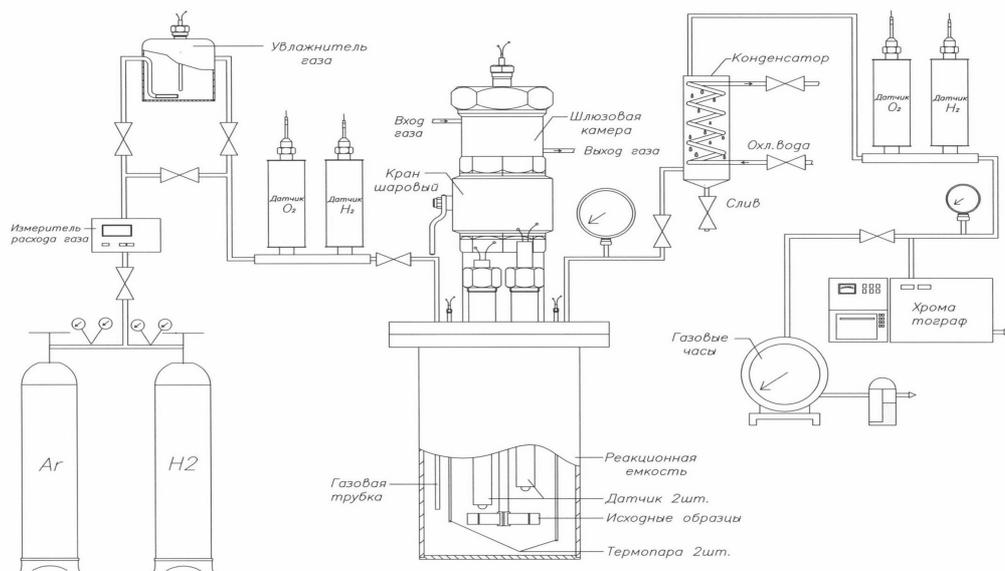


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

гревателями, средствами контроля и поддержания температуры, а также датчиками контроля термодинамической активности кислорода в газовой среде и жидком металле (кислородные сенсоры). Сигнал кислородных сенсоров (мВ) зависит от содержания активного кислорода в контролируемой среде и от электрода сравнения, установленного в данном экземпляре сенсора. В качестве электродов сравнения используются металлооксидные системы с известным кислородным потенциалом, например, Bi-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Pb-Bi-Fe-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и др. С уменьшением парциального давления кислорода в контролируемой среде сигнал сенсора становится все более положительным [7].

Окисление образцов проводили в различных газовых средах и в расплаве свинца-висмута. В последнем случае окислению подвергали как исходные образцы, так и образцы после предварительной пассивации в газовых средах. Всего в данной серии экспериментов испытаниям подвергли 28 образцов – 14 с предварительной полировкой и 14 в состоянии поставки. Условия испытаний и их последовательность представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Условия и последовательность окисления образцов**

Номер полированного образца	Номер образца в состоянии поставки	Газовая окислительная среда	Температура экспозиции в газе, °С	Время экспозиции в газе, ч	Жидкометаллическая окислительная среда	Температура экспозиции в Pb-Bi, °С	Время экспозиции в Pb-Bi, ч
3	6	Ar	500	10	–	–	–
1	4	Ar	500	10	Pb-Bi	500	2,5
2	5	Ar	500	10	Pb-Bi	600	2
9	12	Ar	600	8			
7	10	Ar	600	8	Pb-Bi	500	2,5
8	11	Ar	600	8	Pb-Bi	600	2
15	18	H <sub>2</sub> O	500	6	–	–	–
13	16	H <sub>2</sub> O	500	6	Pb-Bi	500	2,5
14	17	H <sub>2</sub> O	500	6	Pb-Bi	600	2
21	24	H <sub>2</sub> O	600	2,5	–	–	–
19	22	H <sub>2</sub> O	600	2,5	Pb-Bi	500	2,5
20	23	H <sub>2</sub> O	600	2,5	Pb-Bi	600	2
25	26	–	–	–	Pb-Bi	500	2,5
27	28	–	–	–	Pb-Bi	600	2

После экспозиции образцов в окислительной среде их извлекали из реакционной емкости; при необходимости отмывали от остатков теплоносителя Pb-Bi и отправляли для проведения металлофизических исследований.

Основным методом исследований образцов являлся метод, основанный на анализе распределения кислорода в оксидных пленках с использованием ускоренных ионных пучков [8]. На рисунке 2 для примера в графическом виде представлены

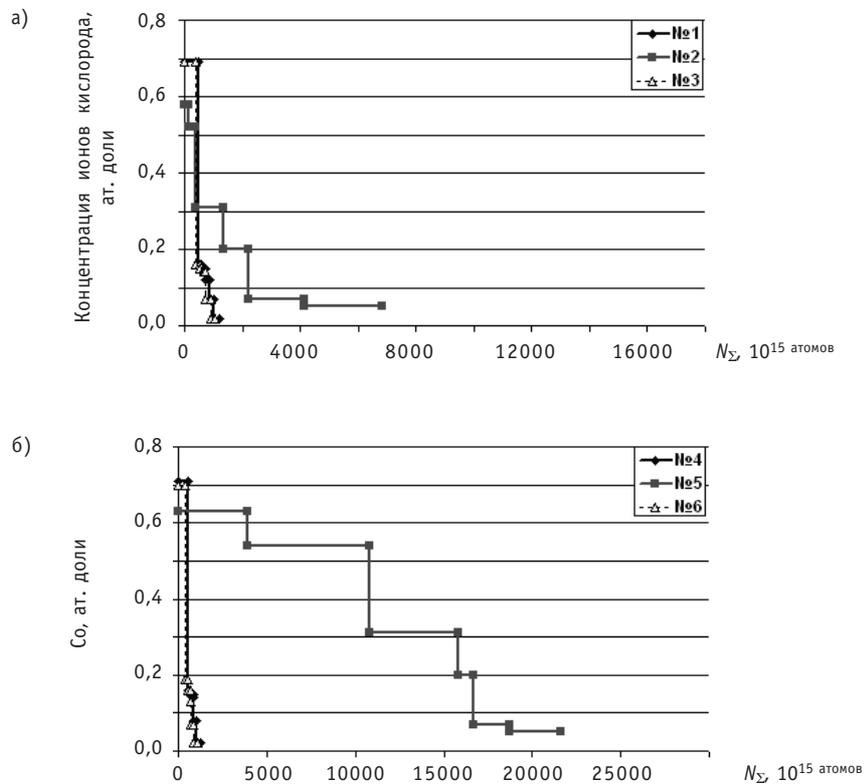


Рис. 2. Результаты исследования приповерхностного слоя образцов стали после пассивации в аргоне и в расплаве Pb-Bi: а) – образцы после механической полировки; б) – образцы в состоянии поставки

результаты исследования приповерхностного слоя стали шести образцов (№ 1 – № 6). Как следует из табл. 1, данные образцы подверглись пассивации в аргоне при 500°C в течение 10 часов. Затем образцы №1 и №4 были помещены в жидкий металл при температуре 500°C на 2,5 часа, а образцы № 2 и № 5 – в жидкий металл при температуре 600°C на 2 часа.

По данным рис. 2 результаты пассивации полированных и неполированных образцов в аргоне при 500°C (№ 3 и № 6), а также последующие испытания в свинце-висмуте при 500°C практически не отличаются друг от друга. Однако при испытании образцов № 2 и № 5 в свинце-висмуте при 600°C, также предварительно запассивированных в аргоне при 500°C, разница оказалась существенной: полированный образец набрал втрое меньше кислорода, чем образец в состоянии поставки.

На графике рис. 3 представлены результаты вычисления соотношений средних скоростей окисления образцов в состоянии поставки к средним скоростям окисления полированных образцов при одних и тех же условиях испытаний.

Как видно из графика рис. 3, при газофазном окислении образцов с различным состоянием поверхности существенных различий в скорости взаимодействия не обнаружилось, возможно, в силу низкой агрессивности окислительной среды и малого времени взаимодействия. Однако контакт с теплоносителем Pb-Bi даже при малом времени экспозиции эти различия выявил. Причем с повышением температуры испытаний в свинце-висмуте эти различия усиливаются. Особенно это заметно для образцов, предварительно запассивированных в аргоне при 600°C.

В ряде случаев параллельно с основным методом использовали металлографический анализ состояния поверхности образцов и сделанных в поперечном на-

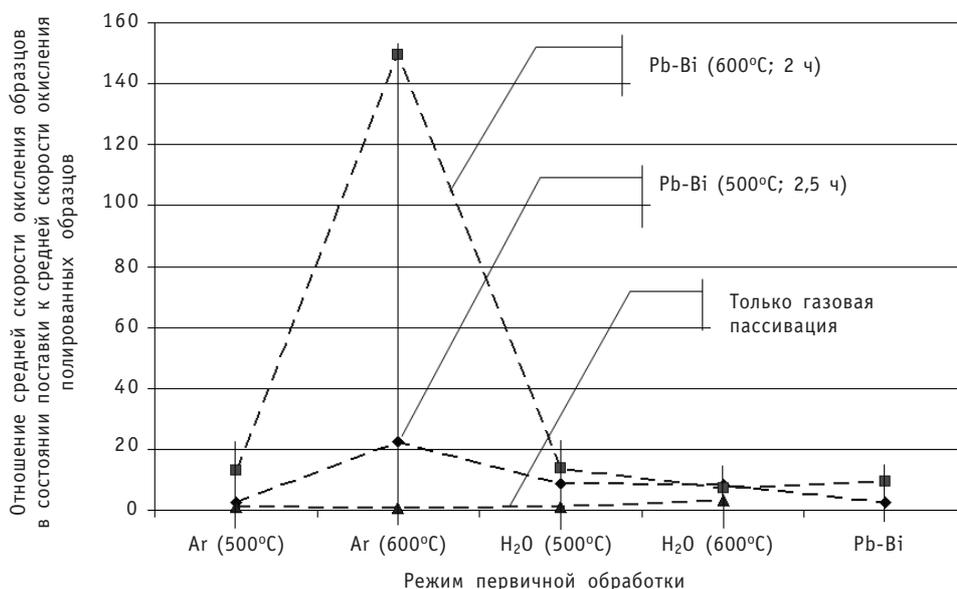


Рис. 3. Отношение скорости окисления образцов в состоянии поставки к скорости окисления полированных образцов при одних и тех же условиях испытаний

правлении шлифов. На рисунке 4 представлены микрофотографии поверхности образцов исследуемой стали до и после полировки наждачной бумагой М40. Нетрудно убедиться в том, что исходная зернистая структура с отчетливо выраженными межзеренными границами после полировки исчезла. Границы зерен при одном и том же увеличении микроскопа не просматриваются. Видны абразивные следы, полученные материалом в ходе механической обработки.

Внешний вид полированных и неполированных образцов после оксидирования в одинаковых условиях во всех случаях имел заметные отличия. Для примера на рис. 5 представлены микрофотографии соответствующих поверхностей после оксидирования в водяном паре при температуре ~ 580°C. Окисление полированных образцов (слева) носит очаговый характер, причем большая часть поверхности не подвергается интенсивному окислению. Напротив, образцы в состоянии поставки (справа) практически полностью подверглись заметному окислению, и

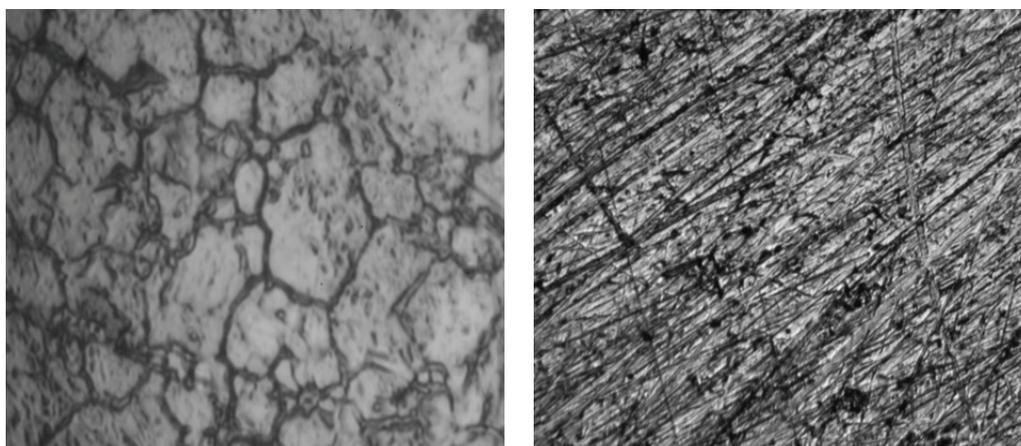


Рис. 4. Внешний вид поверхности образца до и после полировки (× 100)

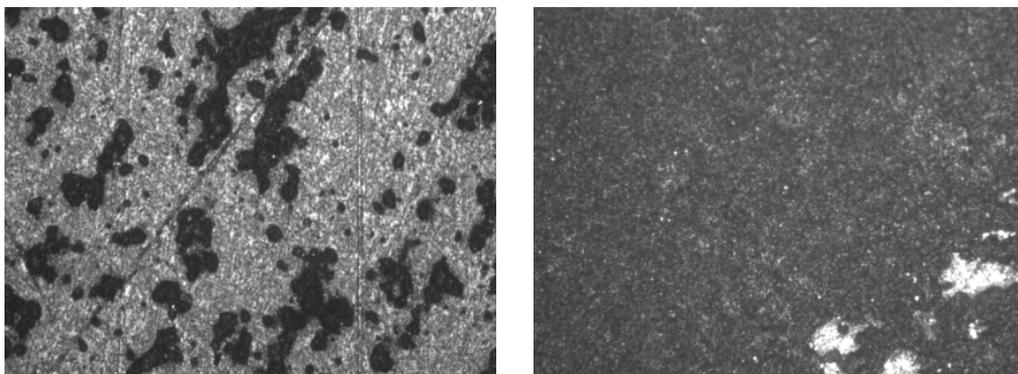


Рис. 5. Внешний вид поверхности образцов после оксидирования в водяном паре

только в отдельных незначительных по площади местах скорость окисления оставалась низкой.

Аналогичная картина наблюдалась и после экспозиции образцов в жидкометаллическом расплаве свинца-висмута.

Данные об очаговом характере окисления полированных образцов подтверждаются результатами металлографических исследований шлифов. В частности, на рис. 6 представлена микрофотография поперечного сечения полированного образца после оксидирования.

На рисунке 6 видно, что толщина оксидной пленки (серого цвета) в очаге окисления составляет примерно 3–4 мкм. В остальной области она меньше микрона. Доля окисленных участков составляет примерно 10% от всей поверхности. Это означает, что интегральные количества кислорода, усвоенного сталью на единице поверхности, должны различаться примерно на порядок в зависимости от соответствующего исходного состояния поверхности образца перед его оксидированием.



Рис. 6. Микрофотография поперечного сечения полированного образца после оксидирования

Результаты анализа распределения кислорода в оксидных пленках с использованием ускоренных ионных пучков полностью подтвердили сделанные выше выводы и позволили количественно оценить влияние предварительной полировки на скорость протекания последующих окислительных процессов. Так, при кратковременной экспозиции образцов в перегретом водяном паре при температуре 600°C соотношение средних скоростей окисления полированных и неполированных образцов составило ~3,2, а соответствующее соотношение при окислении в расплаве свинца-висмута при этой же температуре ~9,4 (по данным рис. 3).

Как отмечено выше, в некоторых случаях (окисление в паре при 500°C, окисление в потоке технического аргона при 500 и 600°C), когда скорости окисления были крайне малы, заметных различий выявить не удалось. Тем не менее, последующая экспозиция этих образцов в свинце-висмуте показала, что в ходе этого режима для образцов, оксидировавшихся до этого в водяном паре, соотношения скоростей окисления составили ~7,4 при температуре 600°C, а при температуре

500°C ~8,7. Еще более высокие значения были получены для образцов, предварительно оксидировавшихся в токе технического аргона.

Следует отметить, что нами были проверены и другие способы воздействия на поверхностные свойства исследуемой стали. В частности, в некоторых опытах часть поверхности подвергалась механическому ударному воздействию с ультразвуковыми частотами. В других опытах поверхность обрабатывалась с использованием пескоструйной технологии. Во всех этих случаях в результате пластической деформации поверхностного слоя стали изменялись и окислительные свойства обработанных участков поверхности, что и фиксировалось в экспериментах.

Таким образом, приведенные выше результаты показывают, что путем целенаправленной предварительной подготовки поверхности (пластичной деформации поверхностного слоя) конструкционных сталей можно существенным образом снизить интенсивность последующего окислительного взаимодействия с тяжелыми теплоносителями. В рамках изложенных выше представлений в качестве основной задачи такой подготовки следует рассматривать устранение или минимизацию путей облегченной диффузии кислорода и металлических компонентов, которая, как правило, происходит в стали по границам зерен.

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

### **Литература**

1. Никитин В.И. Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые. – М.: Атомиздат, 1967.
2. Ячменев Г.С., Русанов А.Е., Громов Б.Ф. и др. /Сб. докладов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск, 1999. – Т. 1 «Проблемы коррозии конструкционных материалов в свинцово-висмутовом теплоносителе». – С.136
3. Горынин И. В., Карзов Г. П., Марков В. Г., Яковлев В. А. Конструкционные материалы для атомных реакторов с жидкометаллическими теплоносителями в виде свинца или сплава свинец – висмут // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – №9. – С.20-24.
4. Ефанов А.Д., Иванов К.Д., Мартынов П.Н., Орлов Ю.И. Технология свинцово-висмутового теплоносителя на АПЛ первого и второго поколений // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №1. – С. 138.
5. Иванов К.Д., Лаврова О.В., Юдинцев П. А., Ниязов. С. А-С. Методика оценки интенсивности потребления кислорода конструкционными сталями первого контура ЯЭУ с тяжелыми теплоносителями /Тез. докл. Межотраслевой тематической конференции. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах». – Обнинск, 2010. – С. 45-46.
6. Страфффорд К.Н. Покрyтия и обработка поверхности для защиты от коррозии и износа: Сб. статей/Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1991. – 240 с.
7. Мартынов П.Н., Чернов М.Е, Стороженко А.Н. и др. Создание нового поколения систем контроля кислорода и водорода в контурах с теплоносителями Рb и Рb -Вi на основе твердоэлектронных сенсоров кислорода капсульного типа/Сб. тезисов докладов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2008. – С. 57-58.
8. Ion beam handbook for material analysis/Ed. by J.M. Mayer, E. Rimini. – New-York: Academic Press, 1985.

Поступила в редакцию 25.09.2012

## ХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕЙТРОН-ДЕТЕКТИРУЮЩИХ УЛЬТРАТОНКИХ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Сахаров\*, П.Б. Басков\*, И.В. Мосягина\*, Н.Н. Фролов\*,  
И.И. Курбаткин\*\*, Т.И. Муравьева\*\*, Е.В. Торская\*\*, О.В. Ивкина\*,  
М.А. Шарипова\*

\**ОАО Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии, г. Москва*

\*\**Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского, г. Москва*



Представлены результаты проблемно ориентированных исследований по разработке технологии химического низкотемпературного термодеструкционного модифицирования поверхности для получения инновационных материалов радиационной фотоники – радиационно-люминесцентных наноразмерных оксидных покрытий. Выявлены базисные структурные типы наноразмерных оксидных многокомпонентных покрытий, проведено их детальное исследование с использованием сканирующего зондового микроскопа, обнаружено формирование глобулярных структур в двухслойных покрытиях с поверхностным слоем оксида меди. Показаны основные закономерности структурообразования оксидных покрытий. Исследованы возможности применения химико-структурного модифицирования для заравнивания микро- и нанорельефа поверхности модифицируемого объекта. Определены модули упругости оксидных наноразмерных покрытий с учетом модели двухслойного тела.

**Ключевые слова:** радиационно-люминесцентные материалы, химико-структурная модификация, многокомпонентные оксиды, оксидные покрытия, карбоксилатный метод, термодеструкция карбоксилатов, нанорельеф покрытия, модуль упругости нанопленок.

**Key words:** radiation-luminescent materials, chemical-structural modification, multicomponent oxides, oxide coating, carboxylate method, carboxylate thermodecomposition, nanofilms modulus of elasticity.

### ВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большое количество прогрессивных материаловедческих направлений посвящены получению новых материалов, используемых в экстремальных условиях. Подавляющая часть разработок в данной области приходится на конструкционные материалы. Однако в развитии других направлений, например, материалы радиационной фотоники, детектирующие материалы, наблюдается определенная стагнация. Для детектирования высокоинтенсивных ионизирующих излучений в системах управления и защиты (СУЗ) ядерных реакторов тради-

© *В.В. Сахаров, П.Б. Басков, И.В. Мосягина, Н.Н. Фролов, И.И. Курбаткин, Т.И. Муравьева, Е.В. Торская, О.В. Ивкина, М.А. Шарипова, 2012*

ционно используются ионизационные камеры деления и газоразрядные счетчики на основе  $^3\text{He}$ . К недостаткам первых относятся интенсивное «выгорание» рабочего материала, массивная конструкция, неселективность регистрации, отсутствие конструктивной вариативности (широкое применение нашли лишь трубчатые и пластинчатые разновидности камер деления). Сравнительно лучшими функциональными характеристиками обладают газоразрядные счетчики, однако в настоящее время в мире наблюдается дефицит  $^3\text{He}$ , что практически в ближайшее время приведет к свертыванию производства высокочувствительных нейтронных счетчиков. Существует значительное количество научно-технических разработок в области создания детекторов на основе кристаллических радиационно-люминесцентных материалов для регистрации нейтронных потоков в активной зоне реактора, но практического внедрения такие системы на сегодняшний день не имеют. Другие радиационно-люминесцентные материалы (Li-6-силикатные волокна) нашли успешное применение для детектирования ряда радиоактивных излучений (портальные PUMA-панели), однако их применение ограничивается низкоинтенсивными потоками. При переходе к реакторным условиям (плотность потоков нейтронов до  $10^{17}$  н/см<sup>2</sup>·с, гамма-излучение – до  $10^4$  Гр/с) важнейшим аспектом при конструировании материала становится не только его радиационная чувствительность, но и его радиационная стойкость.

Развиваемый нами подход к конструированию новых детектирующих материалов основан на объединении физических принципов эффективной регистрации ионизирующих излучений и возможностей химической технологии поверхностного модифицирования неорганических материалов. Базисными постулатами при таком подходе являются многокомпонентность, наномасштабирование и комбинаторность.

*Многокомпонентность.* Как показала практика, реализация принципа радиационно-индуцированной люминесценции при детектировании ионизирующих излучений является отдельной материаловедческой проблемой: необходимо не только правильно подобрать компонентный состав чувствительного материала, но и обеспечить оптимальные соотношения между активными добавками для повышения квантового выхода люминофора, предотвращения концентрационного тушения и т.д. Применяемая технология поверхностного химико-структурного модифицирования поверхности неорганических материалов позволяет получать радиационно-люминесцентные материалы в виде оксидных покрытий широкого компонентного состава и соотношения.

*Наномасштабирование.* Переход от микро- к наномасштабу синтезируемых объектов (пленочных покрытий) необходим для развития новых направлений функционализации материалов. Важнейшей проблемой применения Li-6-силикатных волокон в ядерных энергетических установках является сильнейшая деградация кварцевого материала под воздействием высокоинтенсивных ионизирующих излучений. Синтезируемые в процессе химико-структурного модифицирования оксидные покрытия являются в большинстве своем аморфными структурами, однако за счет минимизации объема радиационно-люминесцентного материала (толщина покрытия при однократном нанесении составляет не более 200 нм) «максимизируется» эффект поверхностной аннигиляции радиационно-индуцированных дефектов, что по сути обеспечивает радиационную стойкость радиационно-чувствительных элементов.

*Комбинаторность.* Этот принцип функционализации реализует «привилегии» химических технологий при конструировании важнейших неорганических материалов на микромасштабе, таких, например, как гетеропереходы в полупроводниках [1], среды с требуемым профилем показателя преломления в CVD-техноло-

гии химического парофазного осаждения [2] или градиентные линзы ионообменного синтеза [3, 4]. Технология химико-структурного модифицирования позволяет неоднократно повторять цикл «нанесение-термолиз», что обеспечивает кратное увеличение толщины покрытия и структурированность наносимых слоев. Этот фактор позволяет учитывать тип процессов радиационно-люминесцентного детектирования. Для конкретных детектирующих систем (U-235...Nd<sup>3+</sup>(Ce<sup>3+</sup>); Li-6...Nd<sup>3+</sup>(Ce<sup>3+</sup>) и т.д.) меняются условия протекания процессов возбуждения люминофора, что требует увеличения (уменьшения) толщины оксидного покрытия и структурированность слоев структур.

### **ТЕРМОДЕСТРУКЦИОННЫЙ СИНТЕЗ УЛЬТРАТОНКИХ ПОКРЫТИЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РАЗЛОЖЕНИЕМ КАРБОКСИЛАТОВ МЕТАЛЛОВ**

Химические методы получения пленок позволяют реализовать ряд преимуществ: возможность широкого варьирования составов, отсутствие необходимости использования сложного вакуумного оборудования, легкость технологической организации процессов и их масштабирования, контроль любого этапа технологического цикла, а также нанесение покрытий на материалы любой формы. Эксклюзивные возможности «карбоксилатного метода», рассмотренные в [5, 6], основаны на использовании растворов более пятидесяти карбоксилатов металлов для получения оксидных материалов непосредственно термодеструкцией пленкообразующих растворов. При этом реализуется ряд возможностей, недостижимых в альтернативных методах получения ультратонких покрытий.

К методическим особенностям технологических операций синтеза оксидных пленочных покрытий, использованным в настоящей работе, относятся

- нанесение пленкообразующего раствора целевого карбоксилата металла на поверхность подложки, которая может быть выполнена из кварцевого стекла, металлических сплавов, оптических волокон и капиллярно-волоконных элементов;
- термическое разложение жидкого карбоксилата металла на поверхности подложки в неокисляющей атмосфере. В некоторых случаях возможно применение процесса термического разложения в инертной среде.

Химико-структурная оксидная модификация поверхности, осуществляемая при термодеструкционном разложении карбоксилатов металлов, обеспечивает ряд технологических возможностей, необходимых при комбинаторном конструировании радиационно-люминесцентных оксидных покрытий:

- формирование оксидных слоев заданной толщины варьированием концентраций карбоксилатов, а также многократным повторением цикла «нанесение-термолиз»;
- формирование оксидных композиций заданного состава при использовании многокомпонентных смесей карбоксилатов на стадии нанесения их на модифицируемую поверхность;
- сборка функциональных оксидных покрытий при чередовании термодеструкции растворов карбоксилатов различных металлов (либо их смесей) в процессе повторения цикла «нанесение-термолиз».

Диапазон концентраций растворов карбоксилатов металлов, использованных для модифицирования, составлял 0,025–0,65 моль/л (в расчете на моль металла). Синтезированы нано- и микроуровневые слои оксидов SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Li<sub>2</sub>O, CeO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub> и ряда многокомпонентных фаз на их основе.

Методики исследования одно- и многокомпонентных слоев включали в себя микроструктурный спектрофотометрический анализ для определения структуры и толщины покрытия [7], анализ микро- и нанорельефа зондовым сканирующим

микроскопом, проведение испытаний для определения модуля упругости на испытательном комплексе NanoTest-600.

### **АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПУТИ ОБЪЕМНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО ФАЗООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТЕРМОДЕСТРУКЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ**

При осуществлении термодеструкции карбоксилатов металлов фазообразование оксидных структур может протекать по нескольким альтернативным направлениям. Ранее была выведена типология получаемой микроструктуры поверхности кварцевого стекла [5]. Согласно данной типологии, наблюдается широкий спектр морфологий: от хлопьевидных торосообразных объемных структур (рис.1а), до высокоадгезионных плотных слоев (рис.1б) и промежуточных псевдоэвтектических двухфазных покрытий (рис.1г).

При термолизе карбоксилата кремния на поверхности тугоплавких подложек из кварцевого стекла возможно образование рыхлых аморфных слоев диоксида кремния (рис.1а). Подобное протекание процесса объясняется объемным зародышеобразованием диоксида кремния вблизи поверхности и в приповерхностном слое подложки кварцевого стекла. В результате оксидное покрытие имеет крайне низкую адгезию к подложке.

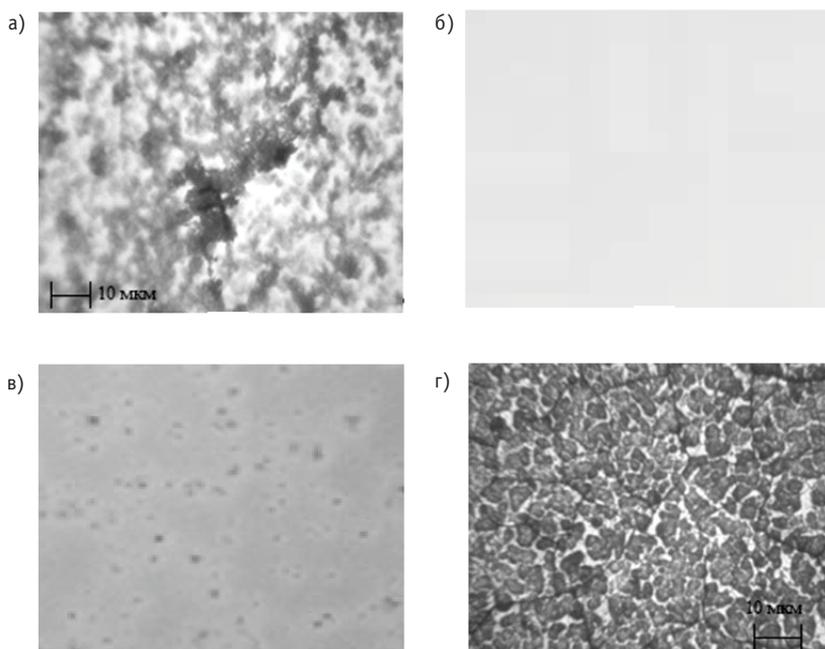


Рис. 1. Морфология наноуровневых термодеструкционных оксидных слоев на поверхности кварцевого стекла (x400), синтезированных из ВИК-карбоксилатов: а) – кремния; б) – циркония; в) – кремния и циркония (1:3); г) – кремния, лития и циркония (1:1:1)

Для получения более полной информации о формируемых структурах были проведены исследования морфологии различных типов поверхности на зондовом сканирующем микроскопе для образцов, изготовленных с использованием подложек из кварцевого стекла и металлических подложек из стали 12Х18Н10Т. Процесс исследования включал в себя следующие этапы: очистка поверхности от грязи и статического электричества; сканирование участка  $30 \times 30 \text{ мкм}^2$ ; проведение секущей и определение рельефа поверхности пленки. Затем определялось место для наночастицы размером  $1,5 \times 1,5 \text{ мкм}^2$ , проводилась секущая и исследовался

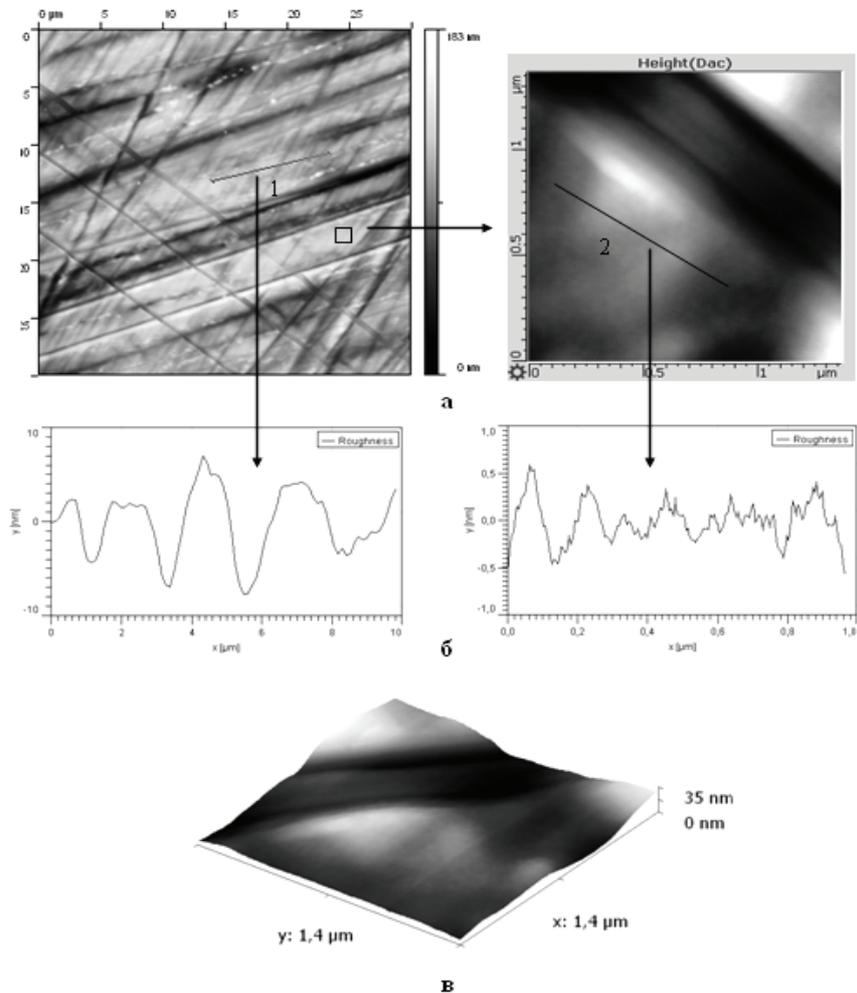


Рис. 2. Морфология поверхности и шероховатость образца Zr+Y (95:5) на металлической подложке: а) – исследование поверхности в микро- и нанодиапазонах; б) – профилограммы в микро- и нанодиапазонах, в) – 3D-поверхность в нанодиапазоне

нанорельеф. Данная методология исследования обусловлена необходимостью исключить из рассмотрения собственный рельеф подложки, играющий для образцов на металле ключевую роль в формировании рельефа поверхности. Результаты в целом подтвердили предложенную классификацию. Для покрытий, нанесенных на кварцевую подложку, обнаружены высокоадгезионные плотные слои (рис. 2) и псевдоэвтектические двухфазные покрытия (рис. 3); показано, что трещины проникают вглубь на всю толщину покрытия. Выявлена глобулярная морфология покрытия, возникающая в отдельных случаях формирования двухслойных покрытий.

Псевдоэвтектические двухфазные покрытия были получены на кварцевых подложках при толщинах порядка 200 нм, в то время как аналогичные составы при толщине покрытия порядка 100 нм приводят к образованию плотных высокоадгезионных покрытий. Для металлических подложек образования такырообразных структур, присущих двухфазным псевдоэвтектическим структурам, происходит при толщинах покрытия свыше 350 нм. На рисунке 3 приведена поверхность покрытия из диоксида циркония на кварцевой подложке толщиной порядка 150 нм.

Пятым выявленным типом поверхностной морфологии является глобулярная морфология, возникающая при формировании двухслойных покрытий оксид цир-

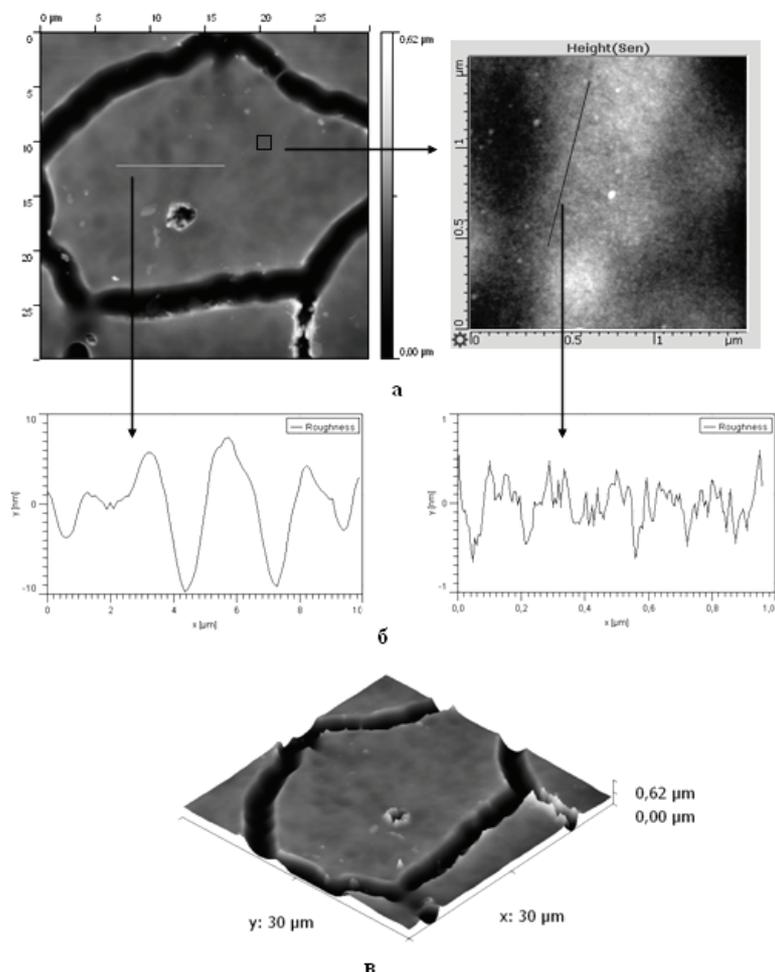


Рис. 3. Морфология поверхности и шероховатость образца Zr на кварцевой подложке: а) – исследование поверхности в микро- и нанодиапазонах; б) – профилограммы в микро- и нанодиапазонах, в) – 3D-поверхность в нанодиапазоне

кония – оксид меди (рис. 4) и оксид алюминия – оксид меди (полученная структура аналогична приведенной на рис. 4), слой оксида меди является первичным. Данный феномен объясняется, по всей видимости, теми же механизмами, что приводят к образованию глобулярных структур в разбавленных полимерных. Диаметр глобул составляет 50–100 нм в плоскости подложки, однако в направлении Z характерный размер на порядок меньше и не превышает 10 нм. Образование глобулярной структуры наблюдается только при послойном нанесении оксидных покрытий. Был проведен ряд экспериментов по нанесению многокомпонентного покрытия с различными процентными содержаниями меди и циркония (в процентах по содержанию атомов металла): 5:95; 25:75; 50:50, во всех рассмотренных случаях образования глобулярной структуры не наблюдалось, были получены плотные высокоадгезионные покрытия. Также глобулярная структура не наблюдается в случае формирования однослойных покрытий оксида меди.

Характеристики рельефа исследованных покрытий на микро- и наномасштабе приведены в табл. 1. Независимо от материала подложки покрытия обладают малой собственной шероховатостью и хорошими оптическими характеристиками.

Альтернативный путь поверхностного фазообразования наблюдается для тер-

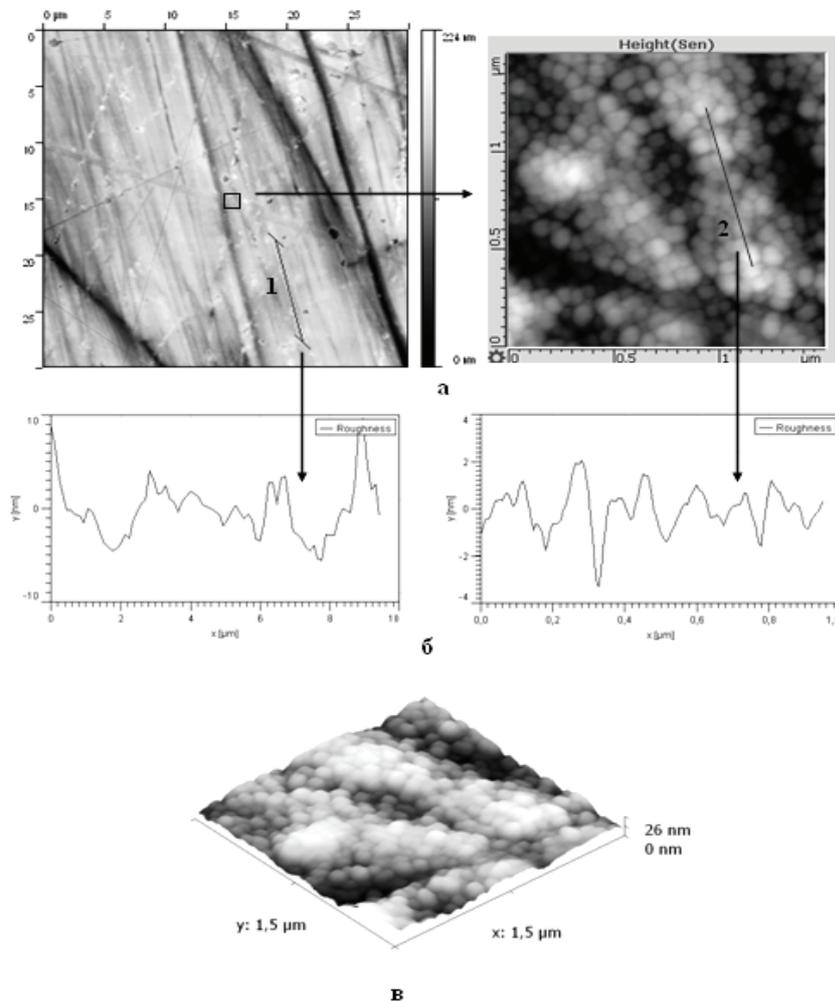


Рис. 4. Морфология поверхности и шероховатость двухслойного образца слой Zr + слой Cu на металлической подложке: а) – исследование поверхности в микро- и нанодиапазонах; б) – профилограммы в микро- и нанодиапазонах; в) – 3D-поверхность в нанодиапазоне

модеструкционных процессов пиролиза растворов ВИК-циркония с образованием диоксида циркония (рис. 1б), а также наноразмерных слоев  $Al_2O_3$ ,  $Y_2O_3$ ,  $Nd_2O_3$  и других оксидов редкоземельных элементов. Структура прозрачных слоев однородна, плотно сцеплена с поверхностью подложки из кварцевого стекла.

Сохранение сплошности адгезионных слоев является важным фактором эксплуатационного ресурса покрытий. Особенно критичным может быть различие термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) подложки и оксидного покрытия. Аномально низкие значения ТКЛР кварцевых стекол  $(3-5) \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$  при относительно высоких ТКЛР оксидов значительно осложняют наноразмерное модифицирование их поверхности термодеструкционным методом. К технологическим факторам, влияющим на нарушение сплошности покрытий, относятся повышение температуры термолиза и повторные циклы термообработки. При этом существенное значение имеет размер  $Z$  первичного оксидного слоя. При  $Z$  менее 100–200 нм однородность покрытия, как правило, сохраняется независимо от его состава.

Таблица 1

**Характеристики нанорельефа исследуемых оксидных покрытий**

Состав покрытия	Площадь сканирования 30 × 30 мкм <sup>2</sup>		Площадь сканирования 1.5 × 1.5 мкм <sup>2</sup>	
	$R_a$ , нм	$R_{max}$ , нм	$R_a$ , нм	$R_{max}$ , нм
Zr+Cu (95:5)	4.40	22.3	0.36	2.42
Zr+Cu (75:25)	3.30	34.6	0.12	0.68
Zr+Cu (50:50)	5.00	22.7	0.34	2.14
Zr+Y(95:5)	2.90	14.7	0.16	1.14
Al	1.70	10.5	0.49	3.54
Слой Zr + слой Cu	2.20	15.20	0.68	5.34
Слой Al + слой Cu	2.80	17.10	1.12	6.99
Слой Al + слой Cu	1.40	9.80	1.33	8.28
Подложка без покрытия	0.70	4.00	0.22	1.04

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО РЕЛЬЕФА НАНОУРОВНЕВЫХ ТЕРМОДЕСТРУКЦИОННЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ВЫСОКОГО ОПТИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА**

Эффективная реализация процессов радиационно-индуцированной люминесценции неразрывно связана с необходимостью получения чувствительных покрытий высокого оптического качества. При этом важным аспектом является не только качество синтезируемых оксидных покрытий, но и влияние на их рельеф собственной морфологии подложки. Приведенные данные по малой собственной шероховатости получаемых покрытий в сочетании с жидкофазной основой технологии химико-структурной модификации дают основание для проведения экспериментов по выравниванию рельефа подложек с существенной исходной шероховатостью  $R_a$  вплоть до  $R_a = 1$ .

Для изучения «эффекта выравнивания» были изготовлены образцы с покрытиями на основе оксида циркония и многокомпонентной композиции оксидов циркония-лития-неодима (нанесение осуществлялось в три слоя, чтобы создать по-

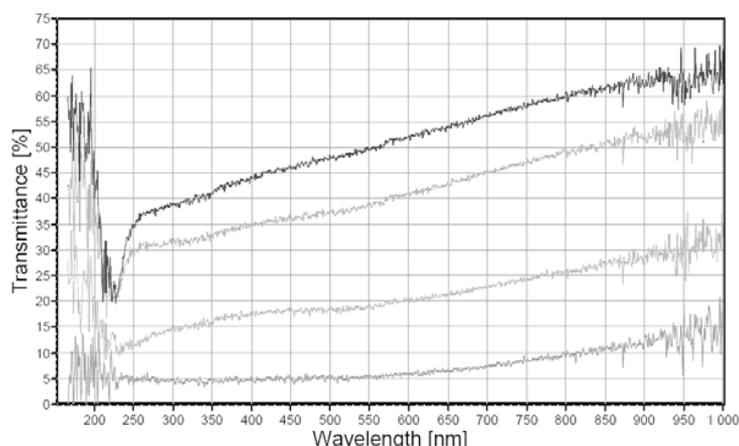


Рис. 5. Светопропускание кварцевого стекла до (1) и после (2–4) оксидного нанорельефного модифицирования: исходная шероховатость шлифованной поверхности  $R_a = 0,63$

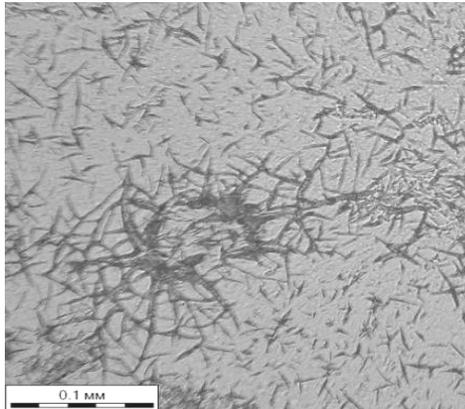


Рис. 6. Поверхность кварцевых образцов с исходной шероховатостью  $R_a = 0,63$  и покрытием из оксидов Zr-Li-Nb (6:3:1) в отраженном свете

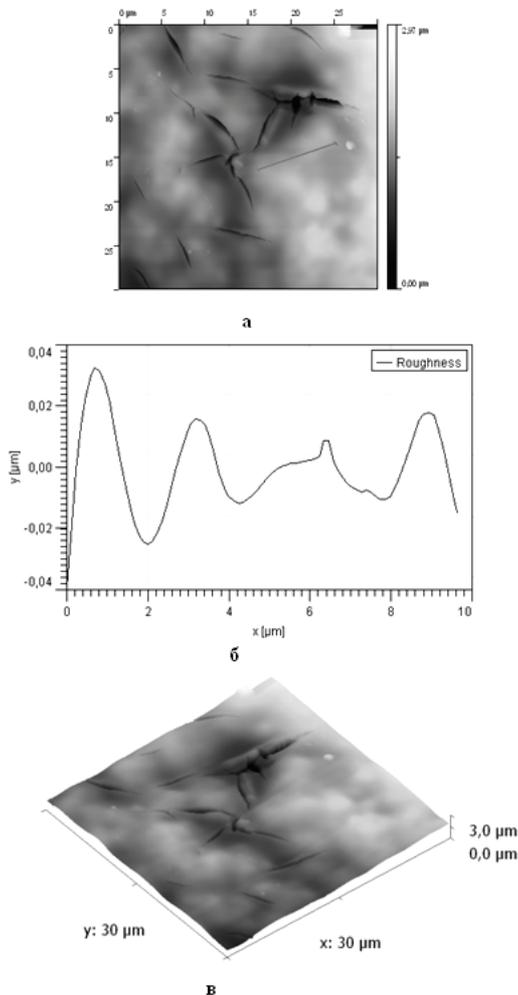


Рис. 7. Морфология поверхности и шероховатость образца а – № 155 Zr-Li-Nb (6:3:1) в исходном состоянии: а) – исследование поверхности в микро- и нанодиапазонах; б) – профилограммы в микро- и нанодиапазонах; в) – 3D-поверхность в нанодиапазоне

крытие с толщиной, сопоставимой с величиной шероховатости) на подложках с исходной шероховатостью  $R_a = 0,63$ , после чего проведены спектрофотометрические исследования полученных образцов, а также изучение поверхности на оптическом и сканирующем зондовом микроскопах.

Для шлифованного кварцевого стекла, поверхностно-модифицированного (трехкратно) оксидцирконий-иттриевой композицией, зеркальная составляющая прямого светопропускания в широком спектральном диапазоне многократно увеличивается (рис. 5). Выравнивание поверхностного рельефа выгодно отличает химико-структурную модификацию от физических методов нанесения покрытий, которые, как правило, копируют (наследуют) поверхностную структуру подложки.

Морфология поверхности после модифицирования исследована методом оптической микроскопии (рис. 6) и сканирующей зондовой микроскопии (рис. 7). На поверхности покрытия наблюдаются множественные дефекты в виде трещин, что является предсказуемым с точки зрения введенной типологии морфологических структур поверхности, и обусловлено его большой толщиной (свыше 600 нм) и разницей ТКЛР подложки и покрытия, приводящих к разрыву покрытия при остывании подложки. При проведении подобных экспериментов на подложках с большим ТКЛР, чем у кварцевого стекла, можно ожидать получения малодефектной или бездефектной структуры с светопропусканием, близким к стопроцентному во всей видимой области спектра, поскольку степень заравнивания рельефа достаточно велика.

### ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УЛЬТРАТОНКИХ РАДИАЦИОННО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В связи с выдвинутыми предположениями о причинах растрескивания покрытий и возможных путях нивелирования данного эффекта проведены исследования модуля упругости формируемых покрытий

Проведены испытания образцов на подложках из кварцевого стекла КУ-1 с покрытиями на основе оксидов циркония, алюминия, кремния, неодима и многокомпонентными покрытиями оксидов циркония-лития (2:1), циркония-иттрия (95:5), циркония-кремния (3:1), циркония-лития-неодима (6:3:1), а также испытана подложка без покрытия.

Измерение модуля упругости ультратонких твердых покрытий проводилось с помощью измерительного комплекса NanoTest 600 (Micro Materials Ltd., Англия). Прибор снабжен алмазным конусом, который имеет скругленную вершину, что позволяет провести испытание материала без его разрушения (в упругом диапазоне). На основании кривых «нагружение-разгрузка» получены механические свойства покрытия и подложек исследуемых материалов.

Эксперимент на приборе NanoTest 600 проводили по следующей методике. Исследуемый образец закреплялся на подложке при помощи клея и подводился к индентору. Индентирование образца проводилось в 10-ти точках с интервалом 30 мкм. Нагрузка увеличивалась с постоянной скоростью до достижения заданной максимальной нагрузки. Скорость индентирования менялась в соответствии с величиной максимальной нагрузки из расчета, что цикл нагрузки должен занимать 20 с. Затем максимальная нагрузка фиксировалась на пять секунд, и определялся так называемый «крип»-эффект, т.е. при фиксированной (постоянной) нагрузке происходило дальнейшее увеличение глубины индентирования. Разгрузка проводилась с той же скоростью, что и нагружение.

В экспериментах применялся конический индентор с углом при вершине 60° и радиусом закругления 10 мкм. Индентирование проводилось в режиме контролируемой нагрузки с преднагрузкой 0,1 мН. Снимались зависимости нагрузка-глубина индентирования на стадиях нагрузки и разгрузки.

Таблица 2

#### Результаты индентирования и расчета механических свойств покрытий (подложка – кварц)

№ образца	Состав оксидного покрытия	Максимальное внедрение (нм)	Максимальная нагрузка (мН)	Твердость (ГПа)	Модуль упругости (ГПа) (по Герцу)	Модуль упругости (ГПа) по модели двухслойного тела
1	Без покрытия	79,97612	10,001	4,518443	101,7291	
2	Zr	59,974787	10,001	6,222429	153,3643	199,36871
3	Zr-Y	67,39954	10,001	5,638944	130,4092	175,29315
4	Zr-Si (3:1)	63,78366	10,001	6,142187	138,1753	230,23543
5	Si	68,33947	10,001	5,630204	126,7802	171,46553
6	Al	70,29951	10,001	4,495416	128,5883	201,92130
7	Zr-Li (2:1)	71,35308	10,001	4,129502	131,5306	159,11389
8	Nd	76,2398	10,001	4,04323	115,5419	147,73455

Проведено испытание восьми образцов. Их характеристики представлены в табл. 2. На рисунках 8 и 9 изображены зависимости «нагрузка-разгрузка» для образцов с покрытием оксидом циркония-лития (рис. 8) и оксидом кремния (рис. 9). Кривые «нагрузка-разгрузка» для других покрытий аналогичны одной из двух вышеуказанных кривых.

Программное обеспечение измерительного комплекса NanoTest 600 включает в себя модули для расчета микротвердости и модуля упругости для однородных материалов. Для определения модуля упругости в случае конического индентора с фиксированным радиусом закругления основной является задача Герца, связывающая нагрузку, внедрение и механические свойства конуса и образца.

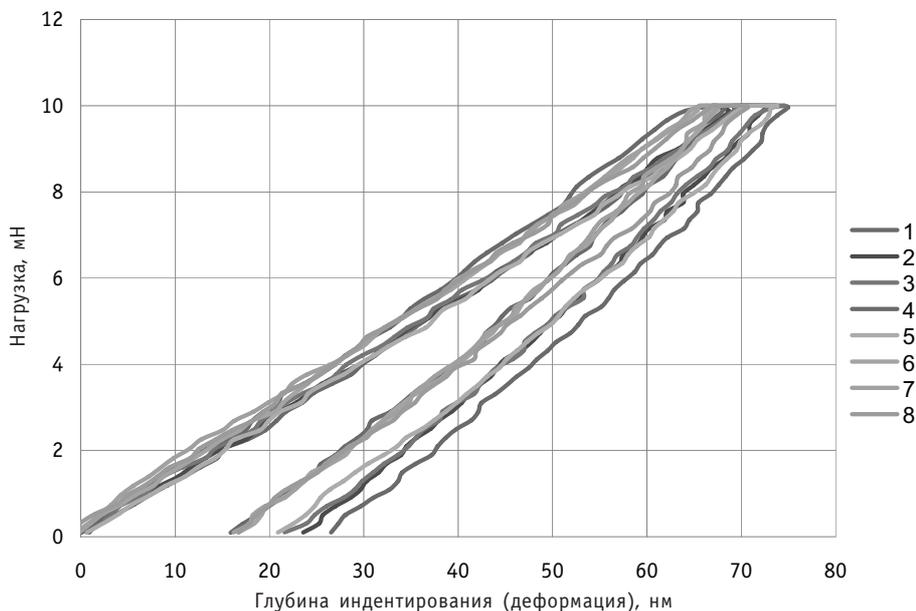


Рис. 8. Диаграмма нагружения-разгружения для образца с покрытием многокомпонентным составом Zr-Li (2:1) и восьми испытаний

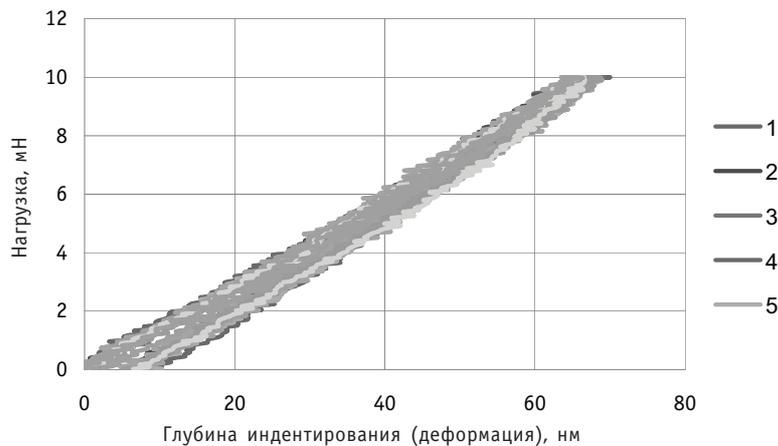


Рис. 9. Диаграмма нагружения-разгружения для образца с покрытием оксида кремния и десяти испытаний

Механические свойства характеризуются приведенным модулем упругости  $E_r$ :

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i}. \quad (1)$$

Здесь индексы  $s$  и  $i$  относятся к исследуемому материалу и материалу индентора соответственно. Свойства индентора определены производителем измерительного комплекса: модуль упругости  $E_i = 1200$  ГПа и коэффициент Пуассона  $\nu_i = 0.2$ . Коэффициент Пуассона кварца полагался  $\nu_s = 0.17$  (табличное значение).

Приведенный модуль упругости, в который входит и неизвестное значение  $E_s$ , определяется из соотношения

$$E_r = \frac{3}{4} P \sqrt{\frac{1}{R\delta^3}}, \quad (2)$$

где  $P$  – нагрузка (от 0 до 0.01Н);  $R$  – радиус закругления конуса (10мкм);  $\delta$  – внедрение. Твердость рассчитывается по методу Оливера-Фарра.

Следует отметить, что модуль упругости кварца в данном случае существенно превышает табличное значение, равное 70 ГПа. Для дальнейших расчетов было принято среднее значение  $E_s = 101.73$  ГПа.

Результаты индентирования для кварца без покрытия позволяют сделать вывод, что в выбранном диапазоне нагрузок пластической деформации материала не происходит (кривые нагрузки и разгрузки совпадают с точностью до погрешности эксперимента). Предполагается, что материал покрытия тверже, поэтому пластическая деформация покрытия тем более маловероятна. Результаты испытаний образцов с покрытиями на основе оксидов циркония, циркония-иттрия, циркония-кремния и кремния подтверждают эту гипотезу, и могут быть использованы для определения модуля упругости покрытия с высокой степенью точности. В то же время при индентировании образцов с покрытиями на основе оксидов алюминия, неодима, циркония-лития, циркония-лития-неодима наблюдалось заметное несовпадение кривых нагрузки и разгрузки (гистерезисные явления). Они могут быть обусловлены наличием в структуре покрытия дефектов либо мягких составляющих, подверженных пластической деформации даже при данных щадящих условиях нагружения, либо дефектов на границе раздела покрытия с подложкой и микроразрушением этой области исследуемого образца.

Данные факторы приводят к дополнительной погрешности при определении модуля упругости образцов с покрытиями на основе оксидов алюминия, неодима, циркония-лития, которая может достигать 15–20%, а результаты, полученные для образца с покрытием на основе оксидов циркония-лития-неодима, следует признать неприемлемыми для использования в расчетах.

В таблицу 2 сведены данные по определению модуля упругости и твердости покрытия (средние значения для 10-ти экспериментов по каждому покрытию).

При этом следует отметить, что твердость в данном случае является интегральной характеристикой, определяемой с помощью программного обеспечения комплекса «Нанотест» в предположении, что тестируемый материал однороден, т.е. этот результат является неточным и может быть использован только для сравнения покрытий между собой. При этом необходимо принимать во внимание толщину покрытия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают возможность создания новых функциональных материалов радиационной фотоники в виде ультратонких многокомпонентных оксидных покрытий технологией химико-структурного низкотемператур-

ного модифицирования неорганических поверхностей. основополагающими принципами получения радиационно-люминесцентных оксидных покрытий являются многокомпонентность, наномасштабирование и комбинаторность.

Рассмотрены основные типы морфологии химико-структурного модифицирования поверхностей, проведен анализ нанорельефа и шероховатости методом сканирующей зондовой микроскопии. Выявлены технологические закономерности образования наноуровневых оксидных слоев, которые позволяют получать функциональные покрытия, пригодные для применения в качестве оптических сред, радиационно-люминесцентных элементов систем детектирования и др. Проведены исследования заравнивания рельефа поверхности с исходной шероховатостью  $R_a = 0,63$ , исследован комплекс характеристик покрытий – оптическое качество в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне спектра, морфология и нанорельеф поверхности. Исследованы модули упругости различных одно- и многокомпонентных покрытий методом наноиндентирования с коррекцией результатов согласно модели двухслойного тела. На основании полученных результатов проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать вывод о перспективности применения технологии химико-структурной низкотемпературной модификации поверхности для получения новых функциональных материалов различного целевого назначения.

**Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и Российского фонда фундаментальных исследований (12-08-01171).**

### **Литература**

1. *Иевлев В.М., Миттова И.Я., Самсонов А.А., Томина Е.В., Кашкаров В.М.* Каталитический эффект нанослоя композита ( $V_2O_5+PbO$ ) в процессе термоокислительного окисления кристалла  $InP$ // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 417. – № 4. – С. 497-501.
2. *Никоноров Н.В., Сидоров А.И.* Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна: Учебное пособие. – СПб.: ГУИТМО, 2009. – 135 с.
3. *Ильин В.Г., Карапетян Г.О., Ремизов Н.В., Петровский Г.Т., Полянский М.Н.* Оптика градиантов// Успехи научной фотографии. – 1985. – Т. 23. – С. 106-121.
4. *Голованов В.Ф., Лисицкий И.С., Сахаров В.В.* Градиентные оптические среды для ИК-области// Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2002. – № 3. – С. 107-111.
5. *Холькин А.И., Патрушева Т.Н.* Экстракционно-пиролитический метод: получение функциональных оксидных материалов. – М.: КомКнига, 2006. – 288 с.
6. *Патрушева Т.Н.* Растворные пленочные технологии: Учебное пособие. – Красноярск, 2002. – 140 с.
7. *Сахаров В.В., Басков П.Б., Фролов Н.Н., Мосягина И.В.* Волоконно-оптическая отражательная спектрофотометрия наноразмерных оксидных слоев// Наноинженерия. – 2012. – № 2(8). – С. 35-40.

Поступила в редакцию 2.10.2012

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ОТВЕРЖДЕНИИ МАТЕРИАЛА-ФИКСАТОРА НА ОСНОВЕ ОКСИДА МАГНИЯ

**В.Я. Сухоносков\*, В.А. Чернов\*, Н.Ю. Богданов\*\***

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

*\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*

**Р**

Проведены экспериментальные исследования процессов кристаллизации при отверждении материала-фиксатора, получаемого путем смешивания жидкого алюмофосфатного связующего с порошком оксида магния. Показано, что первичной стадией структурообразования материала-фиксатора является коагуляционная структура аморфных частиц гидроокиси магния. Кристаллическая структура отвержденного материала формируется внутри аморфной фазы. Представлена кинетика накопления кристаллических фаз.

Исследуемый материал-фиксатор является пористым материалом. Аморфная пористая структура пронизана кристаллической структурой, включающей в себя как отдельные кристаллы, так и скопления пространственных кристаллических структур.

**Ключевые слова:** кристаллизация, материал-фиксатор, оксид магния, иммобилизация радиоактивных отходов, алюмофосфатные связующие, облученное ядерное топливо.

**Key words:** crystallization, clamp material, magnesium oxide, an immobilization of a radioactive wastes, alumophosphate binding, irradiated nuclear fuel.

### ВВЕДЕНИЕ

Материал-фиксатор на основе оксида магния используется для иммобилизации радиоактивных отходов [1]. В настоящее время подобный материал-фиксатор рассматривается для заливки межтрубного пространства облученных тепловыделяющих сборок. При длительном хранении ядерного топлива (в течение 50-ти лет) оболочки тепловыделяющих сборок и твэлов будут деградировать и разрушаться. В результате этого будут иметь место просыпи ядерного топлива в чехловых трубах, что не позволит обеспечить ядерную безопасность длительного хранения топлива.

Заливка межтрубного пространства тепловыделяющих сборок материалом-фиксатором, который способен к самоотверждению при комнатной температуре с образованием твердого механически прочного компаунда, позволит избежать

компактирования топлива при разрушении стальных оболочек. Материал-фиксатор должен обладать высокой текучестью в течение не менее часа, чтобы обеспечить заливку межтрубных зазоров с размерами до 5 мм без образования пустот. Кроме того, при самоотверждении материал-фиксатор должен образовывать достаточно прочный твердый материал с механической прочностью на сжатие, равной 10–40 МПа. Требования высокой текучести исходного материала и высокой механической прочности после отверждения являются противоречивыми.

Подробная рецептура и способ приготовления материала-фиксатора приведены в [2, 3]. Исходный материал-фиксатор получали путем смешивания жидкого алюмофосфатного связующего с порошком оксида магния. Как хорошо известно, при гидратации оксида магния в кислом водном растворе образуется пересыщенный раствор гидроксида магния. Релаксация термодинамически неравновесного состояния протекает за счет кристаллизации гидроксида магния.

Компромиссное решение поставленной задачи возможно путем замедления процессов кристаллизации на начальной стадии отверждения исходного материала за счет подбора рецептуры материала-фиксатора и соотношения оксида магния и жидкой компоненты в виде связующего.

Цель работы – исследование кристаллизации материала-фиксатора при его отверждении с учетом кинетики кристаллизации и образования пространственных кристаллических структур.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Жидкое алюмофосфатное связующее (Ж) и исходный порошок оксида магния (Т) брали в соотношениях Ж/Т= 0,6 и Ж/Т=0,8 и размешивали до получения однородной массы, которая является исходным материалом – фиксатором. Начальная температура исходных растворов была равна 17°C. Полученный раствор с Ж/Т= 0,6 является пластичным, но не обладает свойством текучести. Исходный раствор с Ж/Т= 0,8 обладает текучестью (жизнеспособностью) в течение одного-двух часов и вязкостью, равной 150–200 сСт [1]. В результате растворения оксида магния и его гидратации происходит разогрев раствора. Температура разогрева определялась с помощью термопары.

Степень гидратации отвержденных образцов определяли весовым методом. В форму в виде цилиндра заливали исходный раствор. Отверждение раствора проводили в течение суток, затем образец изымали и высушивали в термостате в течение одного часа при температуре 120°C. Затем образец охлаждали в эксикаторе в течение 20 мин и взвешивали. Для проверки полноты высушивания дополнительно сушили образец в течение 30 мин. После получения постоянной массы определяли степень гидратации образцов по формуле

$$\beta = (m_b - \Delta m) \cdot 100\% / m_b \quad (1)$$

где  $m_b$  – исходная масса воды в образце;  $\Delta m$  – потери воды при высушивании образца.

Для исследования кристаллической структуры образцов использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН с фокусировкой по Брэггу-Брентано, образцы облучались характеристическим рентгеновским излучением CrK. Определение фазы производилось по угловой координате рентгеновских пиков с использованием формулы Вульфа-Брэгга

$$n\lambda = 2d \sin\Theta, \quad (2)$$

где  $n$  – порядок дифракции;  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения;  $d$  – межплоскостное расстояние;  $\Theta$  – угол дифракции.

По межплоскостному расстоянию в кристаллической решетке определяли тип фазы. Количество фазы пропорционально интенсивности рентгеновского пика. Минимальное количество фазы, а также погрешность ее определения составляет 5%.

Исследование микроструктуры образцов проводили на цифровом сканирующем электронном микроскопе EVO 40 XVP с энергодисперсионным спектрометром фирмы Carl Zeiss (Германия). В силу того, что образцы не являются электропроводящими материалами, проводилась их подготовка для исследований. На поверхность скола образца напылялось покрытие из золота с помощью ионного напылителя SC7620 Mini фирмы Quorum Technologies (Англия). Дополнительно на боковую поверхность образца наносился углеродный или серебряный слой для стекания электронов. Конфигурация кристаллов отображалась на микрофотографиях.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

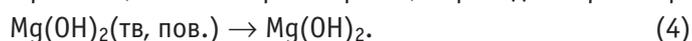
Экспериментальные термокинетические кривые представлены на рис. 1. Для раствора с  $Ж/Т=0,6$  максимальная температура разогрева, равная  $23^{\circ}\text{C}$ , достигалась в момент смешивания порошка  $\text{MgO}$  и водного раствора, а затем температура раствора практически линейно падала со временем отверждения раствора. Через 50 минут температура образца стала равной температуре окружающей среды. Разогрев раствора был равен  $6^{\circ}\text{C}$ .

Разогрев раствора с  $Ж/Т = 0,8$  носит качественно иной характер по сравнению с раствором с  $Ж/Т = 0,6$  – раствор разогревается постепенно, и максимальная температура, равная  $22^{\circ}\text{C}$ , достигается через 110 минут, а затем происходит остывание. В соответствии с общепринятой теорией гидратации цементных составов [4] данную зависимость можно интерпретировать в виде нескольких стадий гидратации.

Первая стадия – преиндукционная. Специфика растворения и гидратации окисла магния  $\text{MgO}_{\text{тв}}$  в кислых водных растворах состоит в том, что растворение протекает по топохимической реакции, т.е. гидроокись магния образуется на поверхности в виде отдельных очагов, которые со временем образуют сплошную пленку:



Гидроокись магния с поверхности, частично растворяясь, переходит в раствор:



Кроме реакции (1) протекает реакция переноса протона из раствора на поверхность окисла магния с образованием иона  $\text{Mg}^{2+}(\text{пов.})$ :



Поверхностный ион  $\text{Mg}^{2+}(\text{пов.})$  переходит в раствор в гидратированном виде  $\text{Mg}^{2+}(\text{aq})$ :



На первой стадии гидратации исходный раствор разогревается от  $17$  до  $20^{\circ}\text{C}$ .

Вторая стадия гидратации – индукционная. В результате реакции (3) поверхность окисла магния покрывается пленкой гидроокиси магния, и процессы растворения и гидратации замедляются. Это соответствует времени 10 мин после затворения порошка водным раствором (рис. 1). В конце этой стадии, соответствующей времени 75 мин, при растворении с поверхности  $\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{тв.})$  образуются в растворе зародыши кристаллизации. Реакция растворения  $\text{MgO}$ , таким образом, сводится к образованию гидратов на поверхности окисла и частичному переносу их в раствор.

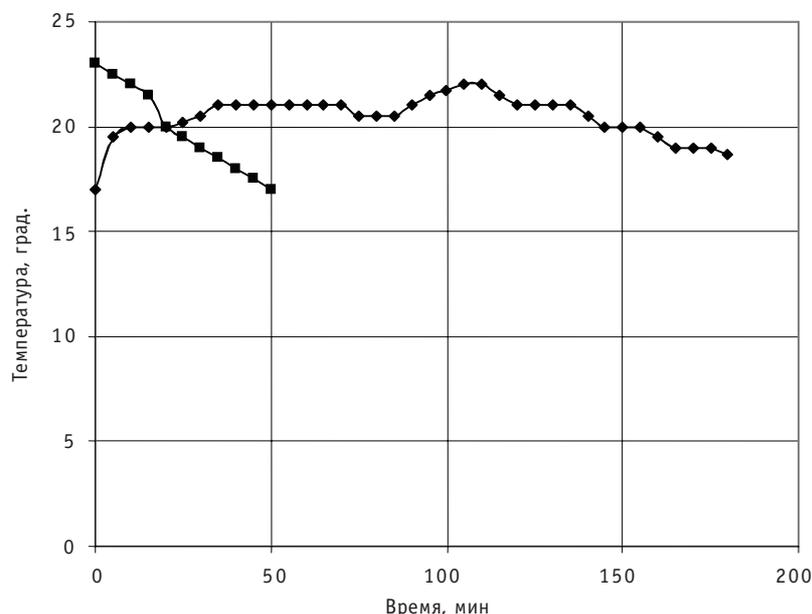


Рис. 1. Термокинетические кривые разогрева исходных растворов с Ж/Т = 0,6 (■) и Ж/Т = 0,8 (◆)

Третья стадия гидратации характеризуется ростом скорости реакций гидратации и повышением температуры до 22°C через 105 мин после затворения порошка. На этой стадии достигается пересыщение раствора гидроокисью магния, кристаллизация и отверждение исходного раствора.

В ходе этих экспериментов были определены временные интервалы стадий гидратации и степень разогрева исходного раствора.

Экспериментальные данные по определению степени гидратации образцов приведены в табл. 1.

**Степень гидратации отверждаемых образцов  $\beta$  в зависимости от соотношения Ж/Т и времени отверждения**

Таблица 1

Время отверждения, сут	1	3	5	7	28
$\beta_1$ (Ж/Т = 0,6)	13	58	65	66	73
$\beta_2$ (Ж/Т = 0,8)	22	69	75	76	81

Как видно из таблицы, степень гидратации образцов  $\beta$  приблизительно равна 80%, т.е. при приготовлении образцов 80% воды является химически связанной, а 20% соответствует капиллярной воде, которая при нагревании испаряется с образованием пор.

Капиллярные поры играют важную роль в структуре отвержденного материала.

Количество воды  $W$ , приходящейся на 1 г  $MgO$ , равно 0,26 и 0,38 г соответственно для образцов с Ж/Т = 0,6 и 0,8. Эти значения близки для портландцемента, для гидратации одной весовой части которого требуется 0,3 части химически связанной воды [5]. При приготовлении образцов нельзя использовать соотношение Ж/Т = 0,3 в силу того, что исходный состав не обладает не только текучестью, но и пластичностью, и требуется воды затворения значительно больше. Поэтому при

отверждении образцов образуется материал, имеющий пористую структуру. При увеличении степени гидратации исходного раствора в процессе отверждения уменьшается пористость материала и повышается его механическая прочность.

Механическая прочность на сжатие у отвержденного образца обратно пропорциональна Ж/Т [4], и может быть определена из эмпирической формулы

$$\sigma = k\beta/(\text{Ж/Т}), \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности. Эта формула устанавливает связь между процессами гидратации и структурообразованием. Ключевая роль в структурообразовании принадлежит процессам кристаллизации.

Экспериментальные данные, полученные методом рентгеновской дифракции, приведены на рис. 2. Как видно из дебаеграммы отверждающегося материала (Ж/Т = 0,6), через 30 мин после образования исходного раствора кристаллическая структура не образуется. На этой стадии микрочастицы гидроокиси магния  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  образуются в соответствии с реакциями (1)–(4) в аморфном виде и самопроизвольно коагулируют с образованием частиц (зародышей) шарообразной формы. Чем выше степень пересыщения исходного раствора, тем больше вероятность образования этих частиц. Таким образом, первичной стадией структурообразования является формирование коагуляционной структуры из продуктов гидратации.

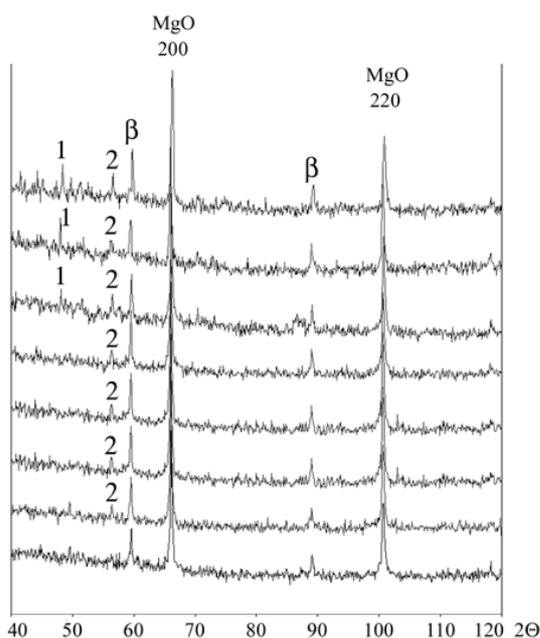


Рис. 2. Дебаеграммы материала (Ж/Т = 0,6) в зависимости от времени после затворения твердой фазы в жидкости (снизу вверх: 30, 60, 120, 180, 240 мин, 1 сут, 2 сут, 7 сут)

После 60 минут отверждения наблюдается пик образования кристаллической фазы гидроокиси магния, интенсивность которого со временем нарастает. Ранее нами было установлено [1], что через 60 мин вязкость исходного раствора материала-фиксатора существенно увеличивается. Эксперименты показывают, что рост вязкости раствора связан с началом кристаллизации аморфной фазы гидроокиси магния. Как видно из рис.2, через сутки наблюдается вторая кристаллическая фаза. По-видимому, она связана с процессами гидратации гидроокиси магния с образованием кристаллогидрата  $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , где  $n$  – константа. Образование второй

кристаллической фазы резко увеличивает степень кристалличности отверждаемых образцов и сопровождается ростом их механической прочности на сжатие, которая достигает 2–4 МПа. Кинетика образования кристаллических фаз в исследованных образцах приведена в табл. 2. Погрешность значений составляет  $\pm 0.05$ . Как видно из таблицы, процессы кристаллизации практически не зависят от соотношения жидкой и твердой компонент исходного раствора.

Таблица 2

**Относительные интенсивности кристаллических фаз в материале (нормированы на интенсивность линии MgO 200)**

Кристаллические фазы	Материал с соотношением Ж/Т = 0.6									Материал с соотношением Ж/Т = 0.8	
	30 мин	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч	1 сут	2 сут	7 сут	15 сут	1 сут	15 сут
Фаза 1	0	0,08	0,11	0,1	0,11	0,15	0,12	0,17	0,15	0,14	0,09
Фаза 2	0	0	0	0	0	0,13	0,23	0,23	0,25	0,14	0,2

Детальная структура отвержденного материала-фиксатора была получена на микрофотографиях с использованием сканирующего электронного микроскопа. Макроструктура отвержденных образцов с Ж/Т = 0,6 и 0,8 представлена на рис. 3.

**Коагуляционная структура** в виде пространственной сетки аморфной фазы хорошо видна на микрофотографиях. Самые большие макропоры с размерами в несколько сотен микрон являются воздушными порами, образованными воздухом, который захватывался исходным жидким материалом-герметизатором в момент его приготовления и перемешивания. Как видно на рис. 3, таких пор достаточно много, и чтобы улучшить структуру отвержденного материала, необходимо предусмотреть технический способ для удаления воздуха на стадии приготовления исходного раствора.

В процессе гидратации оксида магния и дальнейшего отверждения материала химически несвязанная вода диффундирует через гидратные образования и создает капиллярные макропоры, которые составляют основную долю пор. Это поры с размерами 1–10 мкм хорошо видны на микрофотографиях. В силу того, что ис-

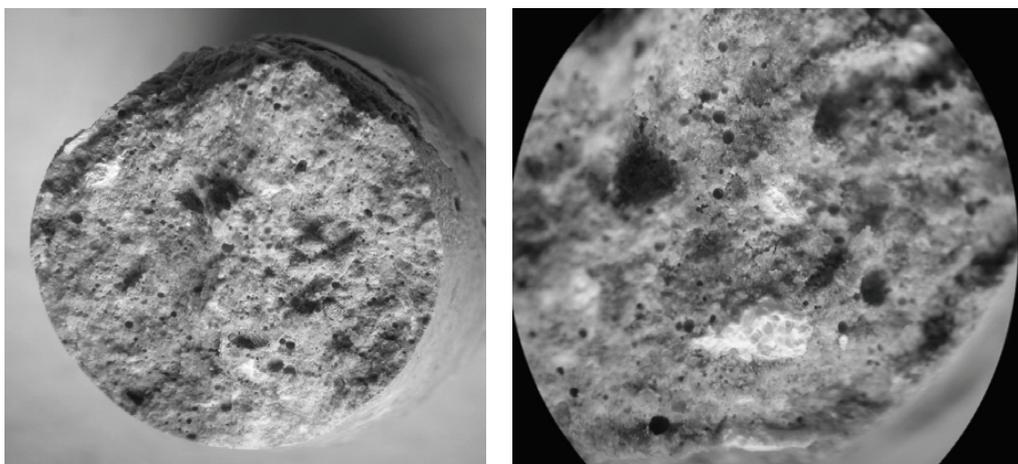


Рис. 3. Макроструктура отвержденных образцов с Ж/Т = 0,6 и Ж/Т = 0,8

ходный раствор всегда имеет химически несвязанную воду для обеспечения текучести, отвержденный материал-фиксатор является принципиально пористым материалом по способу его приготовления. Следует отметить, что на стадии формирования коагуляционной структуры при образовании высокодисперсных гидратных частиц между ними существуют не только макро-, но и микропоры с размерами 0,0015–0,03 мкм, которые относят к гелевым микропорам. Их наличие можно определить экспериментально по отгону адсорбционной воды из отвержденных образцов при температуре 400° и выше.

Таким образом, отвержденный материал-фиксатор имеет сложную коагуляционную структуру, пронизанную как микропорами (гелевые), так и макропорами (воздушные и капиллярные). Вторичная пространственная структура включает в себя кристаллические образования.

**Кристаллическая структура** образуется внутри коагуляционной структуры при дальнейшей релаксации термодинамически неравновесного состояния пересыщенного раствора в результате кристаллизации гидроокиси магния.

Из-за сильной неоднородности раствора на начальной стадии кристаллизации образуются очень мелкие кристаллы с сильно искаженной формой: иглы, усы и дендритные образования. На завершающей стадии кристаллизации образуются столь высокие концентрации кристаллов, что они начинают сростаться. Срастание отдельных кристаллов порождает термодинамически неравновесные кристаллические структуры, которые релаксируют и образуют протяженные кристаллы в виде пластин длиной до 10 мкм, иногда даже правильные прямоугольники. Кристаллическая структура отвержденного образца приведена на рис. 4. Образование кристаллов внутри коагуляционной структуры частично деформирует ее и придает ей механическое упрочнение. Материал при этом приобретает хрупкую прочность.

Увеличение числа кристаллов и возникновение контактов между ними порождают внутренние напряжения, которые в свою очередь вызывают образование микротрещин, что снижает механическую прочность материала. Как видно из рис. 4, толщина микротрещин равна от 0,5 до 2 мкм.

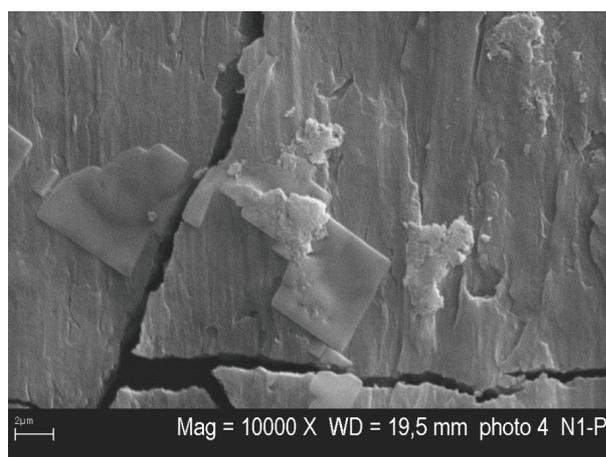
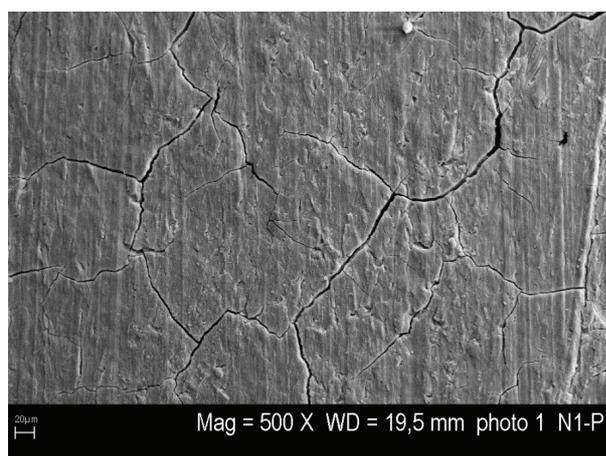


Рис. 4. Микроструктура поверхности образца с элементами кристаллизации, микротрещинами и пространственными агломератами

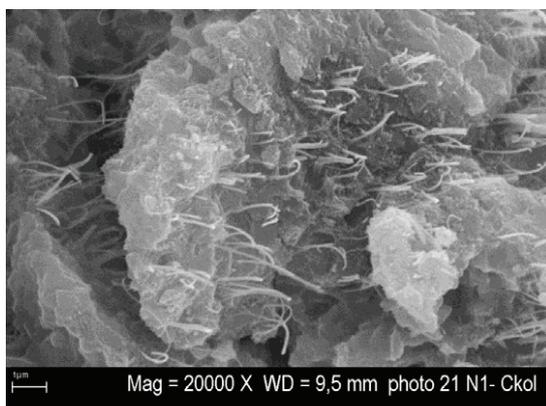


Рис. 5. Волокнистые образования, прорастающие из аморфной фазы

Матрица образца разбита микротрещинами на отдельные пространственные агрегаты, длина которых равна 200–300 мкм. Высокую прочность материала можно достичь при оптимальном соотношении коагуляционной структуры (аморфная часть) и кристаллизационной составляющей, причем аморфная часть структуры должна гасить внутренние напряжения кристаллогидратов.

Перекристаллизация первичной кристаллической структуры приводит к образованию вторичной кристаллической структуры в виде волокнистых кристаллов в направлении отвода тепла. На рисунке 5 представлены волокнистые образования, прорастающие из аморфной фазы. Такая структура образуется из кристаллов неправильной формы. При росте кристаллов их края скручиваются и формируются в виде трубок, отслаиваются от поверхности с образованием трубчатых кристаллов. Трубчатые кристаллы по мере роста образуют кристаллические волокна.

Кроме того, были обнаружены две пространственные кристаллические структуры еще более сложных форм. Первый тип кристаллической структуры приведен на рис. 6 и представляет собой сферическое скопление игольчатых кристаллов, имеющих диаметры от 10 до 40 мкм. Сферические скопления не перекрываются и образуют пространственные блоки. Вполне возможно, что сферические скопления являются образованиями групп кристаллов в капиллярных порах и поэтому имеют сферическую форму, повторяются по матрице материала и не пересекаются.

Второй тип кристаллической структуры представляет собой блоки волокнистых кристаллов (рис. 7).

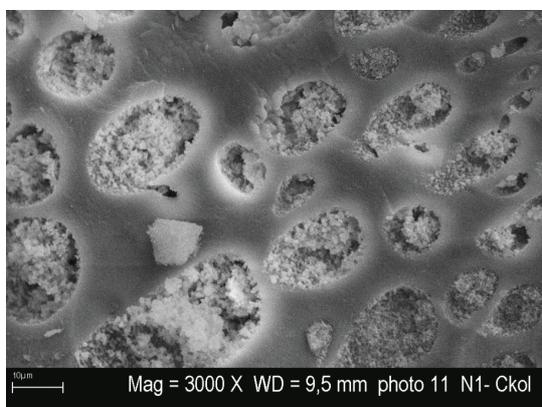


Рис. 6. Кристаллическая структура первого типа со сферическими скоплениями кристаллов

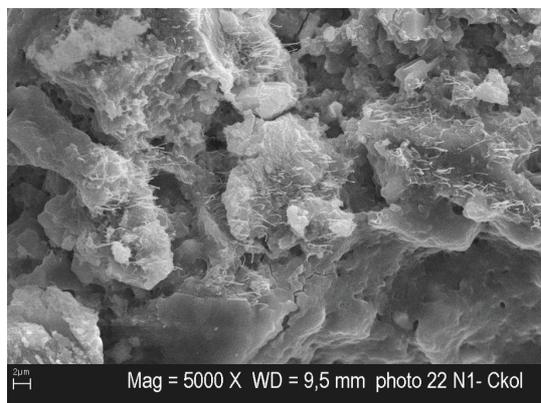


Рис. 7. Кристаллическая структура второго типа с блоками волокнистых кристаллов

Таким образом, структура отвержденного материала-фиксатора состоит из коагуляционной структуры аморфной фазы со сложной системой пор, включающей в себя как кристаллическую структуру отдельных кристаллов, так и скопления пространственных кристаллических структур. При этом вся матрица материала разбита микротрещинами на отдельные пространственные агломераты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований определена степень гидратации образцов, равная 80%, и показано, что 0,3 г химически связанной воды приходится на 1 г активного вещества MgO. Установлено, что первичной стадией структурообразования является коагуляционная структура, образованная в результате коагуляции аморфных частиц гидроокиси магния.

Кристаллическая структура формируется внутри коагуляционной через 60 минут отверждения материала. В начальный период кристаллизации образуются две кристаллические фазы в виде кристаллов  $Mg(OH)_2$  и их кристаллогидратов  $Mg(OH)_2 \cdot nH_2O$ . Представлена кинетика накопления кристаллической фазы.

Показано, что исследуемый материал-герметизатор является пористым материалом со сложной системой макро- и микропор. Аморфная пористая структура пронизана кристаллической структурой, включающей в себя как отдельные кристаллы, так и скопления пространственных кристаллических структур.

### Литература

1. Винокуров С.Е., Куляко Ю.М., Мясоедов Б.Ф. Имобилизация радиоактивных отходов в магний-калий-фосфатных матрицах // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2010. – Т. LIV. – С.81-88.
2. Сухонос В.Я., Николаев А.Н., Николаев С.А., Сомов И.Е., Суховерхова О.В., Чернов В.А. Кондиционирование негерметичного отработавшего ядерного топлива с помощью магнийфосфатного компаунда // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – №3. – С.3-8.
3. Сухонос В.Я., Николаев А.Н., Николаев С.А., Сомов И.Е., Суховерхова О.В., Чернов В.А. Магний-фосфатные фиксаторы для отработавшего ядерного топлива // РХЖ. – 2010. – Т. LIV. – №3. – С.89-93.
4. Сычев М.М. Неорганические клеи. – Л.: Химия, 1974. – 157 с.
5. Аршинов И.А., Васильев Г.А., Егоров Ю.А. Серпентинит в защите ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1972. – 238 с.

Поступила в редакцию 04.07.2012

## АНАЛИЗ ТЯЖЕЛЫХ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ С ПОМОЩЬЮ ВОКСЕЛЬНОГО АНТРОПОМОРФНОГО ФАНТОМА

**Д.Н. Моисеенко, Ю.А. Кураченко**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Для реконструкции доз при радиационных авариях использован новый подход, основанный на применении воксельного фантома тела человека, дающий возможность корректно дифференцировать дозовые нагрузки на органы и ткани пострадавшего, что не только позволяет уточнить основания эпикриза, но и имеет очевидное прогностическое значение. В качестве примера выбраны три тяжелых радиационных аварии недавнего прошлого. Полученные результаты в целом согласуются с данными, принятыми в мировом сообществе. В случаях отличия рассчитанных значений доз от литературных данных предложены возможные причины расхождений.

**Ключевые слова:** воксельный фантом, дозы при тяжелых радиационных авариях, перенос излучений, программа расчета методом Монте-Карло, детальное восстановление дозы.

**Key words:** voxel phantom, doses at severe accident, radiation transport, Monte Carlo code, dose differential reconstruction

### ВВЕДЕНИЕ

По данным МКРЗ, в последние 10–20 лет в мире ежегодно происходит в среднем одна-две радиационные аварии с тяжелыми последствиями. Эти аварии сразу же становятся объектами особого внимания мирового сообщества: физики, радиобиологи и клиницисты выполняют с максимально возможной скрупулезностью всесторонний анализ каждого инцидента. Для этого воссоздается «сценарий» аварии, с максимально возможной точностью восстанавливаются дозы, полученные пострадавшими, отслеживаются и анализируются истории болезни и ее эпикриз. Все это имеет неоценимое значение для различных прикладных дисциплин, в частности, и для будущего применения ядерных технологий вообще.

Кратко опишем три радиационные аварии недавнего прошлого. 17 июня 1997 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) произошла авария на стенде критических сборок ФКБН-2М [1–3]. Экспериментатор проводил контрольную сборку ранее хорошо изученной системы, содержащей в своем составе высокообогащенный уран и медный отражатель.

Будучи опытным работником, он был твердо уверен, что работает с хорошо известной ему системой. Начав сборку, он на каком-то этапе в чем-то засомне-

© Д.Н. Моисеенко, Ю.А. Кураченко, 2012

вался, разобрал часть конструкции и снова начал сборку, не поставив внутрь контрольный источник нейтронов. При этом была снижена чувствительность системы защиты. В момент, когда экспериментатор устанавливал медную полусферу, система уже была близка к критической. В этот момент полусфера выскользнула из рук (в резиновых перчатках) и упала на ранее собранную в нижней части стенда урановую сферу, расположенную в нижней половине медного отражателя. При этом перегруженная ураном нижняя часть сферы перешла через критическое состояние, что сопровождалось световой вспышкой, тепловой волной и срабатыванием аварийного сброса нижней части стенда. Поняв, что произошла самопроизвольная цепная реакция, экспериментатор быстро (за 5–10 с) покинул зал и закрыл защитные двери зала, изолировав его тем самым от смежных помещений. О происшедшем он тут же известил руководство, и был срочно госпитализирован. Несмотря на все усилия врачей, жизнь экспериментатора спасти не удалось.

20 февраля 1999 г. в г. Янанго на гидроэлектростанции, которая располагается в джунглях округа Сан Рамон примерно в 300 км от г. Лима (Перу), произошла тяжелая радиационная авария [4]. Утром этого дня сварщик с помощником приступили к восстановлению трубы диаметром 2 м. Около 15-ти часов сварочные работы были закончены, и через час рентгенолог-дефектоскопист приступил к инспекции сварных швов. Но оказалось, что установка не работает, капсула с источником  $^{192}\text{Ir}$  отсутствует в радиографической камере. Вскоре, уже в отсутствие дефектоскописта, капсула была найдена, и примерно в 16 часов сварщик подобрал ее и положил в задний правый карман брюк. После этого он продолжил работу, проведя много времени в трубе. При этом точное положение капсулы было не известно. В 22-00 он покинул рабочее место и отправился домой. Приехав домой примерно в 22-30, он снял брюки и пожаловался жене на боли в области ягодиц. Вскоре к нему домой пришел его начальник и, обнаружив пропавший источник, срочно отправил сварщика в поликлинику г. Лима.

Облучение оказалось крайне неравномерным, при этом, в основном, пострадала нижняя часть тела. Благодаря здоровому организму жизнь сварщика удалось спасти, но правую ногу все же пришлось ампутировать.

24 июля 1996 г. произошел несчастный случай на электростанции г. Гилан в Иране [5]. Рабочий обнаружил потерянный радиоактивный источник  $^{192}\text{Ir}$ , который использовался, как и в предыдущем инциденте, для контроля сварных швов. Примерно два часа он носил его во внутреннем нагрудном кармане, после чего почувствовал острую боль в груди и, вернув источник на место, отправился домой. Облучение оказалось неравномерным и, более того, не похожим на воздействие почти точечного источника (рис. 3). Рабочий потерял большую часть кожи на правой стороне туловища, но выжил.

По всем трем авариям учеными разных стран проводились дозиметрические исследования. Однако во многих случаях были получены лишь самые общие интегральные величины (например, средняя поглощенная доза в теле). Для реконструкции доз при описанных авариях авторы считают целесообразным использовать воксельный фантом тела человека и транспортный код (например, MCNP [6], позволяющий получить характеристики поля излучения методом Монте-Карло) для дифференциальной оценки доз в органах и тканях пострадавших. Следует ожидать, что воксельный подход в анализе радиационных аварий позволит не только скорректировать дозовые нагрузки на органы и ткани, но и даст возможность уточнить причины возникновения конкретных лучевых осложнений, в том числе летального исхода. Можно надеяться, что дифференцированная по органам и тканям дозовая нагрузка облегчит назначение необходимого лечения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Воксельный фантом

Воксельный фантом тела человека (или его части) есть отображение физического фантома в специально организованном тексте, доступном для восприятия компьютером. Типичный воксельный фантом – «сборка» из одинаковых по форме и размерам малых элементов (кубиков, параллелепипедов), моделирующих орган или ткань посредством заполнения соответствующим материалом. Если «сборка» моделирует тело человека целиком, этот фантом называется антропоморфным. В развитых странах создано около полутора десятков антропоморфных фантомов (мужчин и женщин, взрослых и детей), которые активно используются в прикладных областях. При этом предполагается применение (наряду с фантомом) программного кода для получения характеристик полей излучений. В упрощенном представлении воксельный фантом есть часть (обычно основная) файла входных данных для программы расчета характеристик поля излучения. Изготовление сколько-нибудь информативного фантома – весьма трудоемкое занятие, по сложности вполне сопоставимое с созданием развитого программного обеспечения. Области применения антропоморфных фантомов – дозиметрические задачи при лучевой и радионуклидной терапии и диагностике, контроле профессионального облучения и т.д. В нашей стране воксельные фантомы практически не используются, отечественных фантомов не существует.

В работе используется воксельный фантом VIP-Map [7] с размерами вокселя  $4 \times 4 \times 4$  мм<sup>3</sup>. Высота фантома составляет 186 см, масса 110 кг. Выбор данного фантома является не случайным: несмотря на относительно большой объем вокселя, фантом VIP-Map состоит из 62-х органов и тканей и полностью описывает тело взрослого человека. Существуют некоторые расхождения в росте и весе пострадавших в радиационной аварии людей и модели фантома (фантом выше и тяжелее), однако предполагается, что эти расхождения не внесут существенной ошибки в расчет.

Расположение рук фантома вдоль тела не позволяет провести расчет поглощенных доз на руки для первого случая (облучение на критической сборке). Для ускорения расчета (скорость счета существенно зависит от количества вокселей в фантоме) исходный фантом был несколько изменен – область тела от середины бедра до пяток была удалена (рис. 1).

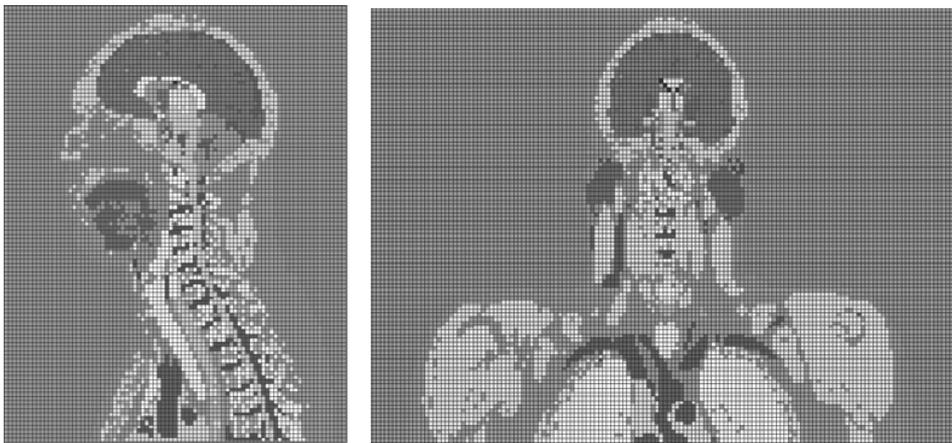


Рис. 1. Воксельный фантом VIP-Map (фрагмент). Изображения получены визуализатором MCNP

**Источники облучения**

В первом случае источником облучения (нейтронного и фотонного) явилась сфера урана, однако в литературе приводится энергетический спектр излучения, в котором уже учтены конечные размеры сферы, а также альбеда [1]. Упрощенная модель источника, представленная в [1], позволила по достаточно простой методике оценить значения доз при радиационной аварии. По этой причине вместо сферы неопределенных геометрических размеров авторы использовали редуцированный в [1] точечный изотропный источник с заданными характеристиками. Спектры излучения сферы представлены в табл. 1, 2.

Количество делений в сборке оценено величиной  $(5.05 \pm 0.85) \cdot 10^{16}$ . Расстояние от центра сборки до пострадавшего – 53 см. Относительная биологическая эффективность нейтронов такой энергии и при такой дозе мало отличается от единицы, и обобщенная эквивалентная доза фактически равна поглощенной дозе. Далее в тексте рассчитанные значения поглощенных доз для краткости фигурируют как «значения доз» без определения «поглощенных».

В двух других случаях

имеет место облучение гамма-квантами. В Янанго и Гилане капсулы, содержащие  $^{192}\text{Ir}$ , имеют малые размеры (рис. 2). Спектр фотонов  $^{192}\text{Ir}$  приведен в табл. 3.

Капсула с радиоактивным источником  $^{192}\text{Ir}$  находилась в кармане брюк перуанского сварщика в течение около семи часов. Находясь в заднем кармане джинсов, капсула с источником располагалась на расстоянии 2 см от бедра сварщика. Активность источника на момент облучения составляла 1.37 ТБк.

По утверждению рабочего из Ирана, радиоактивный источник находился у него в кармане в течение двух часов. Активность источника, по словам руководителей электростанции, составляла 185 ГБк. Источник располагался в нагрудном карма-

Таблица 1

**Энергетическое распределение нейтронов утечки, нормированное на одно деление в сборке**

Диапазон энергии, МэВ	Флюенс нейтронов/деление $\times 10^{-2}$
0 – 0.1	4.484
0.1 – 0.16	5.203
0.16 – 0.3	5.615
0.3 – 0.36	5.812
0.36 – 0.425	6.262
0.425 – 0.5	6.754
0.5 – 0.575	6.233
0.575 – 0.66	6.534
0.66 – 0.76	7.003
0.76 – 0.88	7.642
0.88 – 1	6.533
1 – 1.2	9.361
1.2 – 1.4	7.742

Таблица 2

**Энергетическое распределение гамма-квантов утечки, нормированное на одно деление в сборке**

Диапазон энергии, МэВ	Флюенс, гамма-квант/деление
0 – 0.05	0
0.05 – 0.1	4.56E-04
0.1 – 0.5	9.55E-02
0.5 – 0.7	5.08E-02
0.7 – 1.0	6.27E-02
1.0 – 5.0	1.41E-01
5.0 – 7.0	1.75E-03
7.0 – 10.0	1.81E-04

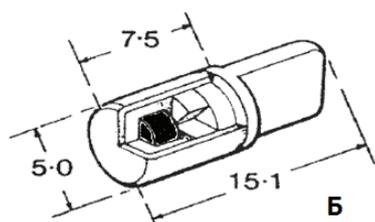
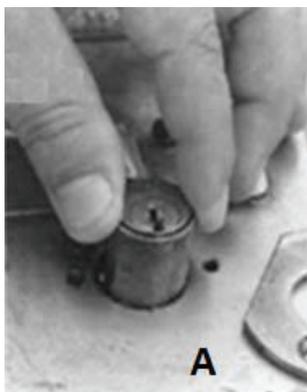


Рис. 2. А – фото источника  $^{192}\text{Ir}$ , облучившего сварщика из Перу, Б – схема источника  $^{192}\text{Ir}$ , облучившего рабочего в Иране (приведены габариты в миллиметрах)



Рис. 3. Радиационный ожог пострадавшего (Иран)

не рабочего комбинезона, однако характер лучевого ожога (рис. 3) говорит о том что, скорее всего, источник постоянно менял свое положение, перемещаясь в пределах кармана. Принимая во внимание этот факт, авторами были выбраны шесть точек на расстоянии 10 см от тела пострадавшего. Для каждой точки были получены значения доз, а итоговые результаты явились усреднением по всем точкам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

### Авария на критическом стенде в Сарове

Индикаторами качества расчета были следующие величины (табл. 4):

- доза нейтронов в области расположения дозиметра ГНЕЙС;

- средняя доза нейтронов (усреднение по всему телу);
- доза фотонов в области расположения дозиметра ГНЕЙС;
- доза фотонов в зубах.

Средняя доза нейтронов в теле в пределах погрешности согласуется с показаниями дозиметра. Доза фотонов в зубах также в пределах погрешности согласуется с результатами измерений. Доза фотонов в области расположения дозиметра оказалась выше показаний дозиметра. В целом можно считать, что выбранная модель расчета вполне адекватно описывает условия аварийного облучения. Опираясь на совпадения расчетных величин доз нейтронного и фотонного излучения, авторы получили оценки доз в остальных органах и тканях (табл. 5).

Таблица 3

### Спектр излучения фотонов $^{192}\text{Ir}$

Энергия, кэВ	Квантовый выход, %
62	1.218
63	2.103
65	2.67
67	4.57
76	1.99
206	3.34
296	28.72
308	29.68
317	82.71
468	47.81
484	3.187
589	4.517

Таблица 4

**Сравнение рассчитанных доз с полученными показаниями дозиметров исследователя [1]**

Доза, Гр	Литературные данные [1]	Расчетные значения
Грудь (нейтроны)	45 ± 5	44 ± 7
Грудь (фотоны)	3.5 ± 0.3	6 ± 1
Тело (нейтроны)	8 ч 11	11 ± 2
Зубы (фотоны)	4.5 ± 0.4	4.0 ± 0.7

Таблица 5

**Поглощенные дозы нейтронов и фотонов (числитель – нейтроны, знаменатель – фотоны)\***

Орган	Поглощенная доза, Гр	Орган	Поглощенная доза, Гр
Кости	4.2 / 3.1	Почки	4.1 / 4.3
Серое вещество	7.7 / 2.2	Поджелудочная железа	7.8 / 6.5
Белое вещество	7.6 / 2.3	Селезенка	3.2 / 3.7
Кровеносная система	14.1 / 6.2	Мочевой пузырь	4.6 / 3.3
Пищеварительная система	17.2 / 4.2	Сердце	17.1 / 7.2
Эндокринная система	14.4 / 5.4	Надпочечники	4.0 / 4.7
Пищевод	10.7 / 5.7	Мочевая система	4.1 / 3.9
Глаза	29.5 / 3.3	Хрусталик глаза	35.2 / 3.3
Мышцы	9.0 / 3.1	Зрительный нерв	12.7 / 3.3
Нервная система	7.4 / 3.5	Красный костный мозг	6.8 / 3.6
Гонады	11.9 / 2.5	Щитовидная железа	28.8 / 5.7
Предстательная железа	2.3 / 2.5	Легкие	13.1 / 5.1
Респираторная система	20.2 / 5.6	Стенки желудка	13.3 / 7.0
Кожа	17.4 / 2.7	Желчный пузырь	14.3 / 7.2
Верхний отдел толстой кишки	16.3 / 6.7	Печень	9.9 / 6.0
Нижний отдел толстой кишки	6.8 / 4.6	Прямая кишка	1.6 / 2.0
Тимус	24.6 / 6.8	Тонкая кишка	11.5 / 6.1

\* – относительная ошибка значений составляет 17%

Литературные данные по аварии в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) оказались достаточно точными для адекватной расчетной реконструкции условий облучения; рассчитанные значения дозы соответствуют полученным ранее расчетным и экспериментальным данным.

Несмотря на антропометрические различия пострадавшего и воксельного фантома VIP-Man использование воксельного фантома VIP-Man позволяет получить вполне удовлетворительные результаты расчета доз.

### Облучение в Янанго

Дозиметрическое обследование пострадавшего было осуществлено тремя группами исследователей:

- Instituto de Enfermedades Neoplasticas (INEN, Перу);
- Institut de Protection et de Surete Nucleaire (IPSN, Франция);
- REACT/TS (США).

Первые оценки доз были получены с помощью планирующей системы Prowess 3000 [8] в INEN [9]. В таблице 6 представлено сравнение распределений поглощенных доз по глубине, полученных в INEN и в настоящей работе.

Таблица 6

#### Распределение дозы по глубине

Глубина в ткани, см	Доза (INEN, литературные данные), Гр	Поглощенная доза (расчет, настоящая работа), Гр
1	9966	10101
2	2508	2513
3	1110	1104
4	617	613
5	388	386
6	265	263
7	191	189
8	143	140
9	111	110
10	88	87
18	23	26
20	18	22

Группа из Франции использовала аналитический фантом (т.е. описание средствами аналитической геометрии) совместно с кодом метода Монте-Карло. Исследователи из США провели схожие симуляции, используя компьютерный код Монте-Карло MCNP 4B вместе с аналитическим фантомом MIRD [10]. Сравнение полученных значений доз представлено в табл. 7. В целом дозиметрические характеристики для этого случая должны рассматриваться лишь как весьма приближенные из-за сложности геометрии источник-органы и неопределенности положения капсулы во время облучения [4]. Однако благодаря удовлетворительной согласованности большинства значений доз можно провести прямое сопоставление. Следует заметить, что аналитический фантом MIRD не очень подходит для определения доз в гонадах вследствие значительного экранирования за счет тканей нижних конечностей, поэтому значение дозы гонад получается заниженным.

Таблица 7

#### Сопоставление доз фотонного излучения (Гр)

Орган	INEN	IPSN	REACT/TS	Данная работа
Кожа	9966	11752	10080	10101
Сигмовидная кишка	–	–	22	5
Гонады	23	28	11	24
Мочевой пузырь	18	21	16	17

Как видно из табл. 7, в работе были представлены значения доз, близкие к ранее полученным расчетным значениям. К сожалению, значение дозы для сигмовидной кишки получено лишь одной группой исследователей, поэтому полноценное сопоставление не представляется возможным. Четырехкратное различие может быть объяснено тем, что фантом MIRД весьма условно описывает нижние конечности и ягодичные мышцы – два усеченных конуса, в то время как фантом VIP имеет анатомически верное описание.

Дозы в других органах и тканях весьма малы (менее 1 Гр) и поэтому их значения не представлены в табл. 8.

Таблица 8

#### Дозы фотонного излучения, полученные в настоящей работе

Орган	Доза, Гр	Орган	Доза, Гр
Прямая кишка	36.4	Предстательная железа	27.7
Красный костный мозг	7.8	Нервная система	10.6
Тонкая кишка	2.4		

Литературные данные являются достаточными для адекватной расчетной реконструкции геометрии облучения. Рассчитанные дозы фотонного излучения соответствуют полученным ранее литературным данным.

Несмотря на антропометрические различия пострадавшего и воксельного фантома VIP-Map использование воксельного фантома позволяет получить вполне удовлетворительные результаты расчета доз.

Отметим, что при выполнении работы получены дозы фотонного излучения для большого количества органов и тканей, в том числе критических, таких как красный костный мозг.

#### Облучение в Гилане

По внешним признакам (острая боль в груди и тошнота) можно предположить дозу на тело, примерно равную 2 Гр. Однако исследовательская группа, занимавшаяся расчетами для этого аварийного случая (Institut de Protection et de Surete Nucleaire (IPSN, Франция)), получила верхнюю оценку дозы, равную 600 мГр. В настоящей работе средняя доза на тело составила 200 мГр. Как и у французской группы, у авторов появилось сомнение в достоверности указанной активности источника (185 ГБк).

Кроме того, вызывает сомнение и описание геометрии облучения. Так, например, пострадавший ничего не говорит о точечных ожогах на правом бедре и локте правой руки. Каждый из этих ожогов, как можно визуальнo оценить, соответствует дозе ~ 40 Гр.

Таблица 9

#### Глубинное распределение дозы за два часа облучения

Глубина, см	Доза (вплотную к телу), Гр	Доза (на расстоянии 10 см от тела), Гр
0.1	245	3.2
1	75	2.7
2	32	2.2
3	18	1.9

С учетом активности источника была получена оценка глубинного распределения доз  $^{192}\text{Ir}$  на расстоянии в 10 см от тела и вплотную (табл. 9).

Используя данные табл. 9, можно получить время облучения, необходимое для накопления дозы, равной 40 Гр. Оно составляет примерно 20 минут для источника, расположенного вплотную к телу, и 25 часов – на расстоянии 10 см.

Единственно разумным обоснованием получившегося противоречия является предположение о несоответствии активности источника заявленному значению. По всей видимости, реальная активность источника на момент облучения составляла, по крайней мере, 1.11–1.85 ТБк (т. е. в 6–10 раз больше заявленной).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С помощью модельных расчетов и воксельного фантома VIP-MAN удалось восстановить условия облучения для трех радиационных аварий. Результаты расчетов согласуются с результатами, полученными другими исследовательскими группами, и с показаниями аварийных дозиметров.

В особенности хорошо согласуются результаты, полученные для облучения на критической сборке в г. Сарове. Это обусловлено исчерпывающим по полноте и точности описанием условий облучения (ход аварии, характеристика источника, геометрия облучения и т. п.). При этом авторами были получены дифференциальные дозы в органах и тканях пострадавшего, которые могут быть использованы для лучшего понимания связи клинических проявлений облучения и дозы в конкретном органе и ткани.

К сожалению, при решении третьей задачи (облучение рабочего в Иране) были получены противоречивые результаты. По всей видимости, ошибка кроется в недостоверных данных, касающихся активности радиоактивного источника.

Выполненное расчетное исследование показало целесообразность и продуктивность применения прецизионных методов реконструкции радиационных аварий, сочетающих использование модели антропоморфного воксельного фантома и программу расчета транспорта излучений.

### **Литература**

1. *Punin V.T., Smirnov I.G., Zikov S.A.* Failure on the stand of a critical assembly in the Russian Federal Nuclear Centre VNIIEF (Information)//Atom. Energy. – 1997. – V. 8. P. 154-156 (in Russian).
2. *Khodalev G.F., Tarasov E.Yu., Zhitnik A.K.*, Exposure of a victim in an accident with a critical assembly in the Russian Federal Nuclear Centre VNIIEF//J. Atom. Energy. 1998. – V. 8. – P. 153-158 (in Russian).
3. The criticality accident in Sarov, IAEA, VIENNA, 2001, ISBN 92-0-100101-0.
4. Follow-up of delayed health consequences of acute accidental radiation exposure, Part 4, IAEA, VIENNA, 2002, ISBN 92-0-133202-5.
5. The radiological accident in Gilan, VIENNA, 2002, ISBN 92-0-110502-9.
6. *Briesmeister Ju.F.* MCNP (A General Monte Carlo N-Particle Transport Code) Users Manual, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13709-M, Version 4C UC 700 (April 10, 2000).
7. *Xu X.G., Chao T.C. and Bozkurt A.* VIP-Man: An image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the Visible Human Project for multi-particle Monte Carlo calculations, Health Phys, 78, 476, 2000.
8. <http://www.prowess.com>
9. <http://www.inen.sld.pe>
10. *Snyder W.S., Ford M.R. and Warner G.G.* MIRD Pamphlet No. 5, Revised Estimates of specific absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom, New York: Society of Nuclear Medicine, 1978.

Поступила в редакцию 21.11.2012

**ABSTRACTS OF THE PAPERS****УДК 621.039.51**

*New Technique to Reformat Multigroup Cross-Sections for Monte-Carlo Calculation* \I.R. Suslov, I.V. Tormyshev, K.G. Mel'nikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 21 titles.

New method to calculate equiprobability bins from Legendre expansion scattering cross-sections is proposed. The method uses a correction of equiprobability bins boundaries to provide a conservation of the first angular moment. The code CRSRD-ST to reformat cross sections from DTF to ACE format with proposed technique is developed. Numerical results shows the method proposed significantly improves an agreement between deterministic and Monte-Carlo calculations.

**УДК 621.039.51**

*Boundary Resonance Effects in the Fast Reactor with the Heterogeneous Core* \A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 10 titles.

Boundary resonance effects is considering with the application of the high-speed subgroup approximation technique employment in practical tasks for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants with the heterogeneous core.

**УДК 621.039.51**

*Energy Deposition Evaluation in the Target with Uranium-Containing Material for the <sup>99</sup>Mo Production in WWR-C Reactor with the Improved Design of Target* \O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

Increased production of the <sup>99</sup>Mo in the context of rising global demand is an urgent task. The new type of target for <sup>99</sup>Mo producing in WWR-c reactor technological channels was developed. A series of calculations to estimate energy deposition for standard and modified target were done. A considerable energy deposition increasing in modified target was found.

**УДК 621.039.56**

*Method of <sup>16</sup>N Generation for Test of Radiation Controlled Channels on Nuclear Power Stations with Water-Cooled Reactors* \V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, P.A. Dvornikov, B.V. Zhuravlev, S.N. Kovtun, T.A. Khromyleva, A.V. Pavlov, N.G. Roschin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

The preferences of <sup>19</sup>F(n,α)<sup>16</sup>N nuclear reaction use for radiation control channels test on water-cooled power reactors are analyzed. The new measurements for more accurate determination of <sup>19</sup>F(n,α)<sup>16</sup>N reaction cross section energy dependence have been carried out. A set of new methods for background reducing and improvement of events determination reliability was developed.

**УДК 621.039.524.44:697.93**

*Calculation-based Justification for the Algorithm of Pipelines Leak Control by Air Humidity* \P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.A. Budarin, V.P. Polionov, N.N. Titarenko, D.M. Shvetsov, N.G. Roshchin, A.L. Matveev, E.L. Matveev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 9 titles.

Dynamic processes in thermal insulation of power plants pipelines caused by depressurization are the goal of the research. Simulation of various leaks was realized by using adapted computer code KUPOL-M developed in SSC RF IPPE.

**УДК 621.039.58**

*Analysis of the Errors Committed by NPP MCR Operators during Implementation of Operating Procedures* \N.V. Pleshakova, A.N. Anokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya

*energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 13 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 22 titles.*

The present paper concentrates on the problem of errors committed by NPP MCR operators during implementation of operating procedures. It is proposed to categorize such errors into four classes as follows: selection of inappropriate procedure, incorrect execution of procedure, navigation errors, and communication errors. These categories of errors have been described and analyzed in detail in the paper. Each type of errors is illustrated by the real examples. The causes of the errors have been also investigated. It was revealed that a weaknesses of procedures is the main contributor to the committed errors. The following two aspects of two-column symptom-oriented procedures that impact on the operator activity were revealed: complicated logic which underlie the transition from the left column of procedure to the right one; and absence of tools for visual emphasis of procedure elements.

#### **УДК 661.879:541.183**

*Adsorption of Molecular Iodine from Gas-aerosol Environments and Water Solutions with a New Type of an Aluminum-Silicate Sorbent | V.A. Shilin, A.B. Gorgienko, A.S. Shilina, V.K. Milinchuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 9 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 13 titles.*

In the article presents the results of studies of sorption of iodine vapor from the gaze-aerosol media on aluminosilicate sorbents in static and dynamic modes. The sorption capacity of vapor of molecular iodine is  $234 \pm 1.0$  mg/g. Factor extraction of iodine from the aerosol media during sorption under dynamic conditions is  $99.5 \pm 0.2\%$ . The sorption capacity of silica-alumina sorbent for iodine, dissolved in water is  $254 \pm 12$  mg/g. Aluminosilicate sorbent, modified  $\text{Ag}_3\text{CuI}_4$ , has a high ice-forming activity.

#### **УДК 621.039.53**

*Experimental Investigations of Vertical Turbomachine Catcher Bearings | S.E. Belov, M.N. Borovkov, N.G. Kodochigov, E.G. Novinskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.*

It is a challenging engineering task to develop the GT-MHR reactor plant turbomachine catcher bearings aimed at retaining in geometric axis a flexible vertical rotor having large mass and diametrical dimensions in case of electromagnetic bearings power supply failure. The novelty and relevance of the task is determined by specific feature of turbomachine configuration, high safety requirements for bearing assemblies and absence of experience in developing such bearings worldwide. Verification of analytical procedures requires performance of comprehensive experiments in a stepwise fashion starting from small-scale models to full-scale catcher bearings specimens. For this purpose, it has been planned to perform a set of R&D activities within the GT-MHR Project.

This paper deals with the program of R&D activities aimed at development of catcher bearings for the GT-MHR turbomachine as well as some results of performed activities. The experience which is being gained as a result of this investigation program implementation can also be used in other mechanical engineering industries associated with development of vertical and dynamic machines.

#### **УДК 621.039.564**

*On Electrode Polarization of Electrochemical Oxygen Sensor in Liquid Metal Coolants | Yu.A. Musikhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 28 titles.*

The paper considers the main provisions of thermodynamic oxygen activity control in liquid metal coolants by the EMF method by means of a two-electrode electrochemical oxygen sensor with a solid oxygenated electrolyte which is in contact with the coolant and at the same time is a working electrode of the sensor. The sensor EMF is proportional to the oxygen activity logarithm. It has been noted that absorption of metallic impurities and oxides on the electrolyte causes polarization of the working electrode, thus reducing the EMF value and deteriorating the oxygen control accuracy. The polarization process was shown to be multifactorial and localized within the limits of double electric layer that results from the difference in the work functions of the contacting phases. The double layer characteristics are presented. The analytical dependence values were calculated for the electron work function from the solid electrolytes and metal oxides.

**УДК 621.039.58: 356.24**

*Thermodynamic Cycles of NPPs Operated with Supercritical Water* \V.M. Abdulkadyrov, G.P. Bogoslovskaya, V.A. Grabejnaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 7 pages, 1 illustration. – References, 22 titles.

**УДК 621.039.586**

*Experimental Researches of the Processes Accompanying an Accident «The Intercontour Leak of a Steam Generator» for Fast Reactor with HLMC* \A.V. Beznosov, T.A. Bokova, O.O. Novozhilova, A.K. Matjunin, V.L. Khimich, S.N. Pichkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 7 illustrations. – References, 3 titles.

Results of experimental and settlement-theoretical studies of the processes accompanying an intercontour leak of a steam generator for power installations on lead or lead-bismuth coolants are presented. The results of research the processes of appearing a micro-, operational and acceptable, and a large leak of the working body in the reactor loop and recommendations of the actions of operational personnel in similar accidents are given. A review of experimental studies carried out at NNSTU on the structure and characteristics of two-component flows at different flow the working body in the flow of lead and lead-bismuth coolant at a temperature of 600 °C, flow rates from 0.1 to 5.0 m/s, the content «light» phase 1–3% to 50% by volume is presented.

**УДК 621.039.534**

*The Use of Coolants Pb and Pb-Bi in the New Technologies of Recycling Solid, Liquid and Gaseous Media* \V.V. Ulyanov, V.A. Gulevsky, P.N. Martynov, A.S. Fomin, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, S.-A.S. Niasov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The results of studies demonstrating promising use of heavy liquid metal Pb and Pb-Bi in the new technologies of production steam, fresh water, light oil fractions, hydrogen, synthesis gas, and other technology products.

Developed and tested model samples vaporizer and water desalination with direct-contact liquid metal heat input. The test results showed the advantages the developed prototypes over direct-contact models developed in Japan.

Manufactured and tested demonstration samples hydrogen generators based on the processes of electrochemical decomposition of water and oxide conversion of hydrocarbon gases in the lead coolant. Revealed that more preferable to the further development is the hydrogen generator based on electrochemical decomposition of water.

Substantiated perspective of studying the processes of interaction oil products (fuel oil, bottoms, tar sands, etc.) with heavy coolant in terms of depth of refining oil and oil products.

**УДК 621.039.53**

*Structural Studies of 15H2NMF AA Steel and its Welds after Long Thermal Exposures and Irradiation at the Operating Temperature of Reactor Pressure Vessel* \B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, D.A. Maltsev, S.V. Fedotova, A.A. Frolov, O.O. Zabusov, M.A. Saltykov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 12 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 8 titles.

A complex of microstructural studies (TEM, SEM and Auger) of VVER-1000 surveillance samples of the temperature sets in the initial state, after long thermal exposures (up to 180 000 hours) and irradiation was conducted in this paper.

It was shown that in non-irradiated elements of RPV the critical brittleness temperature shift can be caused by the development of reversible temper brittleness. Herewith its contribution to the total embrittlement of the material increases with increasing of operation time and can be decisive at extending the lifetime of VVER-1000 RPV up to 60 years and more. The level of grain-boundary segregations in various states was established. It is experimentally shown that radiation-enhanced diffusion of phosphorus to grain boundaries is observed in RPV steels.

**УДК 621.039.534**

*Effect of Pre-Treatment on the Oxidation Rate Steel in the Lead-Bismuth Coolant* \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 visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 82 titles.

Comparative tests on the oxidation of the samples austenitic stainless steel (18% Cr and 8% Ni) as received and after mechanical polishing in gases (technical argon and water vapor) and the coolant Pb-Bi. By conducting metallophysical studies have shown that mechanical polishing significantly reduces the rate of oxidation of the sample surface. This effect is particularly noticeable in the oxidation of steel in heavy coolant.

**УДК 621.039.53**

*Chemical Synthesis of Neutron-Detecting Ultrathin Optical Materials* \V.V. Sakharov, P.B. Baskov, I.V. Mosyagina, N.N. Frolov, I.I. Kurbatkin, T.I. Muravyeva, E.V. Torskaya, O.V. Ivkina, M.A. Sharipova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 13 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 7 titles.

The results of problem-oriented research on innovative low-temperature chemical thermodecompositional surface modification technology for new radiation photonics materials (radiation fluorescent nanolayer oxide coatings) development are shown. Basic nanoscale multicomponent oxide coatings structural types are determined and carefully studied using an atomic force microscope. The formation of globular structures in the two-layer coating with copper oxide surface layer is revealed. The main principles of oxide coatings structure formation are given. The ability of chemical-structural modification technology for modified objects surface micro and nano-relief smoothening is found. The elastic moduli of nanoscale oxide coatings are obtained using the two-layer body model.

**УДК 621.039.7**

*Researches of Crystallization Processes under Hardening of Clamp Material Based on the Magnesium Oxide* \V.J. Suhonosov, V.A. Chernov, N.J. Bogdanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 9 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References, 5 titles.

Experimental researches of crystallization processes under hardening of clamp material received by mixing liquid alumophosphate binding with magnesium oxide powder are conducted. It is shown that a primary stage of structurization of a clamp material is the structure of amorphous particles of magnesium hydroxide. The crystal structure of hard material is formed in an amorphous phase. The process of crystal phases accumulation is shown.

The investigated clamp materia is a porous material. The amorphous porous structure is penetrated by the crystal structure, including both separate crystals, and congestions of spatial crystal structures.

**УДК 621.039.586**

*Radiation Accidents Analysis with the use of Anthropomorphic Voxel Phantom* \D.N. Moiseenko, Yu.A. Kurachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2012. – 10 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

In the paper, the new approach using the anthropomorphic voxel phantom for dose reconstruction at radiation accidents is proposed. This approach permits to differentiate correctly the tissue or organ doses for victims of accidents, and allows not only specifying the epicrisis, but has also obvious prognostic value. As an example, three severe radiation accidents of the recent past are chosen. Calculated data for these accidents are, as a whole, in good agreement with these ones received by the world community. In cases of doses discrepancy with reference data, the possible reasons of divergences are offered.

## НАШИ АВТОРЫ

**Анохин А.Н.** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой АСУ ИАТЭ НИЯУ МИФИ, член советов Российской, Европейской и Международной эргономических ассоциаций. Окончил МИФИ в 1984. Область научных интересов: эргономика на атомных станциях, экспертиза и проектирование человеко-машинных интерфейсов центров управления, эвристические методы системного анализа, представление знаний в системах с искусственным интеллектом. Автор более 130 опубликованных работ. E-mail: apokhin@iate.obninsk.ru.

**Басков П.Б.** – к.т.н., начальник лаборатории ВП-4 ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». Тел.: 8-499-324-01-65.

**Безносков А.В.** – д.т.н., профессор кафедры атомных тепловых станций и медицинской инженерии Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Тел.: 8-831-436-80-23. E-mail: besnosov@ntnu.nnov.ru.

**Белов С.Е.** – начальник отдела по разработке газовых турбогенераторов, ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород. E-mail: belov@okbm.nnov.ru.

**Бокова Т.А.** – к.т.н., доцент кафедры атомных тепловых станций и медицинской инженерии Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

**Бондаренко И.П.** – научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: bondarenko\_ip@mail.ru.

**Боровков М.Н.** – начальник бюро отдела по разработке газовых турбогенераторов, ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород. E-mail: borovkov@okbm.nnov.ru.

**Бударин А.А.** – начальник лаборатории ГНЦ-РФ-ФЭИ. Тел.: 9-51-19.

**Гордиенко А.Б.** – студент кафедры общей и специальной химии ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

**Гулевский В.А.** – к.т.н., ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Дворников П.А.** – к.т.н., начальник отдела ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: pador@ippe.ru,

**Журавлев Б.В.** – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: zhurav@ippe.ru.

**Иванов К.Д.** – д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории 100, ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Ивкина О.В.** – инженер ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». Тел.: 8-499-324-01-65.

**Ковтун С.Н.** – к.т.н., заместитель начальника отдела ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: k7sn@mail.ru.

**Кодочигов Н.Г.** – к.т.н., главный конструктор РУ ВТГР, ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород. E-mail: kodochigov@okbm.nnov.ru.

**Курбаткин И.И.** – к.т.н., старший научный сотрудник Института проблем механики Российской Академии Наук им. А.Ю. Ишлинского. Тел.: 8-495-434-15-87.

**Лаврова О.В.** – старший научный сотрудник лаборатории 100, ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Мартынов П.Н.** – д.т.н., заместитель Генерального директора ГНЦ РФ-ФЭИ, директор Института инновационных технологий.

**Матвеев А.Л.** – начальник группы, ООО ИЦД НИКИЭТ. Тел.: (499) 763-02-24.

**Матвеев Е.Л.** – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ООО ИЦД НИКИЭТ. Тел.: (499) 763-02-24.

**Матюнин А.К.** – аспирант кафедры атомных тепловых станций и медицинской инженерии Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

**Милинчук В.К.** – д.х.н., профессор, заведующий кафедрой общей и специальной химии ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

**Мосягина И.В.** – младший научный сотрудник ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». Тел.: 8-499-324-01-65.

**Муравьева Т.И.** – ведущий инженер Института проблем механики Российской Академии Наук им. А.И. Ишлинского. Тел.: 8-495-434-15-87.

**Мусихин Ю.А.** – инженер-исследователь института ядерных реакторов и теплофизики ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Ниязов С.-А. С.** – инженер лаборатории 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Новожилова О.О.** – к.т.н., ассистент кафедры атомных тепловых станций и медицинской инженерии Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

**Павлов А.В.** – заместитель генерального директора ООО ИЦД НИКИЭТ. E-mail: pavlovav@nikiet.ru.

**Пичков С.Н.** – д.т.н., профессор кафедры атомных тепловых станций и медицинской инженерии Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

**Плешакова Н.В.** – ведущий инженер-программист Смоленского филиала учебно-тренировочного центра «Атомтехэнерго» ОАО «Атомтехэнерго». В 2005 г. окончила ИАТЭ, а в 2008 г. – аспирантуру ИАТЭ по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации». Область научных интересов: системный анализ деятельности оперативного персонала блочных щитов управления АЭС в условиях ликвидации аварийных ситуаций, эргономическое обеспечение деятельности операторов. E-mail: p\_nadina@mail.ru.

**Полионов В.П.** – к.т.н., ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. Тел.: 9-50-39.

**Рощин Н.Г.** – заместитель генерального директора ООО ИЦД НИКИЭТ. E-mail: roschin@nikiet.ru.

**Садовничий Р.П.** – младший научный сотрудник лаборатории 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Сахаров В.В.** – д.т.н., ведущий научный сотрудник ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». Тел.: 8-499-324-01-65.

**Титаренко Н.Н.** – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. Тел.: 9-43-73.

**Торская Е.В.** – к.ф.м.-н., старший научный сотрудник Института проблем механики Российской Академии Наук им. А.И. Ишлинского. Тел.: 8-495-434-15-87.

**Ульянов В.В.** – к.т.н., старший научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Фомин А.С.** – младший научный сотрудник лаборатории 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Фролов Н.Н.** младший научный сотрудник ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». Тел.: 8-499-324-01-65.

**Химич В.Л.** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Энергетические установки и тепловые двигатели» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. Тел.: 8-831-436-78-79.

**Хромылева Т.А.** – инженер ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: taivanova@ippe.ru.

**Хрячков В.А.** – д.ф.-м.н. начальник отдела ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: hva@ippe.ru.

**Шарипова М.А.** – инженер ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии». Тел.: 8-499-324-01-65.

**Швецов Д.М.** – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. Тел.: 9-58-96.

**Шелеметьев В.М.** – научный сотрудник лаборатории 100, ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Шилин В.А.** – инженер Автономной некоммерческой организации «Научно-исследовательский центр «Радиофизические тестовые технологии», Москва.

**Шилина А.С.** – к.х.н., доцент кафедры общей и специальной химии ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

**Э.Г. Новинский** – д.т.н., профессор, главный специалист подразделения, ОАО «ОКБМ Африкантов», Бурнаковский проезд, 15, 603074, Нижний Новгород, Россия, novinskiy@okbm.nnov.ru

## OUR AUTHORS

- Anokhin A.N.** – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department for Computer-Aided Control Systems of INPE NRNU MEPhI. Council member of Russian, European and International ergonomics associations. Graduated from MEPHI in 1984. Scientific interests: ergonomics for nuclear power plants, assessment and design of human-machine interface for control centers, heuristic methods in system analysis, representation of knowledge in artificial intelligence systems. More than 130 publications.
- Baskov P.B.** – Cand. Sci. (Engineering), head of laboratory VP-4 of the Institute «Scientific-Research Institute of Chemical Technology».
- Belov S.E.** – head of department for gas turbogenerator development, JSC «Afrikantov OKBM».
- Beznosov A.V.** – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the department «Atomic, Heat Power Plants and Medical Engineering» of Nizhny Novgorod State Technical University.
- Bokova T.A.** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the department «Atomic, Heat Power Plants and Medical Engineering» of Nizhny Novgorod State Technical University.
- Bondarenko I.P.** – scientific collaborator of the SSC RF-IPPE.
- Borovkov M.N.** – head of design group for gas turbogenerator development, JSC «Afrikantov OKBM».
- Budarin A.A.** – chief of laboratory of the SSC RF-IPPE.
- Dvornikov P.A.** – Cand. Sci. (Engineering), head of division of the SSC RF-IPPE.
- Fomin A.S.** – junior researcher of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.
- Gordiyenko A.B.** – the student of chair of the general and special chemistry of the INPE NRNU MEPhI.
- Gulevsky V.A.** – Cand. Sci. (Engineering), leading researcher of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.
- Ivanov K.D.** – Dr. Sci. (Engineering), leading researcher of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.
- Ivkina O.V.** – engineer of the Institute «Scientific-Research Institute of Chemical Technology».
- Khimich V.L.** – Dr. Sci. (Engineering), Professor, head of the department «Power plants and heat engines» of the Nizhny Novgorod State Technical University.
- Khromyleva T.A.** – engineer of the SSC RF-IPPE.
- Khryachkov V.A.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), head of division of the SSC RF-IPPE
- Kodochigov N.G.** – Cand. Sci. (Engineering), HTGR RP Chief Designer, JSC «Afrikantov OKBM».
- Kovtun S.N.** – Cand. Sci. (Engineering), vice-head of division of the SSC RF-IPPE.
- Kurbatkin I.I.** – Cand. Sci. (Engineering), senior researcher of the A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS.
- Lavrova O.V.** – senior researcher of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.
- Martynov P.N.** – Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director General SSC RF-IPPE, Director of the Institute for Innovative Technologies SSC RF-IPPE.
- Matjunin A.K.** – Postgraduate student of the department «Atomic, Heat Power Plants and Medical Engineering» of Nizhny Novgorod State Technical University.
- Matveev A.L.** – head of department of the SLD ECD NRCIET.
- Matveev E.L.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher of the SLD ECD NRCIET.
- Milinchuk V. K.** – Dr. Sci. (Chemistry), Professor, head of the department chair of the general and special chemistry of the INPE NRNU MEPhI.
- Mosyagina I.V.** – junior researcher of the Institute «Scientific-Research Institute of Chemical Technology».
- Muraveva T.I.** – leading engineer of the A.Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS.
- Musikhin Yu.A.** – engineer-researcher in the institute of nuclear power plants and thermal, SSC RF-IPPE.
- Niasov S.-A.S.** – engineer of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.
- Novinskiy E.G.** – Dr. Sci. (Engineering), lead specialist, JSC «Afrikantov OKBM».
- Novozhilova O.O.** – Cand. Sci. (Engineering), assistant of the department «Atomic, Heat Power Plants and Medical Engineering» of Nizhny Novgorod Alexeev State Technical University.
- Pavlov A.V.** – vice-director of the SLD ECD NRCIET.
- Pichkov S.N.** – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the department «Atomic, Heat Power Plants and Medical Engineering» of Nizhny Novgorod State Technical University.
- Pleshakova N.V.** – engineer-programmer of Smolensk training center «Atomtecheno», graduated from INPE in 2005 and from INPE post-graduate research course in System analysis, Control theory

and Data Processing in 2008. Scientific interests: system analysis of NPP main control room team members performance under abnormal situations, ergonomics support of operator activity.

**Polionov V.P.** – Cand. Sci. (Engineering), leading researcher of the SSC RF-IPPE.

Power Engineering.

**Roschin N.G.** – vice-director of the SLD ECD NRCIET.

**Sadovnichy R.P.** – junior researcher of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.

**Sakharov V.V.** – Dr. Sci. (Engineering), leading researcher of the Institute «Scientific-Research Institute of Chemical Technology».

**Shelemetev V.M.** – researcher of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.

**Shilin V.A.** – the engineer of Independent Noncommercial Organizations «Research Center «Radiophysical Test Technologies»», Moscow.

**Shilina A.S.** – Cand. Sci. (Chemistry), associate professor of the general and special chemistry of the INPE NRNU MEPhI.

**Shvetsov D.M.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), leading researcher of the SSC RF-IPPE.

**Titarenko N.N.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), leading researcher of the SSC RF-IPPE.

**Torskaya E.V.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher of the A.Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS.

**Ulyanov V.V.** – Cand. Sci. (Engineering), senior Researcher of the laboratory 100, SSC RF-IPPE.

**Zhuravlev B.V.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), chief scientific collaborator of the SSC RF-IPPE.

## ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2012 г.

### I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

#### ФИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ

<i>А.И. Брежнев, Е.Г. Виноградов, В.А. Линник, М.К. Овчаренко, А.П. Пышко, Ю.С. Юрьев, В.И. Ярыгин</i> Косвенный способ определения коэффициента полезного действия термоэмиссионного реактора-преобразователя космического назначения .....	1
<i>А.В. Гулевич, О.Ф. Кухарчук, А.И. Брежнев</i> О работе подкритического реактора ускорительно-управляемой системы в режиме модуляции реактивности .....	1
<i>И.Ю. Жемков, Ю.В. Набойщиков</i> Анализ использования ячеек реактора БОР-60 для проведения экспериментальных исследований .....	1
<i>Е.М. Яценко, А.Н. Чебесков, В.С. Каграманян, А.Г. Калашников</i> Методика эквивалентирования плутония различного изотопного состава применительно к системным исследованиям в атомной энергетике .....	1
<i>Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич</i> Оценка последствий гипотетической (запроектной) ядерной аварии реакторной установки «МАРС» .....	2
<i>М.В. Кащеев, И.А. Кузнецов</i> Математическая модель разгона реактора на мгновенных нейтронах .....	2
<i>О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов</i> Влияние бериллиевого отражателя, помещенного в активную зону реактора ВВР-ц, на ее нейтронно-физические характеристики .....	2
<i>Г.Л. Хорасанов, А.И. Блохин, А.А. Вальтер</i> Возможность использования свинца, обогащенного изотопом свинца-208, из торийсодержащих руд и минералов для нужд атомной энергетики .....	2
<i>Ю.Е. Головки</i> Применение метода неопределенных множителей Лагранжа в анализе на непротиворечивость экспериментов на примере систем с высокообогащенным ураном .....	3
<i>Г.Л. Хорасанов, А.И. Блохин</i> Некоторые макрохарактеристики активных зон быстрых реакторов средней мощности .....	3
<i>И.Р. Суслов, И.В. Тормышев, К.Г. Мельников</i> Преобразование групповых макроскопических сечений для использования в программах метода Монте-Карло .....	4
<i>А.А. Безбородов, Е.В. Долгов, Д.А. Клинов, В.В. Колесов, В.Ю. Стогов, И.Р. Суслов, В.И. Фоломеев</i> Граничные резонансные эффекты в быстром реакторе с гетерогенной активной зоной .....	4
<i>О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, Р.В. Фомин</i> Оценка энерговыделения в мишени с ураносодержащим материалом при производстве <sup>99</sup> Mo с использованием мишеней усовершенствованной конструкции на реакторе ВВР-ц .....	4
<i>В.А. Хрячков, И.П. Бондаренко, П.А. Дворников, Б.В. Журавлев, С.Н. Ковтун, Т.А. Хромылева, А.В. Павлов, Н.Г. Роцин</i> Метод генерации <sup>16</sup> N для поверки радиационных каналов контроля на АЭС типа ВВЭР .....	4

**БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ***Р.Р. Алыев, С.Т. Лескин*

Программный комплекс анализа состояния СВРК и представления информации о состоянии активной зоны реактора ВВЭР-1000 «КАРУНД» ..... 1

*О.М. Гулина, Н.Л. Сальников, В.П. Политюков*

Управление ресурсом оборудования АЭС в условиях старения методами системного анализа данных ..... 1

*О.М. Гулина, О.О. Фролова*

Прогнозирование ресурса оборудования АЭС в условиях эрозионно-коррозионного износа на основе эмпирической модели ..... 1

*Н.Л. Сальников*

Критерий эффективности структур измерительных систем повышенной надежности ..... 1

*О.М. Гулина, Н.Л. Сальников, В.П. Политюков, В.С. Арефьев*

Особенности вычислений в модели оптимального управления ресурсом трубного пучка парогенератора ..... 2

*А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов, Ю.А. Кириллов*

Инновационные ультразвуковые технологии повышения ресурса оборудования АЭС при его изготовлении ..... 2

*В.В. Худаско, А.И. Трофимов, С.А. Куркин, В.Г. Малышкин*

К определению напряженного состояния металла элементов энергетического оборудования АЭС акустическим методом ..... 2

*В.А. Чепурко, С.В. Чепурко*

Об одном методе обнаружения неоднородности потока отказов оборудования АЭС ..... 2

*Н.В. Артамонов, А.С. Сидоров*

Обоснование ядерной безопасности устройства локализации расплава для АЭС с реакторами типа ВВЭР ..... 3

*Р.А. Глоба, М.А. Трофимов*

Методика ультразвукового контроля двухкомпонентного металла реакторной установки ВК-50 ..... 3

*П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.А. Бударин, В.П. Полионов, Н.Н. Титаренко, Н.Г. Рошин,**А.Л. Матвеев, Е.Л. Матвеев*

Моделирование динамики распространения парогазового фронта в теплоизоляции трубопровода энергетических установок ..... 3

*П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.А. Бударин, В.П. Полионов, Н.Н. Титаренко, Д.М. Швецов,**Н.Г. Рошин, А.Л. Матвеев, Е.Л. Матвеев*

Расчетное обоснование алгоритма контроля течи трубопроводов по влажности воздуха .... 4

*Н.В. Плешакова, А.Н. Анохин*

Анализ ошибок, допускаемых операторами БЩУ АЭС при использовании эксплуатационных процедур ..... 4

**ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ***И.В. Ягодкин, А.М. Посажеников, А.Г. Гришин, В.П. Мельников*

Применение метода электрофизического воздействия на дисперсную среду в устройствах высокоэффективной фильтрации газовых сред от аэрозолей различного происхождения ..... 1

*И.И. Крышев, А.Ю. Пахомов, С.Н. Брыкин, В.Г. Булгаков, Т.Г. Сазыкина, И.А. Пахомова,**И.С. Серебряков, Н.С. Рознова, А.И. Крышев, И.Я. Газиев, К.В. Лунева, М.А. Дмитриева*

Оценка и прогнозирование радиационно-экологического воздействия хранилищ радиоактивных отходов Ленинградского отделения филиала «Северо-Западный территориальный округ» ФГУП «РОСРАО» ..... 3

*В.А. Шилин, А.Б. Гордиенко, А.С. Шилина, В.К. Милинчук*

Адсорбция молекулярного йода из газоаэрозольных сред и водных растворов новым типом алюмосиликатного сорбента ..... 4

## ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

<i>А.В. Безносков, М.А. Антоненков, Т.А. Бокова, М.В. Ярмонов, К.А. Махов, А.А. Молодцов</i> Экспериментальное исследование гидродинамики течения свинцового теплоносителя и воды через экспериментальный участок «дроссель-кольцевой зазор» .....	1
<i>А.В. Варивцев, И.Ю. Жемков, О.В. Ищунина, Ю.В. Набойщиков, В.А. Неверов</i> Расчетно-экспериментальные исследования радиационного тепловыделения в реакторе БОР-60 .....	1
<i>С.М. Дмитриев, В.Е. Лукьянов, О.Б. Самойлов</i> Обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции с перемешивающими решетками-интенсификаторами для ВВЭР-1000 .....	1
<i>Н.И. Логинов, А.С. Михеев, А.А. Мухлынин</i> Метод измерения расхода натрия в тепловой трубе на основе электромагнитного датчика .....	1
<i>П.В. Марков</i> Интенсификация перемешивания в ТВС водоохлаждаемых реакторов сотовыми перемешивающими решетками .....	1
<i>А.В. Безносков, П.А. Боков, А.В. Львов, О.О. Новожилова, Э.Г. Новинский, В.В. Лемехов</i> Экспериментальное исследование условий возникновения и характеристик газовой кавитации в потоке свинцового теплоносителя инновационных я дерных реакторов на быстрых нейтронах .....	2
<i>К.В. Карташов, Г.П. Богословская</i> Проведение расчетов по оптимизации геометрических и режимных параметров ТВС реакторов ВВЭР-СКД для различных режимов эксплуатации реактора на сверхкритических параметрах воды .....	2
<i>В.В. Перевезенцев</i> Случайные гидродинамические нагрузки и вибрации твэлов в турбулентном потоке теплоносителя в ТВС ВВЭР .....	2
<i>В.В. Попов, В.Н. Румянцев, И.С. Курина, М.В. Михеев</i> Исследование теплопередачи в твэлах с керамическим топливом при переменных тепловых нагрузках .....	2
<i>В.В. Сергеев, О.Ю. Кочнов, А.А. Казанцев</i> Исследование последствий течи из бака для модернизированного проекта РУ ВВР-ц (ИВВ.10М) .....	2
<i>В.Г. Асмолов, В.Н. Блинков, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, А.А. Неровнов, Ю.В. Парфенов</i> Сравнение двух подходов для расчета силового взаимодействия двухфазного потока с трубным пучком .....	3
<i>А.А. Говердовский, Б.В. Кебадзе, Д.М. Ковалев, Р.Р. Чернов</i> Экспериментальное определение энерговыделения в свинцовом и урановом образцах при облучении протонами высоких энергий .....	3
<i>С.Л. Дорохович, Ю.А. Казанский, А.А. Казанцев, С.В. Ковальчук, А.В. Левченко, В.А. Левченко, Ю.С. Юрьев</i> Гидродинамика и теплообмен в реакторной установке «МАСТЕР» .....	3
<i>А.В. Морозов, О.В. Ремизов, Д.С. Калякин, В.И. Асюнин, В.И. Щеколдин, С.И. Зайцев, М.О. Закутаев</i> Верификация расчетных кодов ТЕСЬ-М и Корсар/ГП по результатам экспериментов на крупномасштабном стенде ГЕ2М-ПГ .....	3
<i>И.А. Чусов, А.С. Шелегов, В.И. Слободчук, В.Ф. Украинцев</i> Расчет теплоотдачи в семистержневом пучке твэлов при сверхкритических параметрах теплоносителя .....	3
<i>В.М. Абдулкадыров, Г.П. Богословская, В.А. Грабежная</i> Термодинамические циклы АЭС, работающих на сверхкритических параметрах воды .....	4
<i>А.В. Безносков, Т.А. Бокова, О.О. Новожилова, А.К. Матюнин, В.Л. Химич, С.Н. Пичков</i> Экспериментальные исследования процессов, сопровождающих аварию «межконтурная неплотность ПГ» в РУ с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями .....	4

*В.В. Ульянов, В.А. Гулевский, П.Н. Мартынов, А.С. Фомин, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, С.-А.С. Ниязов*  
 Применение теплоносителей Рb и Рb-Vi в новых технологиях переработки твердых, жидких и газообразных сред ..... 4

### **ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ**

*А.А. Андрианов*  
 Интегрированные подходы к оценке рисков несанкционированного распространения ..... 1

*А.И. Дьяченко, Н.А. Балагуров, В.В. Артюк*  
 Использование регенерированного урана из топлива с глубоким выгоранием ..... 1

*М.И. Стасевич, Е.В. Скачков, В.В. Кадилин*  
 Измерение массы плутония в твэле реактора БН-800 ..... 1

*В.И. Бойко, М.Е. Силаев, Ю.В. Недбайло*  
 Оптимизация процесса определения изотопного состава урана кодом MGAU с помощью статистических методов ..... 3

*С.В. Ивахин, А.И. Радаев, Г.В. Тихомиров, М.В. Щуровская*  
 Расчетное моделирование выгорания топлива исследовательского реактора ИРТ при анализе конверсии на низкообогащенное урановое топливо ..... 3

### **АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*Е.Ф. Авдеев, В.И. Белозеров, А.Я. Устюжанин, В.В. Максимовский, Н.Д. Разенков, Н.Е. Ющенко*  
 Верификация измерения объемных расходов в технологических каналах реакторов РБМК расходомерами «Шадр-32М» ..... 2

*А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов, Д.А. Егоров*  
 Оптимизация процесса сварки оборудования и трубопроводов АЭС путем моделирования сварных соединений ..... 2

*А.Ф. Егоров, В.В. Коробейников, Е.В. Поплавская, Г.А. Фесенко*  
 Оценка чувствительности модели развития ядерной энергетики России к возможным изменениям выбранных экономических параметров ..... 3

*П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, К.Д. Иванов, М.Е. Чернов, В.В. Ульянов, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, Р.Ю. Чепоров, С.-А.С.Ниязов*  
 Особенности использования железокислотных электродов сравнения в твердоэлектролитных датчиках контроля термодинамической активности кислорода ..... 3

*П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, А.Н. Стороженко, М.Е. Чернов, В.В. Ульянов, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, П.В. Кузин*  
 Особенности метрологической поверки датчиков активности кислорода в жидкометаллических теплоносителях ..... 3

*С.Е. Белов, М.Н. Боровков, Н.Г. Кодочигов, Э.Г. Новинский*  
 Экспериментальные исследования конструкции страховочных подшипников вертикальной турбомшины ..... 4

*Ю.А. Мусихин*  
 Об электродной поляризации электрохимического датчика кислорода в жидкометаллических теплоносителях ..... 4

### **ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Б.К. Былкин, В.Л. Тихоновский, Д.В. Чуйко*  
 Создание и применение многомерных информационных моделей блока АЭС при выводе из эксплуатации ..... 3

### **МАТЕРИАЛЫ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

*И.И. Коновалов, К.В. Митюрёв, В.В. Попов, С.М. Ганина*  
 Оценка остаточного ресурса оболочек тепловыделяющих элементов реактора БН-600 из аустенитной стали ЧС-68 ..... 1

*А.В. Корзунин*  
 Расчетная оценка и анализ активации оболочек твэлов легководных реакторов ..... 1

<i>Л.В. Мякишева, В.С. Панов, В.Ю. Лопатин, И.А. Власовец</i> Синтез и физико-химические исследования порошков гидроксида гадолиния для легирования материалов топливных таблеток .....	2
<i>Е.А. Орлова, В.В. Алексеев, В.Г. Жмурин, С.А. Загребаев, М.А. Орлов, Я.Н. Ширшов, А.Н. Волов, И.Ю. Торбенкова, П.И. Тычинский М.С. Арсентьев, Е.Ю. Прохорова</i> Защита поверхности стали при использовании фреонов в АЭС типа «БРЕСТ» .....	3
<i>Н.Н. Титаренко, П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, А.В. Павлов, Н.Г. Роцин, Е.Л. Матвеев</i> Определение параметров проницаемости волокнистых пористых материалов .....	3
<i>П.В. Федотов, Л.П. Лошманов, А.В. Костюхина, Е.А. Олевский</i> Изотропность деформационного упрочнения сплава Э110 при статическом и высокоскоростном магнитно-импульсном нагружении .....	3
<i>Б.А. Гурович, Е.А. Кулешова, Д.А. Мальцев, С.В. Федотова, А.С. Фролов, О.О. Забусов, М.А. Салтыков</i> Структурные исследования стали 15Х2НМФАА и ее сварных соединений после длительных термических выдержек и облучения при рабочей температуре корпуса реактора .....	4
<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 предварительной подготовки поверхности стали на скорость окисления в свинцово-висмутовом теплоносителе .....	4
<i>В.В. Сахаров, П.Б. Басков, И.В. Мосягина, Н.Н. Фролов, И.И. Курбаткин, Т.И. Муравьева, Е.В. Торская, О.В. Ивкина, М.А. Шарипова</i> Химический синтез нейтрон-детектирующих ультратонких оптических материалов .....	4
<i>В.Я. Сухоносков, В.А. Чернов, Н.Ю. Богданов</i> Исследование процессов кристаллизации при отверждении материала-фиксатора на основе оксида магния .....	4
<b>ПОДГОТОВКА КАДРОВ</b>	
<i>В.В. Каченко, С.П. Саакян</i> Подготовка кадров на факультете повышения квалификации и профессиональной переподготовки ИАТЭ НИЯУ МИФИ .....	1
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ</b>	
<i>В.М. Бардаков, Во Ньы Зан, Н.А. Строкин</i> Панорамная плазмооптическая масс-сепарация немонознергетичных и многозарядных ионов .....	2
<i>Д.Н. Моисеенко, Ю.А. Кураченко</i> Анализ тяжелых радиационных аварий с помощью воксельного антропоморфного фантома .....	4
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b>	
<i>М.А. Полоус, В.И. Ярыгин, Е.Г. Виноградов</i> Программный комплекс для трехмерного численного расчета тепловых и электрических характеристик многоэлементного электрогенерирующего канала термоэмиссионной ЯЭУ .....	2

## CONTENTS of ISSUES of «YADERNAYA ENERGETICA» in 2012

### REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY

<i>A.I. Brezhnev, E.G. Vinogradov, V.A. Linnik, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, Yu.S. Yuryev, V.I. Yarygin</i>	
Indirect Method of Determining the Efficiency of a Thermionic Reactor for Space .....	1
<i>A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk, A.I. Brezhnev</i>	
On ADS Subcritical Reactor Operation in the Reactivity Modulation Mode .....	1
<i>I.Yu. Zhemkov, Yu.V. Naboishchikov</i>	
Analysis of the BOR-60 Cells Utilization to Carry out Experiments .....	1
<i>E.M. Yatsenko, A.N. Chebeskov, V.S. Kagramanyan, A.G. Kalashnikov</i>	
Methodology of Conversion of Plutonium of Various Isotopic Compositions to the Equivalent Plutonium as Applied to System Studies in Nuclear Power .....	1
<i>Yu.A. Kazanskiy, E.S. Matusevich</i>	
Assessment of Consequences Hypothetical Nuclear Accident of the Reactor MARS Installation .....	2
<i>M.V. Kascheev, I.A. Kuznetsov</i>	
The Mathematical Model of Prompt-Critical Disassembly Excursion of an LMFBR .....	2
<i>O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov</i>	
The Beryllium Reflector Effects on Neutron-Physical Characteristics of the VVR-c Reactor Core .....	2
<i>G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin, A.A. Valter</i>	
Possibility of the Usage of the Lead Enriched with the Isotope Lead-208 from Thorium Ores and Minerals for Nuclear Energy Needs .....	2
<i>Yu.E. Golovko</i>	
Application of the Undetermined Lagrangian Coefficients Method in the Analysis on Consistency of Experiments on the Example of Systems with High Enriched Uranium from ICSBEP Handbook .....	3
<i>G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin</i>	
Some Macroscopic Characteristics of Fast Reactor Cores of Intermediate Capacity .....	3
<i>I.R. Suslov, I.V. Tormyshev, K.G. Mel'nikov</i>	
New Technique to Reformat Multigroup Cross-Sections for Monte-Carlo Calculation .....	4
<i>A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev</i>	
Boundary Resonance Effects in the Fast Reactor with the Heterogeneous Core .....	4
<i>O. Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin</i>	
Energy Deposition Evaluation in the Target with Uranium-Containing Material for the <sup>99</sup> Mo Production in WWR-C .....	4
<i>V.A. Khryachkov, I.P. Bondarenko, P.A. Dvornikov, B.V. Zhuravlev, S.N. Kovtun, T.A. Khromyleva, A.V. Pavlov, N.G. Roschin</i>	
Method of <sup>16</sup> N Generation for Test of Radiation Controlled Channels on Nuclear Power Stations with Water-Cooled Reactors .....	4

### SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP

<i>R.R. Alyev, S.T. Leskin</i>	
Software Analysis of in-core Monitoring System and Reporting on the State of the Reactor Core of VVER-1000 KARUND .....	1
<i>O.M. Gulina, N.L. Salnikov, V.P. Politukov</i>	
Lifetime NPP Equipment Management Under Ageing by System Analysis Procedures .....	1
<i>O.M. Gulina, O.O. Frolova</i>	
Prediction of NPP Equipment Lifetime under Flow-Accelerated Corrosion by Using of Empirical Model .....	1

<i>N.L. Salnikov</i> Efficiency Criteria for High Reliability Measured Systems Structures .....	1
<i>O.M. Gulina, N.L. Salnikov, V.P. Politukov, V.S. Arefiev</i> Optimal Management by NPP Equipment Lifetime. Calculation Procedures .....	2
<i>A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, Y.A. Kirillov</i> Innovative Ultrasonic Technology to Improve the Life of NPP Equipment at its Manufacturing .....	2
<i>V.V. Hudasko, A.I. Trofimov, S.A. Kurkin, V.G. Malynkin</i> To Definition of the Tension of Metal Elements of the Power Equipment of the Nuclear Power Plants Acoustic Method .....	2
<i>V.A. Chepurko, S.V. Chepurko</i> A Method for Detecting Failure Data Flow Heterogeneity of Nuclear Power Plant Equipment in Failure Flow .....	2
<i>N.V. Artamonov, A.S. Sidorov</i> Nuclear Safety of Melt Localisator Device for NPP with WWER Reactor Model .....	3
<i>R.A. Globa, M.A. Trofimov</i> The Technique of Ultrasonic Testing of Two-Component Metal-Reflex Reaction Setup VC-50 ....	3
<i>P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.A. Budarin, V.P. Polionov, N.N. Titarenko, N.G. Roshchin, A.L. Matveev, E.L. Matveev</i> Simulation of Dynamics of Steam-Gas Front Distribution in Thermal Insulation of Power Plants Pipelines .....	3
<i>P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.A. Budarin, V.P. Polionov, N.N. Titarenko, D.M. Shvetsov, N.G. Roshchin, A.L. Matveev, E.L. Matveev</i> Calculation-based Justification for the Algorithm of Pipelines Leak Control by Air Humidity ...	4
<i>N.V. Pleshakova, A.N. Anokhin</i> Analysis of the Errors Committed by NPP MCR Operators during Implementation of Operating Procedures .....	4
<b>ENVIROMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING</b>	
<i>I.V. Yagodkin, A.M. Posagennikov, A.G. Grishin, V.P. Melnikov</i> Application of the Method of Electrophysical Impact on the Disperse Medium in High- Performance Filtering Gases Devices from Aerosols of Various Origin .....	1
<i>I.I. Kryshev, A.Y. Pahomov, S.N. Brykin, V.G. Boulgakov, T.G. Sazykina, I.A. Pahomova, I.S. Serebryakov, N.S. Roznova, A.I. Kryshev, I.Y. Gaziev, K.V. Lunyova, M.A. Dmitrieva</i> Assessment and prognosis of radioecological impact of the radioactive wastes storage sites of the «North-West Territorial District» Leningrad branch of FGUP «RosRAO» .....	3
<i>V.A. Shilin, A.B. Gorgienko, A.S. Shilina, V.K. Milinchuk</i> Adsorption of Molecular Iodine from Gas-aerosol Environments and Water Solutions with a New Type of an Aluminum-Silicate Sorbent .....	4
<b>THERMAL PHYSICS AND HEATHYDRAULICS</b>	
<i>A.V. Beznosov, M.A. Antonenkov, T.A. Bokova, M.V. Yarmonov, K.A. Makhov, A.A. Molodtsov</i> Experimental Study of Flow Hydrodynamics Lead Coolant and Water through the Experimental Section «Throttle Clearance-Ring» .....	1
<i>A.V. Varivtsev, I.Yu. Zhemkov, O.V. Ishunina, Yu.V. Naboyshchikov, V.A. Neverov</i> Calculations and Experimental Investigation of Irradiation Heat Rate in BOR-60 Reactor .....	1
<i>S.M. Dmitriev, V.E. Lukyanov, O.B. Samoylov</i> The Substantiation of the Correlation for Critical Heat Flux Calculation for Alternative Design Fuel Assemblies with Mixing Spacer Grids in VVER-1000 .....	1
<i>N.I. Loginov, A.S. Mikheev, A.A. Mukhlinin</i> The Method Based on Electromagnetic Sensor for Measuring of Sodium Flow Rate in a Heat Pipe .....	1
<i>P.V. Markov</i> The Intensification of Mass Transfer in LWR Rods Bundles by Cellular Mixing Grids .....	1

<i>A.V. Beznosov, P.A. Bokov, A.V. Lvov, O.O. Novozhilova, E.G. Novinsky, V.V. Lemekhov,</i> Experimental Study of the Origin and Characteristics of Gas Flow in Cavitation Lead Coolant Innovative Nuclear Fast Reactor .....	2
<i>K.V. Kartashov, G.P. Bogoslovskaya</i> Subchannel Thermohydraulic Calculations for Fuel Subassembly of Reactor Core on Supercritical Water .....	2
<i>V.V. Perevezentsev</i> Random Hydrodynamic Loads and the Vibration of Fuel Elements in the Turbulent Coolant Flow in WWER Fuel Assembly .....	2
<i>V.V. Popov, V.N. Rumyantsev, I.S. Kurina, M.V. Mikheev</i> Examination of Heat Transfer in Ceramic Fuel Elements at Variable Thermal Loadings .....	2
<i>V.V. Sergeev, O.Uy. Kochnov, A. A. Kazantsev</i> Investigation of Consequences the Leak from Tank of VVR-c Reactor (IBB.10M) after Design Modernization .....	2
<i>V.G. Asmolov, V.N. Blinkov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.A. Nerovnov, Y.V. Parfenov</i> The comparison of Two Approaches for Calculation of the Force Interaction of the Two-Phase Flow with Tube Bundle .....	3
<i>A.A. Goverdovskiy, B.V. Kebabze, D.M. Kovalev, R.R. Chernov</i> Experimental Determination of Power-Release in the Lead and Uranium Samples Irradiated by High-Energy Protons .....	3
<i>S.L. Dorohovich, Yu.A. Kazanskiy, A.A. Kazantsev, S.V. Kovalchuk, A.V. Levchenko,</i> <i>V.A. Levchenko, Yu.S. Yurev</i> Hydrodynamics and Heat Transfer in Reactor Installation «MASTER» .....	3
<i>A.V. Morozov, O.V. Remizov, D.S. Kalyakin, V.I. Asyunin, V.I. Schekoldin, S.I. Zaitsev,</i> <i>M.O. Zakutaev</i> Verification of TECH-M and KORSAR/GP Computer Codes on the Basis of Experimental Results Obtained on Large-scale Test Facility GE2M-PG .....	3
<i>I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V.F. Ukraintsev</i> Calculation of Heat Transfer at the Seven Heated Rod Assembly upon Supercritical Fluid Parameters .....	3
<i>V.M. Abdulkadyrov, G.P. Bogoslovskaya, V.A. Grabejnaya</i> Thermodynamic Cycles of NPPs Operated with Supercritical Water .....	4
<i>A.V. Beznosov, T.A. Bokova, O.O. Novozhilova, A.K. Matjunin, V.L. Khimich, S.N. Pichkov</i> Experimental Researches of the Processes Accompanying an Accident «The Intercontour Leak of a Steam Generator» for Fast Reactor with HLMC .....	4
<i>V.V. Ulyanov, V.A. Gulevsky, P.N. Martynov, A.S. Fomin, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy,</i> <i>S.-A.S. Niasov</i> The Use of Coolants Pb and Pb-Bi in the New Technologies of Recycling Solid, Liquid and Gaseous Media .....	4

#### **FUEL CYCLE AND RADIOACTIVE WASTES MANAGEMENT**

<i>A.A. Andrianov</i> Integrated Approach to Proliferation Risk Assessment Based on Multiple Objective Analysis Framework .....	1
<i>A.I. Dyachenko, N.A. Balagurov, V.V. Artisyuk</i> On the Issues of Uranium Reprocessed from High Burnup Fuels .....	1
<i>M.I. Stasevich, E.V. Skachkov, V.V. Kadilin</i> Control Uniform Distribution of Plutonium by Fuel Pin Length BN-800 .....	1
<i>V.I. Boyko, M.E. Silaev, Y.V. Nedbaylo</i> Optimization of Isotopic Composition Identification by Program Code MGAU using Statistical Methods .....	3
<i>S.V. Ivakhin, A.I. Radaev, G.V. Tikhomirov, M.V. Shchurovskaya</i> IRT Research Reactor Burnup Calculation for the Analysis of Conversion to Low Enrichment Uranium Fuel .....	3

## NUCLEAR POWER PLANTS

<i>E.F. Avdeev, V.I. Belozеров, A.Ya. Ustyuzhanin, V.V. Maximovsky, N.D. Rasenkov, N.E. Yushenko</i> Validation of the Volume Flow Rate Measurements of RBMK Technological Channels Obtained with the «Shadr-32M» Flowmeter .....	2
<i>A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, D.A. Egorov</i> Optimization of the Welding Process Equipment and Piping Plant by Modeling of Welded Joints .....	2
<i>A.F. Egorov, V.V. Korobeynikov, E.V. Poplavskaya, G.A. Fesenko</i> Assessment of Russia Nuclear Power Development Model Sensitivity Analysis to Possible Changes of Selected Economic Parameters .....	3
<i>P.N. Martynov, R.Sh. Askhadullin, K.D. Ivanov, M.E. Chernov, V.V. Ulyanov, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, R.Yu. Cheporov, S.-A.S. Niyazov</i> Iron Oxide Reference Electrodes in Solid Electrolyte Sensors Designed to Control the Thermodynamic Activity of Oxygen .....	3
<i>P.N. Martynov, R.Sh. Askhadullin, A.N. Storozhenko, M.E. Chernov, V.V. Ulyanov, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, P.V. Kuzin</i> Peculiarities of Metrological Calibration of Oxygen Activity Sensors in Liquid Metal Coolants ...	3
<i>S.E. Belov, M.N. Borovkov, N.G. Kodochigov, E.G. Novinskiy</i> Experimental Investigations of Vertical Turbomachine Catcher Bearings .....	4
<i>Yu.A. Musikhin</i> On Electrode Polarization of Electrochemical Oxygen Sensor in Liquid Metal Coolants .....	4

## DECOMMISSIONING OF NPP

<i>B.K. Bylkin, V.L. Tikhonovsky, D.V. Chuyko</i> Creation and Application of Multidimensional Information Models of NPP Unit for Decommissioning .....	3
---	---

## MATERIALS OF NUCLEAR POWER ENGINEERING

<i>K.V. Miturev, I.I. Kononov, V.V. Popov, S.M. Ganina</i> Residual Resource Estimation of the Fuel Pins Cover of Austenitic Stainless Steel ChS-68 of the Reactor BN-600 .....	1
<i>A.V. Korzunin</i> Computational Analysis and Estimation of LWR Cladding Radioactivity .....	1
<i>L.V. Myakisheva, V.Y. Lopatin, V.S. Panov, I.A. Vlasov</i> The Synthesis and Physicochemical Investigation of Gadolinium Hydroxide Powders for Fuel Pellets Alloying .....	2
<i>E.A. Orlova, V.V. Alexeev, V.G. Gmurin, S.A. Zagrebaev, M.A. Orlov, Ya.N. Shirshov, A.N. Volov, I.Yu. Torbenkova, P.I. Tyichinskiy, M.C. Arsentev, E.Yu. Prochorova</i> The protection of steel surface at use of freon in NPP such as «BREST» .....	3
<i>N.N. Titarenko, P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, A.V. Pavlov, N.G. Roshchin, E.L. Matveev</i> Calculation of Permeability Parameters for Fibrous Porous Materials .....	3
<i>P.V. Fedotov, L.P. Loshmanov, A.V. Kostiyuhina, E.A. Olevsky</i> Isotropic Deformation Hardening Alloy E110 at Statistic and High Rate Magnetic-Pulsed Deformation .....	3
<i>B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, D.A. Maltsev, S.V. Fedotova, A.A. Frolov, O.O. Zabusov, M.A. Saltykov</i> Structural Studies of 15H2NMF AA Steel and its Welds after Long Thermal Exposures and Irradiation at the Operating Temperature of Reactor Pressure Vessel .....	4
<i>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</i> Effect of Pre-Treatment on the Oxidation Rate Steel in the Lead-Bismuth Coolant .....	4
<i>V.V. Sakharov, P.B. Baskov, I.V. Mosyagina, N.N. Frolov, I.I. Kurbatkin, T.I. Muravyeva, E.V. Torskaya, O.V. Ivkina, M.A. Sharipova</i> Chemical Synthesis of Neutron-Detecting Ultrathin Optical Materials .....	4

*V.J. Suhonosov, V.A. Chernov, N.J. Bogdanov*  
Researches of Crystallization Processes under Hardening of Clamp Material Based  
on the Magnesium Oxide ..... 4

**PERSONNEL TRAINING**

*V.V. Tkachenko, S.P. Saakyan*  
Training for Faculty Training and Retraining INPE NRNU MPhI ..... 1

**APPLICATION OF NUCLEAR METHODS AND MEANS**

*V.M. Bardakov, Vo Nhu Dan, N.A. Strokin*  
Panoramic Plasma-Optical Mass Separation not Monoenergetic and Multiply Charged Ions ..... 2  
*D.N. Moiseenko, Yu.A. Kurachenko*  
Radiation Accidents Analysis with the use of Anthropomorphic Voxel Phantom ..... 4

**SIMULATION OF THE PROCESS PERFORMANCE IN NUCLEAR POWER FACILITIES**

*M.A. Polous, V.I. Yarygin, E.G. Vinogradov*  
Program for Three-Dimensional Numerical Computation of Thermal and Electrical  
Properties of a Multicell Thermionic Fuel Element for the Direct  
Energy Conversion NPP ..... 2

## II. АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абдулкадыров В.М.	4	Гурович Б.А.	4
Авдеев Е.Ф.	2	Дворников П.А.	3,4
Алексеев В.В.	3	Дмитриев С.М.	1
Алыев Р.Р.	1	Дмитриева М.А.	3
Андрианов А.А.	1	Долгов Е.В.	4
Анохин А.Н.	4	Дорохович С.Л.	3
Антоненков М.А.	1	Дьяченко А.И.	1
Арефьев В.С.	2	Егоров А.Ф.	3
Арсентьев М.С.	3	Егоров Д.А.	2
Артамонов Н.В.	3	Жемков И.Ю.	1
Артисюк В.В.	1	Жмурин В.Г.	3
Асмолов В.Г.	3	Журавлев Б.В.	4
Асхадуллин Р.Ш.	3	Забусов О.О.	4
Асюнин В.И.	3	Загребаев С.А.	3
Балагуров Н.А.	1	Зайцев С.И.	3
Бардаков В.М.	2	Закутаев М.О.	3
Басков П.Б.	4	Иванов К.Д.	3,4
Безбородов А.А.	4	Ивахин С.В.	3
Безносос А.В.	1, 2, 4	Ивкина О.В.	4
Белов С.Е.	4	Ишунина О.В.	1
Белозеров В.И.	2	Каграманян В.С.	1
Блинков В.Н.	3	Кадилин В.В.	1
Блохин А.И.	2, 3	Казанский Ю.А.	2, 3
Богданов Н.Ю.	4	Казанцев А.А.	2, 3
Богословская Г.П.	2, 4	Калашников А.Г.	1
Бойко В.И.	3	Калякин Д.С.	3
Боков П.А.	2	Карташов К.В.	2
Бокова Т.А.	1, 4	Кашцев М.В.	2
Бондаренко И.П.	4	Кебадзе Б.В.	3
Боровков М.Н.	4	Кириллов Ю.А.	2
Брежнев А.И.	1	Клинов Д.А.	4
Брыкин С.Н.	3	Ковалев Д.М.	3
Бударин А.А.	3, 4	Ковальчук С.В.	3
Булгаков В.Г.	3	Ковтун С.Н.	3, 4
Былкин Б.К.	3	Кодочигов Н.Г.	4
Вальтер А.А.	2	Колесов В.В.	2, 4
Варивцев А.В.	1	Коновалов И.И.	1
Виноградов Е.Г.	1, 2	Корзунин А.В.	1
Власовец И.А.	2	Коробейников В.В.	3
Во Ньы Зан.	2	Костюхина А.В.	3
Волов А.Н.	3	Кочнов О.Ю.	2, 3, 4
Газиев И.Я.	3	Крышев А.И.	3
Ганина С.М.	1	Кузин П.В.	3
Глоба Р.А.	3	Кузнецов И.А.	2
Говердовский А.А.	3	Кулешова Е.А.	4
Головко Ю.Е.	3	Кураченко Ю.А.	4
Гордиенко А.Б.	4	Курбаткин И.И.	4
Грабежная В.А.	4	Курина И.С.	2
Гришин А.Г.	1	Куркин С.А.	2
Гулевич А.В.	1	Кухарчук О.Ф.	1
Гулевский В.А.	4	Лаврова О.В.	4
Гулина О.М.	1, 2	Левченко А.В.	3

Левченко В.А.....	3	Пичков С.Н.....	4
Лемехов В.В.....	2	Плешакова Н.В.....	4
Лескин С.Т.....	1	Полионов В.П.....	3,4
Линник В.А.....	1	Политюков В.П.....	1,2
Логинов Н.И.....	1	Полоус М.А.....	2
Лопатин В.Ю.....	2	Поплавская Е.В.....	3
Лошманов Л.П.....	3	Попов В.В.....	1,2
Лукьянов В.Е.....	1	Посаженников А.М.....	1
Лунова К.В.....	3	Прохорова Е.Ю.....	3
Львов А.В.....	2	Пышко А.П.....	1
Максимовский В.В.....	2	Радаев А.И.....	3
Малынкин В.Г.....	2	Разенков Н.Д.....	2
Мальцев Д.А.....	4	Ремизов О.В.....	3
Марков П.В.....	1	Рознова Н.С.....	3
Мартынов П.Н.....	3,4	Рощин Н.Г.....	3,4
Матвеев А.Л.....	3,4	Румянцев В.Н.....	2
Матвеев Е.Л.....	3,4	Саакян С.П.....	1
Матусевич Е.С.....	2	Садовничий Р.П.....	3,4
Матюнин А.К.....	4	Сазыкина Т.Г.....	3
Махов К.А.....	1	Салтыков М.А.....	4
Мелихов В.И.....	3	Сальников Н.Л.....	1,2
Мелихов О.И.....	3	Самойлов О.Б.....	1
Мельников В.П.....	1	Сахаров В.В.....	4
Крышев И.И.....	3	Сергеев В.В.....	2
Мельников К.Г.....	4	Серебряков И.С.....	3
Миличук В.К.....	4	Сидоров А.С.....	3
Минин С.И.....	2	Силаев М.Е.....	3
Митюрков К.В.....	1	Скачков Е.В.....	1
Михеев А.С.....	1	Слободчук В.И.....	3
Михеев М.В.....	2	Стасевич М.И.....	1
Моисеенко Д.Н.....	4	Стогов В.Ю.....	4
Молодцов А.А.....	1	Стороженко А.Н.....	3
Морозов А.В.....	3	Строкин Н.А.....	2
Мосягина И.В.....	4	Сулов И.Р.....	4
Муравьева Т.И.....	4	Сухоносков В.Я.....	4
Мусихин Ю.А.....	4	Титаренко Н.Н.....	3
Мухлынин А.А.....	1	Титаренко Н.Н.....	4
Мякишева Л.В.....	2	Тихомиров Г.В.....	3
Набойщиков Ю.В.....	1	Тихоновский В.Л.....	3
Неверов В.А.....	1	Ткаченко В.В.....	1
Недбайло Ю.В.....	3	Торбенкова И.Ю.....	3
Неровнов А.А.....	3	Тормышев И.В.....	4
Ниязов С.-А.С.....	3,4	Торская Е.В.....	4
Новинский Э.Г.....	2,4	Трофимов А.И.....	2
Новожилова О.О.....	2,4	Трофимов М.А.....	2,3
Овчаренко М.К.....	1	Тычинский П.И.....	3
Олевский Е.А.....	3	Украинцев В.Ф.....	3
Орлов М.А.....	3	Ульянов В.В.....	3,4
Орлова Е.А.....	3	Устюжанин А.Я.....	2
Павлов А.В.....	3,4	Федотов П.В.....	3
Панов В.С.....	2	Федотова С.В.....	4
Парфенов Ю.В.....	3	Фесенко Г.А.....	3
Пахомов А.Ю.....	3	Фоломеев В.И.....	4
Пахомова И.А.....	3	Фомин А.С.....	4
Перевезенцев В.В.....	2	Фомин Р.В.....	4

Фролов А.С.....	4	Чусов И.А.....	3
Фролов Н.Н.....	4	Шарипова М.А.....	4
Фролова О.О.....	1	Швецов Д.М.....	4
Химич В.Л.....	4	Шелегов А.С.....	3
Хорасанов Г.Л.....	2,3	Шелеметьев В.М.....	3,4
Хромылева Т.А.....	4	Шилин В.А.....	4
Хрячков В.А.....	4	Шилина А.С.....	4
Худаско В.В.....	2	Ширшов Я.Н.....	3
Чебесков А.Н.....	1	Щеколдин В.И.....	3
Чепоров Р.Ю.....	3	Щуровская М.В.....	3
Чепурко В.А.....	2	Юрьев Ю.С.....	1,3
Чепурко С.В.....	2	Ющенко Н.Е.....	2
Чернов В.А.....	4	Ягодкин И.В.....	1
Чернов М.Е.....	3	Ярмонов М.В.....	1
Чернов Р.Р.....	3	Ярыгин В.И.....	1,2
Чуйко Д.В.....	3	Яценко Е.М.....	1

## II. AUTHOR INDEX

Abdulkadyrov V.M.	4	Fedotov P.V.	3
Alexeev V.V.	3	Fedotova S.V.	4
Alyev R.R.	1	Fesenko G.A.	3
Andrianov A.A.	1	Folomeev V.I.	4
Anokhin A.N.	4	Fomin A.S.	4
Antononkov M.A.	1	Fomin R.V.	4
Arefiev V.S.	2	Frolov A.A.	4
Arsentev M.C.	3	Frolov N.N.	4
Artamonov N.V.	3	Frolova O.O.	1
Artisyuk V.V.	1	Ganina S.M.	1
Askhadullin R.Sh.	3	Gaziev I.Y.	3
Asmolov V.G.	3	Globo R.A.	3
Asyunin V.I.	3	Gmurin V.G.	3
Avdeev E.F.	2	Golovko Yu.E.	3
Balagurov N.A.	1	Gorgienko A.B.	4
Bardakov V.M.	2	Goverdovskiy A.A.	3
Baskov P.B.	4	Grabejnaya V.A.	4
Belov S.E.	4	Grishin A.G.	1
Belozherov V.I.	2	Gulevich A.V.	1
Bezborodov A.A.	4	Gulevsky V.A.	4
Beznosov A.V.	1, 2, 4	Gulina O.M.	1, 2
Blinkov V.N.	3	Gurovich B.A.	4
Blokhin A.I.	2, 3	Hudasko V.V.	2
Bogdanov N.J.	4	Ishunina O.V.	1
Bogoslovskaya G.P.	2, 4	Ivakhin S.V.	3
Bokov P.A.	2	Ivanov K.D.	3, 4
Bokova T.A.	1, 4	Ivkina O.V.	4
Bondarenko I.P.	4	Kadilin V.V.	1
Borovkov M.N.	4	Kagramanyan V.S.	1
Boulgakov V.G.	3	Kalashnikov A.G.	1
Boyko V.I.	3	Kalyakin D.S.	3
Brezhnev A.I.	1	Kartashov K.V.	2
Brykin S.N.	3	Kascheev M.V.	2
Budarin A.A.	3, 4	Kazanskiy Yu.A.	2, 3
Bylkin B.K.	3	Kazantsev A.A.	2, 3
Chebeskov A.N.	1	Kebadze B.V.	3
Cheporov R.Yu.	3	Khimich V.L.	4
Chepurko S.V.	2	Khorasanov G.L.	2, 3
Chepurko V.A.	2	Khromyleva T.A.	4
Chernov M.E.	3	Khryachkov V.A.	4
Chernov R.R.	3	Kirillov Y.A.	2
Chernov V.A.	4	Klinov D.A.	4
Chusov I.A.	3	Kochnov O.Yu.	2, 4
Chuyko D.V.	3	Kodochigov N.G.	4
Dmitriev S.M.	1	Kolesov V.V.	2, 4
Dmitrieva M.A.	3	Konovalov I.I.	1
Dolgov E.V.	4	Korobeynikov V.V.	3
Dorohovich S.L.	3	Korzunin A.V.	1
Dvornikov P.A.	3, 4	Kostuhina A.V.	3
Dyachenko A.I.	1	Kovalchuk S.V.	3
Egorov A.F.	3	Kovalev D.M.	3
Egorov D.A.	2	Kovtun S.N.	3, 4

Kryshchuk O.F.	1	Novozhilova O.O.	2,4
Kuleshova E.A.	4	Olevsky E.A.	3
Kurachenko Yu.A.	4	Orlov M.A.	3
Kurbatkin I.I.	4	Orlova E.A.	3
Kurina I.S.	2	Ovcharenko M.K.	1
Kurkin S.A.	2	Pahomov A.Y.	3
Kuzin P.V.	3	Pahomova I.A.	3
Kuznetsov I.A.	2	Panov V.S.	2
Lavrova O.V.	4	Parfenov Y.V.	3
Lemekhov V.V.	2	Pavlov A.V.	3,4
Leskin S.T.	1	Perevezentsev V.V.	2
Levchenko A.V.	3	Pichkov S.N.	4
Levchenko V.A.	3	Pleshakova N.V.	4
Linnik V.A.	1	Polionov V.P.	3,4
Loginov N.I.	1	Politukov V.P.	1,2
Lopatin V.Y.	2	Polous M.A.	2
Loshmanov L.P.	3	Poplavskaia E.V.	3
Lukyanov V.E.	1	Popov V.V.	1,2
Lunyova K.V.	3	Posagennikov A.M.	1
Lyov A.V.	2	Prochorova E.Yu.	3
Makhov K.A.	1	Pyshko A.P.	1
Maltsev D.A.	4	Radaev A.I.	3
Malynkin V.G.	2	Rasenkov N.D.	2
Markov P.V.	1	Remizov O.V.	3
Martynov P.N.	3,4	Roshchin N.G.	3,4
Matjunin A.K.	4	Roznova N.S.	3
Matusevich E.S.	2	Rumyantsev V.N.	2
Matveev A.L.	3,4	Saakyan S.P.	1
Matveev E.L.	3,4	Sadovnichy R.P.	3,4
Maximovsky V.V.	2	Sakharov V.V.	4
Melikhov O.I.	3	Salnikov N.L.	1,2
Melikhov V.I.	3	Saltykov M.A.	4
Mel'nikov K.G.	4	Samoylov O.B.	1
Melnikov V.P.	1	Sazykina T.G.	3
Mikheev A.S.	1	Schekoldin V.I.	3
Mikheev M.V.	2	Serebryakov I.S.	3
Milinchuk V.K.	4	Sergeev V.V.	2
Minin S.I.	2	Sharipova M.A.	4
Miturev K.V.	1	Shchurovskaya M.V.	3
Moiseenko D.N.	4	Shelegov A.S.	3
Molodtsov A.A.	1	Shelemetev V.M.	3,4
Morozov A.V.	3	Shilin V.A.	4
Mosyagina I.V.	4	Shilina A.S.	4
Mukhlinin A.A.	4	Shirshov Ya.N.	3
Muravyeva T.I.	4	Shvetsov D.M.	4
Musikhin Yu.A.	4	Sidorov A.S.	3
Myakisheva L.V.	2	Silaev M.E.	3
Naboyschikov Yu.V.	1	Skachkov E.V.	1
Nedbaylo Y.V.	3	Slobodchuk V.I.	3
Nerovnov A.A.	3	Stasevich M.I.	1
Neverov V.A.	1	Stogov V.Yu.	4
Niyazov S.-A.S.	3,4	Storozhenko A.N.	3
Novinsky E.G.	2,4	Strokin N.A.	2
		Suhonosov V.J.	4
		Suslov I.R.	4

Tikhomirov G.V.....	3	Vlasovec I.A.....	2
Tikhonovsky V.L.....	3	Vo Nhu Dan.....	2
Titarenko N.N.....	3,4	Volov A.N.....	3
Tkachenko V.V.....	1	Yagodkin I.V.....	1
Torbenkova I.Yu.....	3	Yarmonov M.V.....	1
Tormyshev I.V.....	4	Yarygin V.I.....	1,2
Torskaya E.V.....	4	Yatsenko E.M.....	1
Trofimov A.I.....	2	Ylyanov V.V.....	3
Trofimov M.A.....	2,3	Yurev Yu.S.....	1,3
Tyichinskiy P.I.....	3	Yushenko N.E.....	2
Ukraintsev V.F.....	3	Zabusov O.O.....	4
Ulyanov V.V.....	4	Zagrebaev S.A.....	3
Ustyuzhanin A.Ya.....	2	Zaitsev S.I.....	3
Valter A.A.....	2	Zakutaev M.O.....	3
Varivtsev A.V.....	1	Zhemkov I.Yu.....	1
Vinogradov E.G.....	1,2	Zhuravlev B.V.....	4