

# ВЕСЦІ

## НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

---

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2017. № 2

---

# ИЗВЕСТИЯ

## НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2017. № 2

---

Журнал издается с января 1956 г.

Выходит 4 раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,  
свидетельство о регистрации № 391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь  
для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных  
Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).*

Главный редактор

**Петр Александрович Витязь** – Президиум Национальной академии наук Беларуси

Редакционная коллегия

- |                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>А. П. Ласковнѐв</b>   | – Президиум Национальной академии наук Беларуси ( <i>заместитель главного редактора</i> )              |
| <b>И. А. Старостина</b>  | ( <i>ведущий редактор журнала</i> )  |
| <b>А. В. Белый</b>       | – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси                                      |
| <b>В. Г. Залесский</b>   | – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси                                      |
| <b>А. Ф. Ильющенко</b>   | – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии                           |
| <b>Л. Г. Красневский</b> | – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси                             |
| <b>Е. И. Марукович</b>   | – Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси                                     |
| <b>Н. К. Мышкин</b>      | – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого<br>Национальной академии наук Беларуси |
| <b>О. Г. Пенязьков</b>   | – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси                 |

**Ю. М. Плескачевский** – Президиум Национальной академии наук Беларуси  
**В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению  
**М. Л. Хейфец** – Президиум Национальной академии наук Беларуси  
**С. А. Чижик** – Президиум Национальной академии наук Беларуси

#### Редакционный совет

**С. Воденичаров** – Институт металловедения, оборудования и технологий «Академик Ангел Балевский» с Центром по гидро- и аэродинамике Болгарской академии наук (Республика Болгария)  
**Ю. Гавлик** – Комитет по машиностроению Польской академии наук, Краковская политехника имени Т. Костюшко (Республика Польша)  
**Г. Жинтялис** – Литовская академия наук (Литовская Республика)  
**Б. Каталнич** – Дунайско-Адриатическая Ассоциация по автоматизации и производству (DAAAM), Венский технический университет (Австрийская Республика)  
**В. В. Клубович** – Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (Республика Беларусь)  
**А. А. Михалевич** – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (Республика Беларусь)  
**А. Г. Наумовец** – Национальная академия наук Украины (Украина)  
**К. А. Солнцев** – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова (Российская Федерация)  
**Л. Танович** – Белградский университет (Республика Сербия)  
**Б. М. Хрусталёв** – Белорусский национальный технический университет (Республика Беларусь)

#### Адрес редакции:

ул. Академическая, 1, к. 119, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.  
Тел.: + 375 17 284-19-19; e-mail: [ftvesti@mail.ru](mailto:ftvesti@mail.ru)  
[vestift.belnauka.by](http://vestift.belnauka.by)

---

#### ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2017. № 2.

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

Редактор *И. А. Старостина*

Компьютерная вёрстка *Л. И. Кудерко*

Подписано в печать 20.06.2017. Выход в свет 28.06.2017. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 80 экз. Заказ 107.

Цена номера: индивидуальная подписка – 10,34 руб., ведомственная подписка – 25,29 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука».

Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2017

# PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES. 2017. No. 2

---

The Journal has been published since January 1956

Issued four times a year

Founded by the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus  
in the State Registry of Mass Media, reg. No. 391

*The Journal is included in the List of Journals for Publication of the results of Dissertation Research  
in the Republic of Belarus and in the database of Russian Science Citation Index (RSCI)*

## Editor-in-Chief

**Pyotr A. Vityaz** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus

## Editorial Board

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>A. P. Laskovnyov</b>     | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus ( <i>Associate Editor-in-Chief</i> )              |
| <b>I. A. Starostsina</b>    | ( <i>lead editor</i> )   |
| <b>A. V. Byeli</b>          | – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus                              |
| <b>V. H. Zalesky</b>        | – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus                              |
| <b>A. F. Ilyuschenko</b>    | – State Scientific and Production Amalgamation of Powder Metallurgy  |
| <b>L. G. Krasnevski</b>     | – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus                   |
| <b>Eu. I. Marukovich</b>    | – Institute of Technology of Metals of the National Academy of Sciences of Belarus                           |
| <b>N. K. Myshkin</b>        | – V. A. Biely Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus |
| <b>O. G. Penyazkov</b>      | – A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus            |
| <b>Yu. M. Pleskachevsky</b> | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus   |
| <b>V. M. Fedosyuk</b>       | – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus          |
| <b>M. L. Kheiyfets</b>      | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus   |
| <b>S. A. Chizhik</b>        | – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus   |

## Editorial Council

- |                        |  |
|------------------------|--|
| <b>S. Vodenicharov</b> | – Institute of Metal Science, Equipment and Technologies “Acad. A. Balevski” with Hydro- and Aerodynamics Centre of Bulgarian Academy of Sciences (Republic of Bulgaria) |
| <b>J. Gawlik</b>       | – Engineering Sciences Division of Polish Academy of Sciences, Tadeusz Kosciuszko Cracow University of Technology (Republic of Poland)                                   |
| <b>G. Žintelis</b>     | – Lithuanian Academy of Sciences (Republic of Lithuania)   |
| <b>B. Katalinic</b>    | – DAAAM International Vienna, TU Wien (Republic of Austria)  |
| <b>V. V. Klubovich</b> | – Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (Republic of Belarus)  |

- A. A. Mikhalevich** – Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus (Republic of Belarus)  
**A. G. Naumovets** – National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine)  
**K. A. Solntsev** – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences  
(Russian Federation)  
**L. Tanovich** – University of Belgrade (Republic of Serbia)  
**B. M. Khrustalyov** – Belarusian National Technical University (Republic of Belarus)

*Address of the Editorial Office:*

*1, Akademicheskaya Str., room 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.  
Tel.: + 375 17 284-19-19; e-mail: ftvesti@mail.ru  
vestift.belnauka.by*

---

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series. 2017. No. 2.

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

Editor *I. A. Starostina*

Computer imposition *L. I. Kudzerka*

It was sent of the press 20.06.2017. Appearance 28.06.2017. Format 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Offset paper.  
Digital press. Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 80 copies. Order 107.  
Number price: individual subscription – 10,34 BYN, departmental subscription – 25,29 BYN.

Publisher and printing execution:

Republican Unitary Enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka".  
Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions  
No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013.  
Address: 40, F. Scorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka".  
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2017

ISSN 0002-3566 (print)

**СОДЕРЖАНИЕ****МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

<b>Ильющенко А. Ф., Андреев М. А., Маркова Л. В., Лисовская Ю. О.</b> Применение метода просвечивающей электронной микроскопии для оценки формирования ионно-лучевых многослойных наноструктурных покрытий на основе хрома .....	7
<b>Марукович Е. И., Стеценко В. Ю.</b> Наноструктурные процессы при плавке и литье силуминов .....	15
<b>Грабчиков С. С., Ластовский С. Б., Солобай А. А., Труханов А. В., Чушкова Д. И.</b> Особенности синтеза многослойных структур на основе электролитически осажденных пленок никель-железо и эффективность их радиационной защиты .....	23
<b>Василец В. К., Хмыль А. А., Кушнер Л. К., Кузьмар И. И.</b> Влияние режима электролиза на образование «усов» в покрытиях на основе олова .....	30
<b>Вершина Г. А., Реут Л. Е.</b> Упругопластический изгиб фторопластовой ленты при сворачивании в кольцо .....	40
<b>Артамонов А. М.</b> Численное моделирование процессов конденсации тонких пленок и предпроизводственный анализ линейных перестраиваемых фильтров .....	49

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**

<b>Витязь П. А., Хейфец М. Л., Чижик С. А.</b> «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов .....	54
<b>Акулович Л. М., Сергеев Л. Е., Сенчуров Е. В.</b> Особенности магнитно-абразивной обработки штоков цилиндров .....	73
<b>Баштовой В. Г., Кужир П. П., Зубарев А. Ю., Мороз В. С.</b> Диффузия и магнитофорез в нанодисперсных магнитных жидкостях с фазовым переходом .....	78

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**

<b>Казазян В. Т., Лукашевич Л. Г., Малыхин А. П., Рымарчик И. А.</b> О роли отечественной науки в развитии атомной энергетики в Республике Беларусь .....	88
<b>Комар Д. И., Лукашевич Р. В., Гузов В. Д., Кутень С. А.</b> Источник захватного гамма-излучения с энергиями до 7 МэВ и до 10 МэВ на основе поверочной установки нейтронного излучения .....	96
<b>Ахрамович А. П., Войтов И. В., Колос В. П.</b> Динамическая модель скоростной фильтрации теплоносителя в слое микротвэлов .....	104

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

<b>Ольшанский В. И., Довыденкова В. П., Худолеев А. Ф., Дмитракович Н. М.</b> Оптимизация состава полимерной композиции и параметров технологического процесса для термогерметизации специальной защитной одежды пожарных .....	116
---	-----

**УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ**

<b>Михаил Львович Хейфец</b> (К 55-летию со дня рождения) .....	126
---	-----

**CONTENTS****MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**

<b>Ilyushchenko A. Ph., Andreev M. A., Markova L. V., Lisovskaya Y. O.</b> Application of tem for evaluation of formation of ion beam multilayer nanostructured coatings based on chromium.....	7
<b>Marukovich E. I., Stetsenko V. Y.</b> Nanostructural processes at melting and moulding of silumins.....	15
<b>Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Solobai A. A., Trukhanov A. V., Chushkova D. I.</b> Synthesis features and radiation protection efficiency of multilayer structures based on Ni-Fe electrodeposited films .....	23
<b>Vasilets V. K., Khmyl A. A., Kushner L. K., Kuzmar I. I.</b> The effect of electroplating parameters on tin “whiskers” formation.....	30
<b>Vershina G. A., Reut L. E.</b> Elasto-plastic bending of a fluoroplastic tape at bending in a ring .....	40
<b>Artamonov A. M.</b> Numerical simulation of thin film condensation processes and pre-production analysis of linear variable filters .....	49

**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

<b>Vitiaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A.</b> “Industry 4.0”: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms .....	54
<b>Akulovich L. M., Sergeev L. E., Senchurov E. V.</b> Particularities of magnetic-abrasive machining of rods of hydraulic cylinders .....	73
<b>Bashtovoi V. G., Kuzhir P. P., Zubarev A. Yu., Moroz V. S.</b> Diffusion and magnetophoresis in nanodispersed magnetic fluids with phase transition .....	78

**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

<b>Kazazyan V. T., Lukashevich L. G., Malykhin A. P., Rymarchyk I. A.</b> On the role of native science in the development of nuclear energy in the Republic of Belarus.....	88
<b>Komar D. I., Lukashevich R. V., Guzov V. D., Kutsen S. A.</b> A source of neutron capture gamma-ray with energy to 7 MeV and to 10 MeV based on neutron calibration facility.....	96
<b>Akhramovich A. P., Voitov I. V., Kolos V. P.</b> Dynamic model of rapid coolant filtration through a bed of micro fuel particles .....	104

**DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

<b>Olshansky V. I., Dovydenkova V. P., Hudoleev A. F., Dmitrakovich N. M.</b> Optimization of a mixture of polymeric composition and parameters of technological process for thermo-sealing of special protective clothes for fireman .....	116
---	-----

**SCIENTISTS OF BELARUS**

<b>Mikhail Lvovich Kheifetz</b> (On his 55 <sup>th</sup> birthday) .....	126
--	-----

**А. Ф. Ильющенко<sup>1</sup>, М. А. Андреев<sup>2</sup>, Л. В. Маркова<sup>1</sup>, Ю. О. Лисовская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Обособленное хозяйственное структурное подразделение «Институт сварки и защитных покрытий»  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНО- СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ХРОМА**

Целью данной работы является изучение механизма формирования монослоя в многослойном ионно-лучевом наноструктурном покрытии методом просвечивающей электронной микроскопии, а также разработка модели формирования и роста монослоя при ионно-лучевом распылении мишени с ионным ассистированием подложки.

Для исследования механизма формирования и роста монослоя в покрытии была разработана методика препарирования образцов для их последующего изучения с использованием электронного микроскопа Tescan MIRA (Чехия), позволяющего получить изображения поверхности исследуемого объекта с высоким разрешением, особенно при низких ускоряющих напряжениях. Для исследования тонких пленок метод просвечивающей электронной микроскопии используется гораздо чаще, чем сканирующей, поэтому разработана приставка, позволяющая получать изображения в проходящих электронах – ТЕ-детектор для исследования методом сканирующей просвечивающей электронной микроскопии (STEM – Scanning Transmission Electron Microscopy).

При изучении монослоев методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием ТЕ-детектора предложен механизм формирования монослоя в многослойном ионно-лучевом наноструктурном покрытии, состоящий из следующих этапов: адсорбция частиц хрома на поверхности подложки; поверхностная диффузия к ступени винтовой дислокации; 2D-рост монослоя хрома (формирование 2D-террас) из 2D-островков; 2D→3D-переход – переход в режим роста трехмерных островков (3D-рост) по механизму Странского – Крастанова.

Разработана модель формирования и роста монослоя при ионно-лучевом распылении мишени с ионным ассистированием подложки.

*Ключевые слова:* многослойное наноструктурное покрытие, ионно-лучевое покрытие, механизм Странского – Крастанова, когерентный островок, метод сканирующей просвечивающей электронной микроскопии

**A. Ph. Ilyushchenko<sup>1</sup>, M. A. Andreev<sup>2</sup>, L. V. Markova<sup>1</sup>, Y. O. Lisovskaya<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Institute of Welding and Protective Coatings of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

## **APPLICATION OF TEM FOR EVALUATION OF FORMATION OF ION BEAM MULTILAYER NANOSTRUCTURED COATINGS BASED ON CHROMIUM**

The aim of the work is to study a mechanism of formation of a monolayer in a multilayered ion beam nanostructured coating by transmission electron microscopy (TEM), and a model of formation and growth of a monolayer by ion beam sputtering of target substrate with an ion assisting.

To investigate the mechanism of formation and growth of monolayer in the coating a technique of sample preparation was developed for further study using electron microscopy Tescan MIRA (Czech Republic), allowing to obtain image surface of an object with high resolution, especially at low accelerating voltages. For the study of thin films, transmission electron microscopy is used much more frequently than scanning, so a console has been designed that allows to obtain images in the passing electrons – TE detector for study by scanning transmission electron microscopy (STEM – Scanning Transmission Electron Microscopy).

During study of monolayers by transmission electron microscopy using a TE detector, a mechanism of the formation of monolayer in multilayer ion-beam nanostructured coating has been proposed, consisting of the following steps: the adsorption of chromium particles on the substrate surface; surface diffusion to the stage of a screw dislocation; 2D-growth of chromium monolayer (2D-formation terraces) of 2D-islands; 2D→3D transition – the transition to three-dimensional island growth mode (3D-growth) by the mechanism of Stransky – Krastanow.

The model of formation and growth of monolayer under ion-beam sputtering of a target with ion-assisted substrate has been developed.

*Keywords:* multilayer nanostructured coating, ion beam coating, mechanism of Stransky – Krastanow, a coherent island, scanning transmission electron microscopy method

**Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко**

*Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, Могилев, Беларусь*

## **НАНОСТРУКТУРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПЛАВКЕ И ЛИТЬЕ СИЛУМИНОВ**

Существующие теории жидкого состояния, кристаллизации и модифицирования не позволяют определить наноструктурные физико-химические механизмы плавки и литья силуминов. Чтобы исследовать тонкую структуру этих процессов, необходимо считать расплав состоящим из термодинамически стабильных нанокристаллов фаз и бесструктурных атомизированных зон. В результате проведенных исследований показано, что плавка и литье силуминов являются сложными наноструктурными процессами. При плавке и литье доэвтектического силумина определяющую роль играют центры кристаллизации первичных кристаллов алюминия, нанокристаллы алюминия, растворенный и адсорбированный водород. Значение модификаторов сводится к поглощению растворенного водорода и интенсификации процесса коагуляции нанокристаллов алюминия в центры кристаллизации первичных кристаллов алюминия. В процессах плавки и литья эвтектического силумина главенствуют центры кристаллизации эвтектических кристаллов алюминия, растворенный и адсорбированный водород. Роль модифицирующего флюса сводится к образованию натриевой эмульсии, на которой происходит выделение пузырьков водорода при эвтектической кристаллизации. Это способствует разветвлению кристаллов алюминия и получению модифицированной эвтектической микроструктуры. В процессах плавки и литья заэвтектического силумина определяющее значение приобретают центры кристаллизации первичных кристаллов кремния, нанокристаллы кремния, растворенный и адсорбированный кислород. В этом случае роль модификаторов сводится к уменьшению концентрации адсорбированного кислорода и интенсификации процесса коагуляции нанокристаллов кремния в центры кристаллизации первичных кристаллов кремния.

*Ключевые слова:* плавка, литье, силумины, модифицирование, нанокристаллы, центры кристаллизации, наноструктурные процессы

**E. I. Marukovich, V. Y. Stetsenko**

*Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus*

## **NANOSTRUCTURAL PROCESSES AT MELTING AND MOULDING OF SILUMINS**

The existing theories of liquid state, crystallization and modifying don't allow determining nanostructural physical and chemical mechanisms of melting and casting of silumins. To research thin structure of these processes, it is necessary to consider fusion as consisting of thermodynamic stable nanocrystals of phases and unstructured atomized zones. As a result of the conducted researches it is shown that melting and casting of silumins are complicated nanostructural processes. During melting and casting of hypoeutectic silumin the determining role is played by centers of crystallization of primary crystals of aluminum, aluminum nanocrystals, the dissolved and adsorbed hydrogen. The role of modifiers comes down to absorption of dissolved hydrogen and an intensification of process of coagulation of nanocrystals of aluminum in the centers of crystallization of primary crystals of aluminum. At processes of melting and casting of eutectic silumin the major role is played by the centers of crystallization of the eutectic crystals of aluminum, the dissolved and adsorbed hydrogen. The role of the modifying flux comes down to formation of a sodium emulsion on which there is an allocation of bubbles of hydrogen in case of the eutectic crystallization. It promotes a branching of crystals of aluminum and receipt of the modified eutectic microstructure. At processes of melting and casting of hypereutectic silumin the determining role is played by the centers of crystallization of primary crystals of silicon, silicon nanocrystals, dissolved and adsorbed oxygen. In this case the role of modifiers comes down to reduction of concentration of the adsorbed oxygen and an intensification of process of coagulation of nanocrystals of silicon in the centers of crystallization of primary crystals of silicon.

*Keywords:* melting, casting, silumins, modifying, nanocrystals, centers of crystallization, nanostructural processes

**S. S. Grabchikov, S. B. Lastovskii, A. A. Solobai, A. V. Trukhanov, D. I. Chushkova**

*Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

## **SYNTHESIS FEATURES AND RADIATION PROTECTION EFFICIENCY OF MULTILAYER STRUCTURES BASED ON Ni-Fe ELECTRODEPOSED FILMS**

Modern semiconductor devices and microchips are sensitive to the effects of ionizing radiation. Nevertheless, they are widely used in military and space technology, in the nuclear industry. At the same time, a number of technological, circuit and software solutions are used to reduce the effects of radiation exposure. The most preferable method is one based on using shields, due to its low cost and excellent radiation properties of shield's materials. Recently, special attention has been paid to the study of multilayer structures.

Experimental samples of Ni-Fe alloys and multilayer Ni-Fe/Cu structures with different chemical composition were obtained by electrochemical deposition. The dependence of chemical composition variation from deposition conditions was determined. Ni-Fe alloys crystal structure was studied using X-ray diffraction.

Shielding properties of Ni-Fe/Cu multilayer structures were investigating on linear accelerator ELA-4 under 4 MeV electron irradiation. Silicon p-MOSFETs were used as test structures. Evaluation of electron flow weakening effectiveness was performed by current-voltage characteristics changing – threshold voltage of pMOS-transistors, which were located behind shields based on NiFe/Cu multilayered structures and without shields. It was found that increasing number of Ni-Fe layers within the same total thickness leads to maximum shielding efficiency.

*Keywords:* electrodeposition, shielding, shields, radiation protection, Ni-Fe alloys



**С. С. Грабчиков, С. Б. Ластовский, А. А. Солобай, А. В. Труханов, Д. И. Чушкова**

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
Минск, Беларусь*

## **ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПЛЕНОК НИКЕЛЬ-ЖЕЛЕЗО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ**

Современные полупроводниковые приборы и микросхемы чувствительны к воздействию ионизирующих излучений. Тем не менее они широко применяются в военной и космической технике, в ядерной промышленности. При этом используется ряд технологических, схмотехнических и программных решений, уменьшающих последствия радиационного воздействия. Наиболее предпочтительным решением является выбор метода на основе использования экранов, поскольку он экономичнее и определяется радиационными свойствами используемых для изготовления экранов материалов. В последнее время особое внимание уделяется исследованию многослойных структур, так как при прохождении излучений через эти материалы возможно значительное ослабление эффектов радиационного воздействия, что имеет значительный научный и прикладной интерес.

Методом электролитического осаждения получены экспериментальные образцы покрытий сплавов NiFe и многослойных структур NiFe/Cu с различным химическим составом. Установлены зависимости изменения химического состава от условий осаждения. Методом рентгеновской дифракции проведены исследования кристаллической структуры. Покрытия характеризуются гранцентрированной кубической решеткой, с увеличением концентрации железа параметр элементарной ячейки увеличивается.

Эффективность радиационной защиты многослойных структур NiFe/Cu оценивалась при облучении электронами с энергией 4 МэВ на линейном ускорителе ЭЛУ-4. В качестве тестовых структур использовались кремниевые МОП-транзисторы. Эффективность ослабления электронного потока была оценена по изменению вольтамперных характеристик: порогового напряжения для МОП транзисторов, расположенных за экранами на основе многослойных структур NiFe/Cu, и без экранов. Установлено, что с ростом количества слоев при сохранении суммарной толщины эффективность экранирования увеличивается, что позволяет создавать высокоэффективные экраны при сопоставимых массогабаритных параметрах.

*Ключевые слова:* электроосаждение, экранирование, экраны, радиационная защита, сплавы NiFe

**В. К. Василец, А. А. Хмыль, Л. К. Кушнер, И. И. Кузьмар**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ОБРАЗОВАНИЕ «УСОВ» В ПОКРЫТИЯХ НА ОСНОВЕ ОЛОВА**

Статья посвящена исследованию потенциальных дефектов, которые могут появиться в тонкопленочных электрохимических покрытиях на основе олова, не содержащих свинца, при их длительном хранении. Целью исследования является разработка технологических режимов электролиза, обеспечивающих минимизацию вероятности появления таких дефектов и надежную работу радиоэлектронной аппаратуры. Рассмотрены проблемы применения олова и бессвинцовых сплавов на его основе в радиоэлектронике, а также методы борьбы с такими потенциальными дефектами, как образование «усов». Для контроля роста «усов» в послеэлектролизный период (12 месяцев естественного старения в условиях лаборатории) было выбрано покрытие Sn-Bi, которое формировали с использованием как постоянного, так и импульсно-реверсированного токов. На основании результатов, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, установлено, что осаждение сплава с использованием импульсного и реверсированного тока не только улучшает структуру формируемых покрытий, но и существенно снижает склонность к образованию «усов», их длину и плотность на единицу площади в сравнении с покрытиями, полученными на постоянном токе. Установлены возможные причины достижения высокого качества электрохимических покрытий сплавом Sn-Bi. Наиболее медленный рост «усов» отмечен на реверсированном токе со средней плотностью  $i_{cp} = 2 \text{ А/дм}^2$ , частоте  $f = 1 \text{ Гц}$  и коэффициенте заполнения  $\gamma = 1,5$ .

*Ключевые слова:* бессвинцовые сплавы, нестационарный электролиз, «усы»

**V. K. Vasilets, A. A. Khmyl, L. K. Kushner, I. I. Kuzmar**

*Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

## **THE EFFECT OF ELECTROPLATING PARAMETERS ON TIN “WHISKERS” FORMATION**

The article is devoted to the investigation of potential defects that can appear in thin-film electrochemical coatings based on tin, which do not contain lead, during their long storage. The purpose of the study is to develop technological regimes of electrolysis, which ensure minimization of the probability of the appearance such defects and reliable operation of radio electronic equipment. The problems of tin and lead-free alloys based on it, as well as methods of elimination of such potential defects as the formation of “whiskers” are considered. To control the growth of “whiskers” in the post-electrolysis period (12 months of natural aging under laboratory conditions), a Sn-Bi coating was chosen, which was formed using both a constant and a pulse-reversed current. Based on the results which were obtained with scanning electron microscope, it was established that deposition of an alloy using pulsed and reverse current not only improves the structure of the coatings formed, but also significantly reduces the propensity to form whiskers, their length and density per unit area in comparison with coatings obtained with direct current. Possible reasons for achievement of high quality electrochemical coatings with Sn-Bi alloy have been established. The slowest growth of “whiskers” was obtained at reversed current with an average density  $i_{av} = 2 \text{ A/dm}^2$ , frequency  $f = 1 \text{ Hz}$  and duty ratio  $\gamma = 1.5$ .

*Keywords:* lead-free alloys, non-stationary electrolysis, “whiskers”

**Г. А. Вершина, Л. Е. Реут**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

## **УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ФТОРОПЛАСТОВОЙ ЛЕНТЫ ПРИ СВРАЧИВАНИИ В КОЛЬЦО**

В работе рассматривается технологический процесс изготовления уплотнительных фторопластовых колец из ленточной заготовки и исследуется возможность их получения методом холодной навивки ленты на цилиндрическую оправку и разрезания спирали на кольца без последующей операции нагрева и термофиксации размеров. Основанием для принятия такой технологии является анализ механических свойств фторопласта-4 и его деформационное поведение в условиях силового воздействия. Исследования показывают, что высокая пластичность материала и склонность фторопласта-4 к хладотекучести способствуют возникновению необратимых деформаций при низких температурах и невысоких нагрузках и делают возможной получение фторопластовых изделий методом холодного формования реально осуществимой, подобно тому, как это происходит в металлах, но с учетом особенностей свойств полимера. Поскольку процесс перестройки структуры и достижение ею равновесного состояния имеет релаксационный характер, необходимым этапом холодного формоизменения является выдержка изделия под нагрузкой в течение времени, требуемого для сохранения детали заданных размеров. При этом точность размеров получаемых колец в значительной степени определяется точностью инструмента (цилиндрического калибра), на который производится навивка ленты. Рассматривая данную схему деформирования как чистый изгиб, при котором в заготовке возникают области растяжения и сжатия, и принимая для фторопласта модель твердого деформируемого тела с возможностью возникновения упругих и остаточных деформаций, авторами впервые обосновано и доказано, что при сжатии фторопласт-4 ведет себя как жестко-пластичный материал, а при растяжении модель его поведения соответствует упругопластичному материалу, сохраняющему даже при значительных необратимых изменениях некоторую долю упругих деформаций. Это приводит к пружинению детали после разгрузки и изменению проектного размера, что следует учитывать при разработке технологического процесса и проектировании инструмента. Авторами разработана методика расчета калибровочного инструмента с учетом эффекта упругого последействия в изделии, позволяющая получать фторопластовые кольца требуемых размеров и формы. Полученные результаты являются достоверными и подтверждены экспериментально.

*Ключевые слова:* фторопласт, структура, механические свойства, модель материала, деформационное поведение при силовом нагружении, упругие и остаточные деформации, рекристаллизация, холодное формоизменение заготовки, изгиб ленты, модель поведения при растяжении и сжатии, пружинение, расчет инструмента

**G. A. Vershina, L. E. Reut**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

## **ELASTO-PLASTIC BENDING OF A FLUOROPLASTIC TAPE AT BENDING IN A RING**

A technological process of production of sealing fluoroplastic rings from a band workpiece is considered and the possibility of their production by a method of cold coiling of the tape on a cylindrical mandrel is investigated; the helix is cut in rings without subsequent heating operation and thermal fixing of sizes. The basis for adoption of such a technology is the analysis of mechanical properties and deformation behavior of fluoroplastic-4 in the conditions of power influence. Researches show that high plasticity of material and tendency of fluoroplastic-4 to cold flow contribute to emergence of irreversible deformations at low temperatures and low loadings and make possible obtaining fluoroplastic products by method of cold formation just as it occurs in metals, but taking into account particularities of polymer properties. Since the process of reorganization of structure and achievement of the equilibrium state has relaxation character, a necessary stage of cold forming is the endurance of a product under loading during the time required for preservation of given sizes by a detail. At the same time the accuracy of sizes of obtained rings is substantially defined by the tool accuracy (cylindrical caliber) on which is produced by winding of the tape. Considering this scheme of deformation as a pure bending at which there are areas of stretching and compression in a billet, and accepting for a fluoroplastic a model of a solid deformable body with possibility of elastic and residual deformations, it is for the first time proved by authors that fluoroplastic-4 behaves at compression as a rigid and plastic material, and at stretching the model of its behavior corresponds to elastic-plastic material. It means that zone of compression is completely captured by irreversible deformation and its sizes after unloading aren't restored, and stretching zone even at

**А. М. Артамонов**

*ООО «ИЗОВАК Технологии», Минск, Беларусь*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК И ПРЕПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ФИЛЬТРОВ**

Линейные перестраиваемые фильтры являются одним из перспективных видов оптических изделий для создания приборов спектрометрии различного назначения. Применение данного вида изделий позволяет без снижения характеристик значительно упрощать оптическую схему прибора. При использовании с классическими схемами линейные перестраиваемые фильтры дают возможность улучшить характеристики оптических устройств. С точки зрения технологии изготовления такого вида полосовых фильтров представляет собой достаточно сложную задачу. В статье представлены текущие результаты по разработке технологии производства линейных перестраиваемых фильтров. В ходе проведения работы было создано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать распределение сконденсированного материала на поверхности подложки с учетом геометрии источника, подложки, масок и всей системы в целом. Проведен расчет оптических характеристик и анализ физических толщин линейного перестраиваемого фильтра, получены зависимости изменения толщины покрытия от координаты подложки. В основу геометрической модели для расчета легла геометрия вакуумного технологического оборудования Advanced Optical Coater (ВТО АОС) производства ООО «ИЗОВАК» (Республика Беларусь). Исходя из полученных данных при помощи программного обеспечения предложена оптимальная геометрия вакуумной маски для получения требуемого спектрального градиента.

*Ключевые слова:* оптика, фильтры, спектрометрия, осаждение, магнетрон, плазма, вакуумное маскирование, численное моделирование

**A. M. Artamonov**

*IZOVAC Technologies Ltd, Minsk, Belarus*

## **NUMERICAL SIMULATION OF THIN FILM CONDENSATION PROCESSES AND PRE-PRODUCTION ANALYSIS OF LINEAR VARIABLE FILTERS**

Linear variable filters are one of the promising types of optical elements for creating multipurpose spectrometers. Application of this type of elements allows simplifying the optical scheme of the device significantly without great reduction of its characteristics. Using classical optical systems, linear variable filters improve the performance of optical devices. From the technology point of view, making this type of bandpass filter is a rather complex task. Current results of technology development of linear variable filters are considered in the article. In the course of work, a software was developed to calculate the distribution of condensed material on the substrate surface, taking into account the geometry of the source, substrate, masks and the whole system. Calculation of optical characteristics and analysis of the physical thicknesses of a linear variable filter were performed, and the dependence of the thickness of the coating on the coordinate of the substrate was obtained. The geometrical model for calculation was based on the geometry of the vacuum technological equipment – Advanced Optical Coater (VTE AOC), manufactured by IZOVAC Ltd. (Republic of Belarus). Based on the data obtained by using the software, the optimal geometry of the vacuum mask was proposed to obtain the required spectral gradient.

*Keywords:* optics, filters, spectrometry, deposition, magnetrons, plasma, vacuum mask, numerical simulation

**П. А. Витязь<sup>1,2</sup>, М. Л. Хейфец<sup>1,3</sup>, С. А. Чижик<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>3</sup>*ГНПО «Центр» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>4</sup>*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь*

## **«ИНДУСТРИЯ 4.0»: ОТ ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЮ МАШИН И ОРГАНИЗМОВ**

Проведен анализ состояния и перспектив развития аддитивных технологий компьютеризированного производства, позволивший показать новую парадигму его эволюции – переход к самовоспроизведению машин и их частей, а также организмов.

Предложена диаграмма логических связей в процессах аддитивного производства, представляющая собой конечный автомат, которая может использоваться как для построения 3D-принтера, осуществляющего «выращивание» изделия сложной формы и структуры, так и для аддитивного синтеза его композиционного материала.

Рекомендован подход, который определяет аддитивные методы как синерготехнологии, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений. На основании подхода выбираются источники энергии и материала для технологий послойного синтеза изделий. Стабилизация толщины формируемых слоев связана с процессами самоорганизации поверхностных явлений и конструктивными особенностями изделий.

*Ключевые слова:* компьютеризированное производство, аддитивные технологии, самовоспроизведение машин, конечный автомат, клеточный автомат, послойный синтез, синерготехнологии, самоорганизация

**P. A. Vitiaz<sup>1,2</sup>, M. L. Kheifetz<sup>1,3</sup>, S. A. Chizhik<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>3</sup>*State Scientific and Production Association “Center” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>4</sup>*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

### **“INDUSTRY 4.0”: FROM INFORMATION AND COMMUNICATION AND ADDITIVE TECHNOLOGIES TO SELF-REPRODUCTION OF MACHINES AND ORGANISMS**

An analysis of the state and prospects of development of additive technologies for computer-aided manufacturing has been carried out. This analysis allowed demonstrating a new paradigm of computer-aided manufacturing evolution – the transition to self-reproduction of machines and their parts, as well as organisms.

A diagram of logical connections in the process of additive manufacturing has been proposed, which is a state machine that can be used to build a 3D printer enabling to “grow” products of complex shapes and structures, as well as for additive synthesis of its composite material.

Prospective approach, considering additive methods such as synergetic energy technology, ensuring the self-organization of surface phenomena in the formation of structures of layers of different materials has been developed. It is proposed on the basis of the approach to choose sources of energy and material defining discrete or continuous technological environment of the additive processing method. Conditions for stabilization of the thickness of formed layers associated with processes of self-organization of surface phenomena and design features of products have been discussed.

*Keywords:* computerized production, additive technologies, self-reproduction machines, finishing machine, cellular automaton, layered synthesis, synergetic technologies, self-organizing

**Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, Е. В. Сенчуров**

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь*

### **ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШТОКОВ ГИДРОЦИЛИНДРОВ**

Получение высокого параметра шероховатости хромированных поверхностей при достаточно большой производительности и точности геометрических параметров представляют серьезную проблему. Рассмотрен процесс магнитно-абразивной обработки штоков гидроцилиндров, который обеспечивает уменьшение шероховатости рабочих поверхностей. Образцами служили штоки гидроцилиндров, изготовленные из стали 20Х ГОСТ 4543-71. Образцы подвергались термообработке до HRC 61–64, шлифованию до получения шероховатости поверхности  $Ra$  0,8 мкм, полированию под хромирование методом магнитно-абразивной обработки и последующему хромированию (толщина слоя хрома 0,02–0,03 мм). Проведенные исследования магнитно-абразивной обработки хромированных штоков гидроцилиндров показали, что шероховатость поверхности уменьшается на 54 % при изменении времени обработки от 60 до 150 с. Дальнейшее увеличение времени обработки приводит к падению интенсивности съема материала, в результате чего уменьшение шероховатости при времени обработки от 60 до 210 с равно 61 %. Применение метода магнитно-абразивной обработки для штоков гидроцилиндров до их хромирования обеспечило за 90 с обработки снижение шероховатости  $Ra$  с 0,8 до 0,2 мкм. Это позволяет сделать вывод, что механизм процесса магнитно-абразивной обработки, обеспечивающий массовый и размерный съем металла хромированных поверхностей, аналогичен процессу обработки нехромированных. Разница в интенсивности съема объясняется тем, что хромовое покрытие деталей, обладая значительной износостойкостью и твердостью, препятствует более интенсивному протеканию процесса.

*Ключевые слова:* шток гидроцилиндра, магнитно-абразивная обработка, шероховатость, качество поверхности

**L. M. Akulovich, L. E. Sergeev, E. V. Senchurov**

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*

### **PARTICULARITIES OF MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF RODS OF HYDRAULIC CYLINDERS**

Obtaining high parameter of roughness of chrome-plated surfaces with rather big productivity and accuracy of geometrical parameters represents a serious problem. A process of magnetic and abrasive processing of rods of hydraulic cylinders which provides reduction of roughness of working surfaces is considered. Hydraulic cylinders which have been made of steel 20Cr GB 3077-88 were used as samples. Samples were exposed to heat treatment to HRC 61–64, grounded to obtain roughness of a surface of  $Ra$  0.8 microns, prepared for chromium plating by polishing by the method of magnetic and abrasive processing and then chromeplated (thickness of a layer of chrome of 0.02–0.03 mm). The conducted researches of magnetic and abrasive processing of the chrome-plated rods of hydraulic cylinders have shown that the roughness of a surface decreases by 54 % at change of time of processing from 60 to 150 seconds. Further increase of the processing time leads to falling of intensity of material removal therefore decrease of a roughness at time of processing within the range from 60 to 210 seconds is equal to 61 %. Application of the method of magnetic and abrasive processing for rods of hydraulic cylinders before their chromium plating has provided the decrease of roughness  $Ra$  from 0.8 to 0.2 microns in 90 seconds of processing. It allows drawing a conclusion that the mechanism of process of magnetic and abrasive processing, which provides mass and dimensional removal of metal of chrome-plated surfaces is similar to the processes of treatment of not chrome-plated ones. The difference of removal intensity is explained by the fact that the chromic covering of details, having considerable wear resistance and hardness, interferes with more intensive course of process.

*Key words:* hydraulic cylinder rod, magnetic and abrasive processing, roughness, quality of a surface

**В. Г. Баштовой<sup>1</sup>, П. П. Кужир<sup>2</sup>, А. Ю. Зубарев<sup>3</sup>, В. С. Мороз<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Университет Ниццы-Софии Антиполис, Ницца, Франция

<sup>3</sup>Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

<sup>4</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

## **ДИФФУЗИЯ И МАГНИТОФОРЕЗ В НАНОДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЯХ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ**

В работе описаны процессы массопереноса в нанодисперсных магнитных суспензиях (магнитных жидкостях) в предположении существования частиц в них в виде двух фазовых состояний: газообразного и конденсированного, с границей фазового перехода между ними, определяемой известными условиями термодинамического равновесия. В газовой фазе распределение концентрации магнитных частиц подчиняется уравнению диффузии, а в конденсированной фазе предполагается постоянным. Процесс описывается безразмерным магнитным параметром, представляющим собой отношение магнитной энергии частицы к тепловой, а также параметром, характеризующим дипольное взаимодействие между частицами.

На основании уравнений диффузии и равновесия фаз представлено аналитическое решение одномерной задачи о распределении концентрации частиц в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле.

Показано, что при заданной средней концентрации частиц фазовый переход наблюдается при превышении магнитным параметром определенных значений, а область конденсированной фазы увеличивается с его ростом. При больших его значениях в рассмотренной задаче координата границы фазового перехода практически линейно зависит от средней концентрации частиц.

*Ключевые слова:* магнитная жидкость, диффузия, магнитофорез, фазовый переход, магнитное поле

**V. G. Bashtovoi<sup>1</sup>, P. P. Kuzhir<sup>2</sup>, A. Yu. Zubarev<sup>3</sup>, V. S. Moroz<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>University of Nice-Sophia Antipolis, Nice, France

<sup>3</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

<sup>4</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

## **DIFFUSION AND MAGNETOPHORESIS IN NANODISPERSED MAGNETIC FLUIDS WITH PHASE TRANSITION**

A description of mass transfer processes in nanodispersed magnetic suspensions (magnetic fluids) is proposed under the assumption that assembly of magnetic particles in them can exist in the form of two phases: gaseous and condensed, and the phase transitions are determined by well-known thermodynamic conditions of phase equilibrium and depend on concentration of particles and magnetic field intensity.

The distribution of concentration of magnetic particles in a gas phase conforms the diffusion equation, and in the condensed phase it is supposed to be constant. Process is described by the dimensionless magnetic parameter representing the relation of magnetic energy of a particle to thermal one, and also by the parameter characterizing dipole-dipole interaction between particles.

The analytical solution to one-dimensional problem on distribution of concentration of particles in a magnetic fluid in locally non-uniform magnetic field is presented on the basis of the equations of diffusion and phase equilibrium.

It is shown, that phase transition at given average concentration of particles is observed when the magnetic parameter exceeds certain value, and the area of the condensed phase increases with its increasing. At its large values the coordinate of phase transition boundary depends on average concentration of particles in the considered problem practically linearly.

*Keywords:* magnetic fluid, diffusion, magnetophoresis, phase transition, magnetic field

**V. T. Kazazyan, L. G. Lukashevich, A. P. Malykhin, I. A. Rymarchyk**

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

## **ON THE ROLE OF NATIVE SCIENCE IN THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR ENERGY IN THE REPUBLIC OF BELARUS**

The history of the development of nuclear science researches in the nuclear center of the Republic of Belarus is described. There were two State programs in Belarus devoted to the problems of the nuclear power. One of them was finished in 2010.

Within the program, there have been resolved such tasks as: necessity of the nuclear power engineering, selection of the site for the nuclear power plant, developments of the legislation and regulations to ensure nuclear and radiation safety, as well as project of the strategy for radioactive waste management and spent fuel management.

At the second stage for fulfilling the tasks of development and implementation of scientific and technical suggestions, the State program «Scientific support of nuclear power development in the Republic of Belarus for 2009–2010 and for the period till 2020» is carried out.

The results of researches within the second program for 2013–2015 years are presented.

*Keywords:* nuclear power, legislation, regulation, radioactive waste, spent fuel, nuclear and radiation safety

**В. Т. Казазян, Л. Г. Лукашевич, А. П. Малыхин, И. А. Рымарчик**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

## **О РОЛИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКИ В РАЗВИТИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**

В статье дается краткий обзор научной деятельности в области атомной энергетики в советский и постсоветский периоды развития Республики Беларусь.

Приводятся сведения о производстве и потреблении электроэнергии, которые свидетельствуют о целесообразности развития атомной энергетики в Республике Беларусь. Описываются этапы развития работ в этой области. Первый этап включает обоснование необходимости строительства АЭС, ее мощности, определение места размещения, выбор площадки АЭС, разработку нормативной правовой и нормативной технической базы и проекта стратегии обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в Республике Беларусь. Указанные задачи решались в 2006–2010 гг. в рамках Государственной научно-технической программы «Ядерно-физические технологии для народного хозяйства Беларуси».

На втором этапе с целью разработки и внедрения научно-технических предложений об оптимизации технологических процессов, повышающих ядерную, радиационную и экологическую безопасность, физическую защиту, а также эффективность объектов использования атомной энергии, была утверждена Государственная программа «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009–2010 годы и на период до 2020 года».

Поскольку результаты выполнения заданий этой программы за 2009–2012 гг. были опубликованы ранее, в статью приводятся результаты исследований за 2013–2015 гг.

*Ключевые слова:* атомная энергетика, нормативная правовая база, нормативная техническая база, радиоактивные отходы, отработавшее ядерное топливо, ядерная и радиационная безопасность

**Д. И. Комар<sup>1</sup>, Р. В. Лукашевич<sup>1</sup>, В. Д. Гузов<sup>1</sup>, С. А. Кутень<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», Минск, Беларусь*

*<sup>2</sup>Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь*

## **ИСТОЧНИК ЗАХВАТНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЯМИ ДО 7 МэВ И ДО 10 МэВ НА ОСНОВЕ ПОВЕРОЧНОЙ УСТАНОВКИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Широкое распространение и использование техногенных источников ионизирующих излучений, в частности таких, как ускорители заряженных частиц и ядерные реакторы, приводит к появлению ряда прикладных задач по метрологическому обеспечению спектрометрической и дозиметрической аппаратуры, работающей в полях фотонного излучения с энергией до 10 МэВ.

Контейнер-коллиматор с геометрией тепловых нейтронов установки поверочной нейтронного излучения (УПН-АТ140, УП «АТОМТЕХ») формирует коллимированный пучок нейтронов со значительной составляющей нейтронов тепловых энергий. Расположение в потоке тепловых нейтронов диска из титана позволяет получить поле захватного гамма-излучения до 7 МэВ, а диска из никеля – до 10 МэВ.

Для экспериментального изучения спектральных характеристик поля захватного излучения использовался специализированный спектрометрический блок детектирования на основе кристалла  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  с размерами  $\varnothing 38 \times 38$  мм с нелинейной характеристикой преобразования канал-энергия в диапазоне до 10 МэВ. На спектрах хорошо различимы основные линии захватного излучения от водорода, бора, титана и никеля.

По полученным на блоке детектирования спектрам можно сделать вывод о возможности калибровки спектрометрических блоков в поле захватного гамма-излучения до 10 МэВ.

*Ключевые слова:* захватное гамма-излучение, радионуклидный источник нейтронов, геометрия тепловых нейтронов, мишень из титана, мишень из никеля, спектрометрический блок детектирования

D. I. Komar<sup>1</sup>, R. V. Lukashevich<sup>1</sup>, V. D. Guzov<sup>1</sup>, S. A. Kutsen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SPE "ATOMTEX", Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus

## A SOURCE OF NEUTRON CAPTURE GAMMA-RAY WITH ENERGY TO 7 MeV AND TO 10 MeV BASED ON NEUTRON CALIBRATION FACILITY

Wide spread of technogenic sources of ionizing radiation such as particle accelerators and nuclear reactors leads to appearance of a number of applied metrological tasks aimed at providing spectrometric and dosimetric ionization measurement instruments, located in photon radiation fields with energy to 10 MeV.

Gamma rays with energy higher 3 MeV may be acquired using radioactive thermal neutron capture on target, i.e. ( $n, \gamma$ )-nuclear reaction. Titanium is used in the range of energies to 7 MeV; nickel – to 10 MeV. A simplest source of instantaneous neutron capture gamma-ray should consist of fast neutron source, neutron moderator and a target irradiated with thermal neutrons. The collimator with thermal neutron geometry of AT140 neutron calibration facility with <sup>238</sup>Pu–Be fast neutron source may be used (IBN–8–6) as a source of gamma-ray with energy to 10 MeV.

Monte-Carlo models of thermal neutrons geometry, facility and <sup>238</sup>Pu–Be fast neutron source were built using MCNP–4b code. Energy distribution of flux density of neutron capture gamma–ray for titanium and nickel targets was defined.

A spectrometric detector based on LaBr<sub>3</sub>(Ce) crystal Ø 38×38 mm with non-linear characteristics of channel-energy transformation in the range up to 10 MeV, was specifically manufactured for instrumental support of the experiment at SPE "ATOMTEX". The results for Ti, Ni, and for bare <sup>238</sup>Pu–Be neutron source were acquired.

During the experiment a possibility to use neutron capture gamma-ray field formed by thermal neutrons geometry of AT140 neutron calibration facility with <sup>238</sup>Pu–Be-fast neutron source with Ti and Ni targets for calibration LaBr<sub>3</sub>(Ce) spectrometers for energy to 10 MeV was confirmed. Closely stationing polyethylene plate in collimator channel provides significant increase in output of reference radiation from target simultaneously decreasing unneeded parts of the spectrum.

*Keywords:* neutron capture gamma-ray, radionuclide neutron source, thermal neutrons geometry, titanium target, nickel target, spectrometric detector

**А. П. Ахрамович<sup>1</sup>, И. В. Войтов<sup>2</sup>, В. П. Колос<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СЛОЕ МИКРОТВЭЛОВ

Показано, что при математическом моделировании гидродинамики топливного слоя с микровтэлами до сих пор не удалось удовлетворительно описать вязкие и инерционные эффекты. Уравнения фильтрации, получаемые путем усреднения уравнения движения вязкой жидкости по элементарному объему и содержащие так называемый вязкий член, справедливы лишь для бесконечной пористой среды. Использование этих уравнений и условий прилипания на непроницаемых торцах слоя приводит к результатам, зачастую не совпадающим с результатами экспериментов.

В основу построенной модели положены законы движения идеальной жидкости с объемной силой межфазного взаимодействия, которая представлена в виде дивергенции тензора с потенциальной и вихревой составляющими. При этом потенциальная составляющая отражает вклад сил сопротивления в нормальное напряжение (давление) теплоносителя и является «скрытым» параметром – причиной разброса экспериментальных данных.

Изучена с использованием разработанной модели динамика потока теплоносителя при входе и выходе его из топливного слоя и определены условия сопряжения для вектора скорости и давления. Эти условия обеспечивают сшивку на проницаемых границах слоя уравнений фильтрации и динамики вязкой жидкости.

Установлено, что вследствие доминирования сил инерции на входе и выходе из слоя поток преломляется: при входе разворачивается в сторону нормали к границе слоя, а при выходе – в сторону касательной. Учет этого эффекта позволит оптимизировать контуры топливного слоя с точки зрения теплофизики и нейтронной физики.

*Ключевые слова:* математическая модель, топливный слой, микровтэлы, фильтрация, тензор межфазного взаимодействия, условия сопряжения, разрыв функции Бернулли, инерционные и вязкие эффекты

## DYNAMIC MODEL OF RAPID COOLANT FILTRATION THROUGH A BED OF MICRO FUEL PARTICLES

It is shown that mathematical hydrodynamic models of micro fuel beds can't describe viscous and inertial effects truly. The filtration equations obtained by averaging the equation of viscous fluid motion over an elementary volume and containing the so-called viscous term are valid only for the infinite porous medium. Using these equations and no-slip condition on the impermeable ends of bed leads to discrepancy between estimated and observed data.

The constructed rapid coolant filtration model is based on the ideal fluid motion laws with a volume interphase interaction force, which is represented as a divergence of a tensor with potential and vortex components. In this case, the potential component reflects the contribution of the resistance forces to the normal pressure of the coolant and is a "hidden" parameter – the reason for experimental data spread.

Using the model, dynamics of the coolant flow at the inlet and outlet of the fuel bed is investigated and the matching conditions for velocity and pressure vector are determined. These conditions make it possible to relate the filtration equation and viscous fluid motion equation on the bed permeable boundaries.

Due to dominance of inertia forces at entrance and exit of the bed, the stream is refracted: at the inlet towards the normal to the bed boundary, and at the exit towards the tangent. Accounting for this effect the optimize fuel bed contours in terms of thermal physics and neutron physics will be obtained.

*Keywords:* mathematical model, fuel bed, micro fuel particles, filtration, interface interaction tensor, matching conditions, Bernoulli's function breaking, inertial and viscous effects

**В. И. Ольшанский<sup>1</sup>, В. П. Довыденкова<sup>1</sup>, А. Ф. Худолеев<sup>2</sup>, Н. М. Дмитракович<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

<sup>3</sup>*Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ТЕРМОГЕРМЕТИЗАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ

В настоящее время при изготовлении специальной защитной одежды пожарных широко используются огнестойкие металлизированные материалы. Однако применение традиционных способов скрепления деталей из огнестойких металлизированных материалов с пленочным покрытием способствует формированию соединений с низкими эксплуатационными и теплофизическими показателями. Соответственно возникает необходимость создания технологических решений, обеспечивающих выпуск качественных, надежных в эксплуатации образцов специальной защитной одежды пожарных, изготавливаемой из огнестойких металлизированных материалов. В данной статье изложены основные методологические подходы, использованные при оптимизации состава термогерметирующей композиции и параметров технологического процесса, выбранных для реализации оригинальной технологии термогерметизации и упрочнения узлов и соединений специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий.

Для решения поставленной задачи использованы методы математического планирования многофакторного эксперимента и симплекс-планирования. В качестве варьируемых факторов выбраны расход полимерной композиции, масса антипирена, время и температура контактной сушки. Критериями оптимизации явились показатели «Разрывная нагрузка при растяжении перпендикулярно шву» и «Кислородный индекс». Определено рациональное сочетание компонентов термогерметирующей композиции и параметров технологического процесса для получения прочных, огнестойких соединений деталей специальной защитной одежды пожарных. Разработанная рецептура термогерметирующей композиции и параметры технологического процесса апробированы в производстве при изготовлении фрагментов теплозащитных костюмов пожарных.

*Ключевые слова:* огнестойкий металлизированный материал, защитная одежда, технология, многофакторный эксперимент, оптимизация

**V. I. Olshansky<sup>1</sup>, V. P. Dovydenkova<sup>1</sup>, A. F. Hudoleev<sup>3</sup>, N. M. Dmitrakovich<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus,*

<sup>2</sup>*Emergency Situations Ministry of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus,*

<sup>3</sup>*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus*

## OPTIMIZATION OF A MIXTURE OF POLYMERIC COMPOSITION AND PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR THERMO-SEALING OF SPECIAL PROTECTIVE CLOTHES FOR FIREMAN

Now broad application at production of special protective clothes of firefighters is found by the metallized materials steady against influence of fire and high temperatures and thermal streams. Application of traditional ways of a fastening of details from the metallized materials with a film covering, steady against influence of fire, high temperature and thermal streams, promotes formation of connections with low operational and heat-physical characteristics. There is a need for creation of technology solutions providing release of qualitative, reliable samples of special protective clothes for firefighters, made from heat- and fire-resistant metallized materials. Main methodological approaches used at optimization of structure