



**Инженерная школа  
ядерных технологий**  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# **X МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В НАУКЕ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ И  
МЕДИЦИНЕ. РОССИЙСКИЙ И МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ  
ПОДГОТОВКИ КАДРОВ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**



**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМУ ОБРАЗОВАНИЮ В  
ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**09 – 11 сентября 2020 г.**



**Инженерная школа  
ядерных технологий**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

«Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине.  
Российский и международный опыт подготовки кадров»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

# **X МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО- ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**Физико-технические проблемы в науке,  
промышленности и медицине.**

**Российский и международный опыт  
подготовки кадров**

Сборник научных трудов  
Международной научно-практической конференции

**09 – 11 сентября 2020 г.**

Томск - 2020

УДК 53.05+62.001.5(063)

ББК 22.3+30л0

Ф50

**Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине.**  
Ф50 **Российский и международный опыт подготовки кадров: сборник научных трудов X  
Международной научно-практической конференции** / Томский политехнический  
университет. – Томск : Изд-во «Ветер», 2020. – 63 с.

ISBN 978-5-98428-106-5

В сборнике представлены материалы по следующим направлениям исследований:  
ядерные установки различного типа и их безопасность; разработка и применение  
радиационные технологий в промышленности и медицине; математическое моделирование  
и автоматизация производств атомной отрасли; новые материалы и технологии,  
применяемые в атомной промышленности.

**УДК 53.05+ 62.001.5(063)**

**ББК 22.3+30л0**

**Редакционная коллегия**

И.В. Шаманин, доктор физико-математических наук;

В.П. Кривобоков, доктор физико-математических наук;

А.Г. Горюнов, доктор технических наук;

В.А. Карелин, доктор технических наук.

Редакционная коллегия предупреждает, что за содержание представленной  
информации ответственность несут авторы докладов

**Мероприятие проведено при поддержке Российского фонда фундаментальных  
исследований, грант РФФИ № 20-08-20018 «Научные мероприятия»**

ISBN 978-5-98428-106-5

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>A STUDY OF DIFFERENT HTTR FUEL COLUMNS LOADING SCHEMES</b> M.A. Abed.....	8
<b>PROJECTED NUCLEAR SECURITY ASSESSMENT OF ADVERSARY ULTIMATE LIMITATIONS<sup>9</sup></b> P. A. Amoah, M. N. S. Ansah .....	9
<b>EFFECTIVENESS OF THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PHYSICAL PROTECTION SYSTEM AT A RADIOLOGICAL FACILITY</b> M.N.S. Ansah, P.A. Amoah .....	10
<b>ASSESSMENT OF NORM IN FRUITS AND VEGETABLES FROM HARTBEESPOORT, MAFIKENG AND PRETORIA MARKETS</b> V.K Gouws, R.D Mavunda and M. Mathuthu .....	11
<b>ANALYSIS OF EFFECT OF COOLANT INJECTION PARAMETERS ON MITIGATION OF REACTOR CORE MELTING ACCIDENT USING PCTRAN</b> Chuanbin Li.....	12
<b>NECESSARY NUCLEAR SECURITY MEASURES FOR THE CONSTRUCTION AND OPERATIONS OF A NUCLEAR POWER PLANT IN THE FEDERAL REPUBLIC OF NIGERIA</b> Orumo B. Kenoll, Furo E. Ebiere.....	12
<b>PREDICTION OF THE BIOACTIVITY OF PLA AND CALCIUM PHOSPHATE COMPOSITES</b> N.E. Toropkov, T.S. Petrovskaya.....	13
<b>THE DYNAMICS OF ENERGY RELEASE IN A HYBRID REACTOR OPERATING WITH GDT-FNS IN A PULSE-PERIODIC MODE</b> I.V. Shamanin, S.V. Bedenko, V.M. Shmakov, V.V. Knyshev, I.O. Lutsik, S.D. Polozkov .....	15
<b>ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОЛОГИИ ПОРОД ДЛЯ ОЦЕНОК РАДОНООПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ЗАСТРОЙКИ</b> П.Э. Альмяков, К.О. Ставицкая, Н.К. Рыжакова .....	16
<b>ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СВ-СИНТЕЗА ПРИ ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ W-B</b> М.М. Балачков, М.С. Кузнецов, А.А. Пермикин .....	17
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВ-СИНТЕЗА БОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ</b> М.М. Балачков, М.С. Кузнецов, А.А. Пермикин .....	18
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСОВ ХАУНСФИЛДА ОБЪЕКТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПРАВЛЕНИЯ, С РАЗНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ЭКСТРУЗИИ</b> Е.А. Бушмина, Ю.А. Зубкова, Ю.М. Черепенников .....	19
<b>РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ОПТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ</b> В.В. Буйневич, А.А. Дериглазов.....	20

<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЖИМА САМОРАСПЫЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПАРЯЮЩИМИСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ</b>	
Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков, Д.В. Сиделёв, В.А. Грудинин, Р.В. Попов.....	21
<b>ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ КОЛЛИМАТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ</b>	
А.А. Григорьева, А.А. Булавская, Ю.М. Черепенников.....	23
<b>ПИРИДИЛКАМФОРАСУЛЬФОНАТЫ – НОВЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ ОРГАНИЧЕСКОГО СИНТЕЗА</b>	
К.Д. Ерин, А.Н. Санжиев, Е.А. Краснокутская.....	24
<b>ТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОГО КАЛИБРОВОЧНОГО ОБЪЕКТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ</b>	
Ю. А. Зубкова, Е. А. Бушмина, А. А. Григорьева.....	25
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «PuO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ ПЛУТОНИЙ-ТОРИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b>	
К.С. Иванов, И.Ю. Новоселов, А.Е. Тихонов.....	26
<b>1-ОКСИПИРИДИНДИАЗОНИЙ СУЛЬФОНАТЫ: СИНТЕЗ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ</b>	
А.Ж. Касанова, А.Н. Санжиев, Е.А. Краснокутская.....	27
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО REMIX-ТОПЛИВА</b>	
А.А. Каренгин, К.С. Иванов, А.Г. Каренгин.....	28
<b>ОЦЕНКА ГРАДИЕНТОВ ДАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ТОПЛИВНЫХ МИКРОКАПСУЛ И ГРАФИТОВОЙ МАТРИЦЫ С УЧЕТОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ</b>	
В.В. Кнышев, И.В. Шаманин, С.В. Беденко.....	29
<b>ВЛИЯНИЕ БОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b>	
А.Г. Коротких, И.В. Сорокин.....	30
<b>СИСТЕМА ПОЛИМЕРНЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ ПТФЭ, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ</b>	
И.М. Колесник, Е.Н. Больбасов, В.М. Бузник.....	31
<b>РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОГО ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПУЧКА МЕДИЦИНСКОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ</b>	
В.С. Кондратьева, А.А. Григорьева, И.А. Милойчикова.....	32
<b>ЗАПОЛНЕНИЕ БОЗЕ-КОНДЕНСАТОМ ОДНОМЕРНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЫ В КВАЗИКЛАССИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ</b>	
А.Е. Кулагин, А.Ю. Трифионов, А.В. Шаповалов.....	33
<b>РЕКОНСТРУКЦИЯ ГРАНИЦЫ, ПОЛОЖЕНИЯ И ТОКА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ КТМ ПО ДАННЫМ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ</b>	
А.М. Ли, В.М. Павлов.....	34

<b>ОЦЕНКА РАДОНООПАСНОСТИ УЧАСТКОВ ЗАСТРОЙКИ НА ОСНОВЕ ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА РАДОНА</b> Ф.И. Ложников, К.О. Ставицкая, Н.К. Рыжакова.....	<b>35</b>
<b>РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА ВОДООЧИСТКИ</b> И.С. Надеждин.....	<b>36</b>
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА БОРА</b> А.А. Пермикин, М.М. Балачков, М.С. Кузнецов .....	<b>37</b>
<b>ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПУЧКА С ШИРОКИМ СПЕКТРОМ КИНЕТИЧЕСКИХ ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА E. COLI</b> А.В. Полосков, А.А. Курилова (Быкова), М.А. Серебренников.....	<b>38</b>
<b>МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ КОМПЛЕКС МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ</b> А.С. Попов, Е.В. Обходская, В.И. Сачков, В.И. Чернов .....	<b>39</b>
<b>СРАВНЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ МИШЕНЬ УСКОРЕННЫХ АТОМОВ И ИОНОВ</b> А.И. Прима, А.И. Пушкарев.....	<b>40</b>
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> К.С. Расторгуев, А.А. Каренгин, А.С. Пшеничников .....	<b>41</b>
<b>ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА ВЫХОД РАДОНА С ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТОВ</b> Н.К. Рыжакова, К.О. Ставицкая, Ф.И. Ложников .....	<b>42</b>
<b>НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ ТРИАЗЕНОВ ПИРИДИНОВОГО СКЕЛЕТА</b> А.Н. Санжиев, Ю.Н. Никитина, Е.А. Краснокутская .....	<b>43</b>
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ АСПЕКТОВ ПОЛУЧЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ</b> Д.В. Сиделёв .....	<b>44</b>
<b>ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ</b> Д.В. Сиделёв .....	<b>45</b>
<b>ГОРЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ БОРИДЫ МЕТАЛЛОВ</b> И. В. Сорокин, А. Г. Коротких, В.А. Архипов .....	<b>46</b>
<b>ВЫХОД РАДОНА ИЗ ГРУНТОВ</b> К.О.Ставицкая, Н.К.Рыжакова.....	<b>47</b>
<b>ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ЦИРКОНИЕВОВОГО СПЛАВА Э110 С ИМПЛАНТИРОВАННЫМ СЛОЕМ ТИТАНА</b> М.С. Сыртанов, Е.Б. Кашкаров, А.Э. Шевелев .....	<b>48</b>

<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ УРАН-ТОРИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> А.Е. Тихонов, В.И. Расторгуев, А.А. Каренгин.....	<b>49</b>
<b>ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ГАЗООБРАЗНЫМ ФТОРОМ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ</b> И.О. Усольцева, Н.А. Белов, Д.С. Пашкевич.....	<b>50</b>
<b>ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ПОЛИКАПРОЛАКТОНА</b> Е.О. Филиппова, Н.М. Иванова .....	<b>51</b>
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» ДЛЯ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> Н.С. Хоцеловский, А.А. Каренгин, А.Д. Побережников.....	<b>52</b>
<b>ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО СВЧ РАЗРЯДА</b> А.А. Цхе, С.А. Сосновский, А.А. Луканин.....	<b>53</b>
<b>ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С РАЗНОЙ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНОСТЬЮ</b> О.С. Чернова, А.А. Булавская, А.А. Григорьева .....	<b>54</b>
<b>СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ «ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ»</b> М.В. Шевелев, А.С. Коньков, Б.А. Алексеев.....	<b>54</b>
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА</b> Р.Б. Шишкин, В.М. Павлов .....	<b>55</b>
<b>РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КАБЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ</b> Li Hongda, С.А. Сосновский, С.В. Тюрин.....	<b>56</b>
<b>ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО РЕАКТОРА</b> Yu Xiaolin, С.А. Сосновский, В.И. Сачков .....	<b>57</b>
<b>АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ ГЛИН КАК БАРЬЕРОВ ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАО</b> В.Ф. Мышкин, Ван Цайлунь, И.В. Туксов.....	<b>58</b>
<b>ЛАЗЕРНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЭЛОВ</b> В.А. Хан, В.Ф. Мышкин, Д.М. Хорохорин, М.С. Кузнецов.....	<b>59</b>
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ИЗДЕЛИЙ, НАПЕЧАТАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ</b> В.Ф. Мышкин, К.Т. Шикерун.....	<b>60</b>
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОГО СТЕКЛА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОРИСТОГО СТЕКЛОКОМПОЗИТА НА ЕГО ОСНОВЕ</b> В.И. Семенова, О.В. Казьмина.....	<b>/61</b>

## A STUDY OF DIFFERENT HTTR FUEL COLUMNS LOADING SCHEMES

M.A. Abed

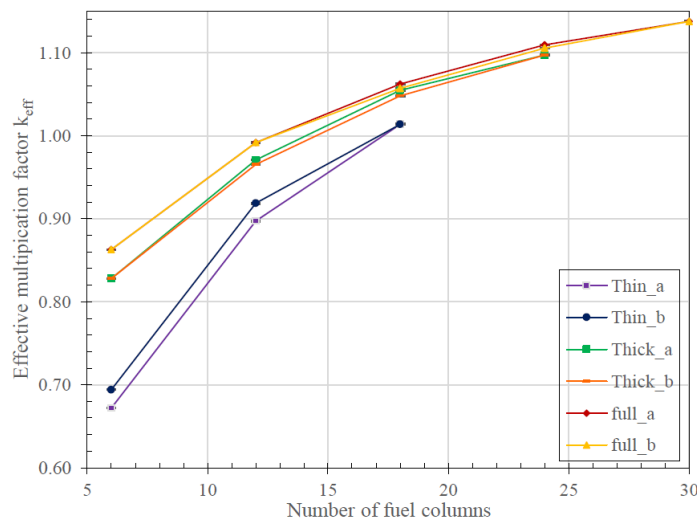
National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenin Ave. 30, 634050

E-mail: [atef0101431@sci.asu.edu.eg](mailto:atef0101431@sci.asu.edu.eg)

High temperature engineering test reactor (HTTR), one of generation IV reactors, is a promising technology for electricity production and heat supply for high temperature industries such as hydrogen production and coal gasification since it has a maximum outlet temperature of 950°C [1].

During the initial criticality problem of HTTR benchmark problems, the number of fuel columns for the first criticality has been evaluated with fuel columns loaded clockwise from the outer region into the inner region [2], while in actual loading the core is symmetrically loaded to provide a symmetrical flux and power distribution, three scenarios of possible of different annular core loading has been studied. The annular cores are thin annular core, thick annular core, and fully loaded core, which represents 18, 24, and 30 fuel columns cores, respectively. We used the HTTR benchmark model from IAEA-TECDOC-1382 [2] with homogenized fuel compact simplification and MCU-PTR code with contentious fuel energy spectrum. The change of effective multiplication factor at different fuel loading schemes presented in fig. 1.



*Fig. 1. Change of effective multiplication factor at the symmetric fuel loading approach to the first criticality for different fuel loading schemes*

Accordingly, it's preferable to start the loading from the outer region into the inner region as such a loading scheme has the lowest rate of increment of reactivity to prevent higher values of the multiplication factor during the start-up, which could result into an uncontrollable state of the reactor core.

### REFERENCES

1. Shiozawa S, Fujikawa S, Lyoku T, Kunitomi K, Tachibana Y. Overview of HTTR design features. Nucl Eng Des. 2004;233(1–3):11–21.
2. Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: At Energy. 2003;(November).



## **PROJECTED NUCLEAR SECURITY ASSESSMENT OF ADVERSARY ULTIMATE LIMITATIONS**

P. A. Amoah, M. N. S. Ansah

National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenin Ave. 30, 634050

Email: [Amoah@tpu.ru](mailto:Amoah@tpu.ru)

A nuclear security conceptual projection assessment of the limitations improvised for adversary pathways at nuclear facilities has been researched on and discussed. A hypothetical facility, DaPaRay, has been chosen for this research. Various elements of risk assessment and a description of various adversary groups, whose main aim is often theft or sabotage or both, has been used to guide the definition of the scope of this research. In quantifying the risk, elements such as vulnerability, threat and consequence or impact of events were assessed for consideration. The adversary groups which consists of scenarios of external and internal (i.e. insider threat) capabilities, have been considered. A Security Risk Assessment Tool (SRAT) has been employed for this research. SRAT classifies the criticality of this research as important and the crisis response capacity as excellent, placing the threshold at a level 12. An Assessment of a Projected Adversary Ultimate Limitation (PAUL) of the inherent risk and residual risk showed that about 50% of adversary issues considered had an unrealistic and doubtful probability, an unlikely or very unlikely descriptor mode of occurrence, with minor or no serious injuries to staff, and with a minimal loss or damage to facility assets, and little or minimum delay, in the next 2 to 5 years of the facility's routine operation. About 30% of adversary issues had a high or expected probability of occurring with a very likely or likely descriptor mode of occurrence with an impact of severe injuries or even death of staff, major or complete destruction of facility assets leading to a severe disruption or closure of the facility, which could occur any day or within any week. About 20% of the adversary issues considered had a reasonable probability of occurring with a moderately likely descriptor mode of occurrence, which had an impact but of non-life-threatening injury to staff members, with a loss or damage to some assets, causing some delays and disruptions once a year or once a month. The percentages obtained are to be used in forming a markov chain which comprises of a combination of probabilities and matrix operations. A long run distribution vector is expected to be generated from the transition matrix that will be formed from the transition diagram of the probability tree. The resultant distribution vector will aid nuclear security researchers in projections related to adversary activities and their limitations. The projected adversarial activities are therefore expected to be met with the respective facility specific designed response.

### **REFERENCES**

1. Larsen, Robert K., "Hypothetical facility data book: The Shapash Nuclear Research Institute", Retrieved from the Los Alamos National Laboratory, 16 August, 2013.
2. Garcia, Mary L., The Design and Evaluation of Physical Protection Systems, Second Edition, Sandia National Laboratories, May 2005, pages 14,17, 31,39 and 252.
3. Abbott Chris, The Security Risk Assessment Tool (SRAT), Open Briefing, Version 1.0.0, 11 October, 2017.

## **EFFECTIVENESS OF THE DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PHYSICAL PROTECTION SYSTEM AT A RADIOLOGICAL FACILITY**

M.N.S. Ansah, P.A. Amoah

National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: michaelansah67@gmail.com

Useful applications of nuclear and radioactive materials in energy production, medicine, research and industry, to improve human lives around the globe is essential and continues to be in demand. There is a potential risk of it being use for the wrong purposes when it falls into the wrong hands such as terrorists' groups and this is a growing concern the world seeks to address by enhancing nuclear security. A deliberate act of theft or destruction against a nuclear and radiological facility could threaten public health through exposure to radiation. Physical Security Systems (PPS) are effectively employed to avoid or lessen loss of assets with great importance in various fields of interest such as the nuclear and radiological centers. The effectiveness of physical security systems is evaluated as the probability of a security system to detect and defeats an adversary along a given path. The PPS design permit the combination of protection elements working together to guarantee protection rather than regarding each security element distinctly. Most of these hospitals have in their facility a temporary storage unit where disused radioactive sources are kept. Hospitals that provide radiotherapy services, makes use of the radioisotopes  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{192}\text{Ir}$ , or LINAC and X-ray machines. Enactment of the PPS design addresses the systematic and integrated securing of resources in anticipation of adversary attacks, rather than reacting to adversary actions after they occur. An Integrated Physical Protection System (IPPS) is necessary to consolidate of all sub systems, sensors and elements related to protection system for an effective security environment of a radiological facility. Radiological and nuclear facility holding Category I and II nuclear materials is advised by IAEA to have a central alarm station to prepare against any sabotage or theft issues since any of these unauthorized actions could lead to a potential radiological health hazard to the environment. The security sub-systems that are often integrated into IPPS are, access control, intrusion detection, CCTV surveillance, emergency door monitoring system etc. The access control sub-system employs intelligent card readers and interfaces with the PC based central controller which is done through some form of communication network. This paper considers the basic and effective elements required for physical protection system for a radiological center. It will serve as base guidelines for the decision makers in the establishment of an effective physical protection for a radiological center. Integrated Physical Protection System features are put together and properly analyzed to help in making vital decision when securing a radiological facility. The designing and implementation IPPS help identify areas of vulnerability that can be remedied and practices that can be improved during the risk and threat assessment exercise.

### **REFERENCES**

1. Kumar R. Integrated physical protection system, Bhabha Atomic Research Center [Electronic resource]. -Access mode:<https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/SS-2001/PDF%20files/Session%204/Poster%204-02-P.pdf>. - 03/07/2020
2. Nuclear security recommendations on radioactive material and associated facilities. International Atomic Energy Agency IAEA Nuclear Security Series No. 14, IAEA, 2011. – 44p.

## ASSESSMENT OF NORM IN FRUITS AND VEGETABLES FROM HARTBEESPOORT, MAFIKENG AND PRETORIA MARKETS

V.K Gouws<sup>1,2</sup>, R.D Mavunda<sup>2</sup> and M. Mathuthu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre for Applied Radiation Science and Technology, North-West University,  
South Africa, Mmabatho, Cnr Albert Luthuli & University Drive,  
North-West University (Mahikeng Campus), 2046

<sup>2</sup>NECSA-South African Nuclear Energy Corporation SOC PTY,  
South Africa, Pretoria, R104 Pelindaba, Madibeng Municipality,  
North West Province, Elias Motsoaledi Street Extension (Church Street West), 0240

This study aims to measure the activity concentration in fruits and vegetables collected from local markets in Hartbeespoort, Mafikeng and Pretoria. The gross alpha and beta activity concentration in fruits and vegetables collected from Hartbeespoort, Mahikeng, and Pretoria have been evaluated using Oxford proportional gas-flow series. A total of 4 fruits and 7 vegetables samples from these areas were analysed. Hartbeespoort, Mafikeng and Pretoria activity concentration of gross alpha and beta in fruits were  $0.527 \pm 0.182 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $10.015 \pm 0.576 \text{ Bq.g}^{-1}$ ;  $0.181 \pm 0.053 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $9.520 \pm 1.449 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $0.184 \pm 0.006 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $9.351 \pm 2.281 \text{ Bq.g}^{-1}$  respectively. Hartbeespoort, Mafikeng and Pretoria sample results for gross alpha and beta activity in vegetables were  $0.218 \pm 0.150 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $10.099 \pm 2.435 \text{ Bq.g}^{-1}$ ;  $0.222 \pm 0.137 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $12.029 \pm 1.718 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $0.175 \pm 0.191 \text{ Bq.g}^{-1}$  and  $11.099 \pm 2.238 \text{ Bq.g}^{-1}$  respectively. The highest gross alpha and beta activity in vegetables was found in Mahikeng and the highest gross alpha and beta activity in fruits was obtained in Hartbeespoort. The results obtained are higher than the WHO [3] standard limit of  $1.0 \text{ Bq.g}^{-1}$  for gross beta and  $0.1 \text{ Bq.g}^{-1}$  for gross alpha, however these results are comparable to the reported results in [1] and [2]. The neutron activation analysis (NNA) was used to identify naturally occurring radioactive material (NORM) by means of gamma spectrometry analysis using (HPGe) detector. The results showed that the highest average activity concentration in fruits were  $1.015 \pm 0.627$ ,  $1.024 \pm 0.634$ ,  $0.049 \pm 0.025$ ,  $2.700 \pm 0.674 \text{ Bq.kg}^{-1}$  and the highest average activity concentration of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  in vegetables were  $1.662 \pm 1.406$ ,  $1.674 \pm 1.419$ ,  $0.076 \pm 0.064$ ,  $4.228 \pm 1.302 \text{ Bq.kg}^{-1}$  and respectively. The levels of activity concentrations of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  are higher in Hartbeespoort followed by Mahikeng and Pretoria. The activity concentration of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  were lower than the world average values reported in UNSCEAR report of 2000 [4].

### REFERENCES

1. Van Thang Nguyen, Ngoc Ba Vu, Nguyen Phong Thu Huynh (2018). Gross alpha and beta radioactivity in food crops and surface soil from Ho Chi Minh City, Vietnam. *J Radioanal Nucl Chem* 315:65–73.
2. Alao A.Adewumi (2016). Evaluation of the Gross Alpha and Beta Radioactivity Concentration in Some Agricultural Products (Vegetables and Fruits) Obtained in Two Oil Fields in the Niger Delta Region of Nigeria. *Journal of Environment Pollution and Human Health*, 4 (4): 78-82.
3. WHO (2008). Guidelines for drinking water quality and other screening levels of various categories of foods. 6th ed. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
4. UNSCEAR (2000). Effects of ionizing radiation: 2000 report to the general assembly, with scientific annexes (Vol. D). Effects. United Nations, New York.

## **ANALYSIS OF EFFECT OF COOLANT INJECTION PARAMETERS ON MITIGATION OF REACTOR CORE MELTING ACCIDENT USING PCTRAN**

Chuanbin Li

National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: qq1075356371@gmail.com

So far, three nuclear accidents of the highest hazard level have occurred in the world, and the causes are all caused by the meltdown of the core caused by the loss of water, resulting in a radiation disaster. Therefore, it is important and necessary to study how to inject coolant after the accident to avoid as much as possible serious results. First, we use software PCTran to simulate the process of LOCA running with blockout and other setting, then simulate the process about different injection rates at same water levels and the same injection rate at different water levels and the cooling effect of the coolant after the fuel has been fully melted. Finally we can get the relationship between coolant injection parameters and effects of cooling. After a series of repeated experiments, we found that the coolant injection rate and injection time have a direct impact on the accident mitigation and whether the container will be melted through.

### **REFERENCE**

1. Hui-Wen Huang, Ben-Ching Liao. "A study of the effectiveness of defense echelon design of ABWR/LMNPP plant for mitigating LOCA accident ".Annals of Nuclear EnergyVolume 62December 2013Pages 333-341
2. R. Gencheva, A. Stefanova, P. Groudev. "Plant application of ICARE/ASTECv2.0r3 computer code for investigation of in-vessel melt retention in VVER-1000 reactor design ".Annals of Nuclear EnergyVolume 81July 2015Pages 207-212
3. Wen-Hsiung Wu, Jong-Rong Wang, Chunkuan Shih. "The Modification of Feedwater Control System with RETRAN Assessment for Lungmen ABWR". Procedia EngineeringVolume 152011Pages 5138-5142
4. Anis Bousbia Salah, Juswald Vedovi, Francesco D'Auria, Giorgio Galassi, Kostadin Ivanov "Analysis of the VVER1000 coolant trip benchmark using the coupled RELAP5/PARCS code".Progress in Nuclear EnergyVolume 48, Issue 8November 2006Pages 806-819
5. the fukushima daiichi accident report by the director general(PDF).www-pub.iaea.org > MTCD > PDF > Pub1710-ReportByTheDG-Web

## **NECESSARY NUCLEAR SECURITY MEASURES FOR THE CONSTRUCTION AND OPERATIONS OF A NUCLEAR POWER PLANT IN THE FEDERAL REPUBLIC OF NIGERIA**

Orumo B. Kenoll<sup>1,2</sup>, Furo E. Ebiere<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute,

Russia, Moscow, Kashirskoe hwy, 31, 115409,

<sup>2</sup>Nigeria Atomic Energy Commission,

Nigeria, Abuja, Asokoro, Kwame Nkrumah Cres, 9, 900231

E-mail: orumokenoll@yahoo.com

The Nigerian economy needs adequate power for its growth since commercial, Industrial and Domestic activities all rely on electricity for its daily needs and smooth operations. Demand for nuclear energy is on the rise in Nigeria as a credible option in ensuring the availability of great amounts of energy. This optimism about nuclear

energy in Nigeria necessitates the need for adequate measures on the security of the country's nuclear material and facilities [1]. This study addresses the necessary security measures for the Nigerian Nuclear Power Plant Project. The article analyses the fundamental security measures in developing a Nigerian Nuclear Power plant Project, seen that insecurity posed by local terrorist groups, kidnappers, and armed bandits may affect the smooth operation of the nuclear power plant [2].

The imperatives of ensuring greater nuclear security in Nigeria lies in the fact that the country has embarked on an ambitious civil nuclear program with nuclear infrastructure that needs to be secured adequately, using radiological materials in many sectors and chances of their misuse cannot be ruled out. Above all, Nigeria is situated in a volatile region, and hence, vulnerable to nuclear terrorism [3].

Therefore, this study takes a comprehensive look at the approach to nuclear security in Nigeria, and critically examines the security measures that the country has to put in place [4, 5]. Particular focus is placed on the evolution and strengths, as well as weaknesses, of the country's nuclear security institutions, instruments, practices, and culture. Since the strengthening of Nigeria's nuclear security governance is an ongoing endeavor, the article puts forward many policy recommendations.

#### REFERENCE

1. Sitakanta Mishra, Happymon Jacob. Nuclear Security Governance in India: Institutions, Instruments, and Culture SANDIA REPORT SAND2015-0233. Unlimited Release Printed January 2015. P: 13-15
2. Becker Oda. Working Paper on "possible terrorist threat and necessary nuclear security measures for NPPs and interim storages." Independent experts for the risk of Nuclear Facilities, Hannover/Germany June 2017. P: 28-32
3. Anthony A., Mark H. Nuclear Power Plant Security, and Vulnerabilities. Congressional Research services 7-5700. 2014. [www.crs.gov](http://www.crs.gov) RL34331
4. Garcia M.L. The Design and Evaluation of Physical Protection Systems. 2nd Edition: Butterworth-Heinemann. 2008 P: 5-10.
5. <https://www.nei.org/resources/fact-sheets/nuclear-plant-security-and-access-control>

#### PREDICTION OF THE BIOACTIVITY OF PLA AND CALCIUM PHOSPHATE COMPOSITES

N.E. Toropkov, T.S. Petrovskaya

National research Tomsk Polytechnic University,  
Russia, Tomsk, 30 Lenin Avenue, 634050

E-mail: [net2@tpu.ru](mailto:net2@tpu.ru)

In the last decade, poly (L-lactide) and calcium phosphates (CPh) biocomposites have attracted much attention due to their ability to exhibit osteoconductive and osteoinductive properties, biodegradability and sufficient mechanical strength [1]. However, the low miscibility of apatite in the polymer phase, does not allow to obtain composites with a high content of the mineral phase. In our previous studies, we have reported ways of introducing CPh into the polymeric matrix up to 30% wt to produce 3D-printed products. Here we describe a composite with a mineral phase content (up to 50%) in a polymer matrix. Our approach includes the introduction of sorbitol and glycerol, which contribute to the uniform distribution of CPh in PLA, which ensures the stability of 3D-printing and mechanical strength of the composite [2].

The purpose of this study was to obtain a composite based on PLA with the introduction of CPh in the amount of up to 50% with the preservation and improvement of mechanical properties, as well as comparative testing of bioactivity in vitro of materials with different content of CPh.

The samples were printed by the method of layer-by-layer melt deposition on a 3D-printer Ultimaker2 with a modified print head. Mechanical tests were performed by using various setups: compression and flexural on Instron 5985 and Charpy impact tests on Instron CEAST 9340. The properties of bioactivity and bio-mineralization were evaluated by immersing samples of composites in a simulated body fluid (SBF). Solutions was prepared in accordance with the instructions of the International Organization for Standardization ISO / FDIS 23317.

Table 1 shows the strength characteristics of the samples obtained with the set printing parameters. The compressive strength of composite samples increases from  $55 \pm 2$  to  $64 \pm 2$  MPa (by 16%) with an increase in the CPh content from 10 to 50. Impact strength of Charpy increases by 84% in this series of compositions and varies from  $3.9 \pm 0.5$  to  $5.2 \pm 0.5$  kJ/m<sup>2</sup>.

*Tab.1. Mechanical properties of PLA and composites PLA/CPh*

The ratio, wt.%			Compressive strength, MPa	Flexural strength, MPa	Impact strength of Charpy, kJ/m <sup>2</sup>
CPh	PLA	Glycerol			
0	100	0	52	42	3.9
10	88	2	55	43	4.09
30	66	4	62	46	5.11
50	44	6	64	47	5.21

Sample testing in SBF revealed that samples containing CPh showed a marked increase in weight during the first seven days of incubation in the SBF. The sample containing 30% CPh had a weight gain of 22%, the sample containing 50% CPh had a weight gain of 45%. Pure PLA samples showed no increase in weight during this period. At the end of 28 days the increase in weight was: 23% 67%, 83% for PLA/ CPh (10%), PLA/ CPh (30%), PLA/ CPh (50%), and 12% for pure PLA. X-Ray test indicates presence of mostly hydroxyapatite on the samples surface and some amount of other calcium phosphates and amorphous phase. Thus, samples containing more CPh as a mineral phase form a richer apatite layer.

In order to ensure stable printing and acceptable values of mechanical properties of composites depending on chemical homogeneity of filament, sorbitol and glycerin were introduced into its composition at the stage of mixing. Mechanical characteristics of the composites of the developed compositions correspond to and exceed the natural bone parameters and considerably exceed the characteristics of calcium phosphate ceramics. 3d-printed nets made of PLA/CPh showed higher biological activity at contact with SBF than pure PLA.

Thus, the increase in the share of CPh in the composition with PLA up to 50% leads to improvement of mechanical properties and bioactivity of the composite material in test in vitro.

The reported study was funded by RFBR, project number 19-33-90188.

## REFERENCES

1. D.T.M. Thanh, P.T.T. Trang, etc. Effects of Porogen on Structure and Properties of Poly Lactic Acid/Hydroxyapatite Nanocomposites (PLA/HAp) // Journal of Nanoscience and Nanotechnology – 2016 – Vol. 16, – pp. 9450-9459.



2. S.N. Nazhat, M. Kellomaki, P. Tormala, K.E. Tanner, W. Bonfield, Dynamic mechanical characterization of biodegradable composites of hydroxyapatite and polylactides // Journal of Biomedical Materials Research – 2001 – Vol. 58 – pp. 335-343.

## **THE DYNAMICS OF ENERGY RELEASE IN A HYBRID REACTOR OPERATING WITH GDT-FNS IN A PULSE-PERIODIC MODE**

I.V. Shamanin<sup>1</sup>, S.V. Bedenko<sup>1</sup>, V.M. Shmakov<sup>2</sup>, V.V. Knyshev<sup>1</sup>, I.O. Lutsik<sup>1</sup>, S.D. Polozkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,  
Russia, Tomsk, Lenin st. 30, 634050

<sup>2</sup>FSUE «RFNC - VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin»,  
Russia, Snezhinsk, Vasilyeva Avenue, 13, 456770

E-mail: [shiva@tpu.ru](mailto:shiva@tpu.ru)

Specific characteristics of a spatial hybrid thorium reactor with an extended neutron source based on the magnetic trap were studied in the work. The researched “fission–fusion” reactor facility is essentially a hybrid reactor with the reactor core which consists of the fuel blocks assembly of the unified construction of high temperature gas-cooled thorium reactor HTGR and a long magnetic trap (GDT-FNS) which permeates the near-axial reactor core region [1]. In the researched configuration of the hybrid unit the high-temperature plasma pinch is formed in the pulse-periodic mode. At certain pulse ratio (duty cycle) it should be expected that fission “wave” diverging from the axial region of the system and spreading over the fuel assembly volume is formed in correlation with the pulsed source of fast D-D neutrons by time. Thus, at such conditions it is essential to research the fission “wave” spreading process and, consequently, the formation of energy release distribution in the assembly volume.

The work studies the stationary and spatio-temporal characteristics of neutron fluxes and the energy dynamics of the studied facility. The research result shows: (1) At the moment of the facility start-up for “cold” blanket GDT-FNS should provide steady intensity of D-D neutrons generation in the range from  $10^{16}$  to  $2 \times 10^{18}$  neutrons per second from the total plasma column. (2) When the pulse duration is 1 ms and pulse ratio is 2, GDT-FNS, which operates in the required range of D-D neutrons generation, will provide warming of the blanket with the speed of  $10$  ( $K \times h^{-1}$ ), that meets the requirements of thermal technical engineering reliability at cold start-up. (3) To maintain  $k_{eff}(t)$  at constant level GDT-FNS should constantly power the reactor core with additional neutrons, while the intensity of D-D neutrons generation should grow continuously during the whole fuel campaign. The stationary neutron-physical characteristics and the spatio-temporal propagation of the fission wave were modeled using the PRIZMA software package developed at the Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIITF named after Academician E.I. Zababakhin. It can be stated that the obtained results proved the possibility of using the program software PRIZMA, developed in VNIITF to provide the whole list of full-scale computations of hybrid facility neutronic characteristics in various operation modes of the thermonuclear neutrons plasma source.

RFBR (project № 19-29-02005 mk) supported this work.

### **REFERENCES**

1. Arzhannikov A., Bedenko S., Shmakov V., et al. // Gas-cooled thorium reactor at various fuel loadings and its modification by a plasma source of extra neutrons // Nuclear Science and Techniques – 2019. - V. 30. – № 181.

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОЛОГИИ ПОРОД ДЛЯ ОЦЕНОК РАДОНООПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ ЗАСТРОЙКИ

П.Э. Альмяков, К.О. Ставицкая, Н.К. Рыжакова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [shilovaxeniya@gmail.com](mailto:shilovaxeniya@gmail.com)

Наиболее значимым источником радиоактивного излучения является инертный газ радон Rn-222 и его дочерние продукты распада, создающие более половины дозы от всех природных источников. В связи с этим в настоящее время при производстве инженерных изысканий проводятся радиационно-экологические исследования, составной частью которых является оценка радоноопасности участков застройки. В Российской Федерации при приведении оценок измеряют плотность потока радона (ППР) на земной поверхности. К настоящему времени среди исследователей, занимающихся измерениями радона, сложилось мнение, что на количество выделяющегося с поверхности грунтов радона зависит главным образом от геологии территории [1]. Однако, исследования, посвященные выходу радона с поверхности грунтов разного типа, практически отсутствуют. В работе представлены результаты измерения ППР на поверхности лессовидных суглинков, белой глины, глинистых сланцев, песчано-гравийных отложений, скального известняка, глинистого известняка, андезито-базальтового порфирита и кварцитов. Измерения проведены с помощью измерительного комплекса Альфарад Плюс. В работе также проведены измерения удельной активности радия и влажности грунта.

Для грунтов, состоящих из мелких песчаных и глинистых частиц, обнаружена достаточно сильная зависимость ППР от влажности. В исследовании показано, что при одинаковой влажности грунтов количество выделяющегося с его поверхности радона отличается более чем на порядок. Самые большие значения плотности потока радона  $\sim 800$  мБк·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> зарегистрированы для андезито-базальтового порфирита и кварцита, наименьшее значение  $\sim 40$  мБк·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> – для лессовидных суглинков и глинистых сланцев. При измерениях грунтов с низкой влажностью (2...6 %) пропорциональной зависимости между удельной активностью радия и количеством радона, выделяющегося на поверхность грунта, не наблюдается. На основе полученных результатов можно предположить, что тип грунта и его физические свойства, в том числе его дисперсный состав и природную влажность на глубинах залегания фундаментов зданий можно положить в основу классификации участков застройки по степени радоновых рисков. Соответствующая информация может быть предоставлена организациями, осуществляющими проектно-изыскательные работы на участках застройки. Предложенный в работе подход к оценке радоновых рисков позволит избежать проведения трудоемких измерений радона и, таким образом, снизить финансовые, материальные и трудовые затраты на строительство.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90044.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Watson Robin J., The use of mapped geology as a predictor of radon potential in Norway / Watson Robin J.[et.al.] // Journal of Environmental Radioactivity-2017.Vol.166(2). -P.341-354.



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СВ-СИНТЕЗА ПРИ ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ W-B

М.М. Балачков, М.С. Кузнецов, А.А. Пермикин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kms@tpu.ru](mailto:kms@tpu.ru)

Использование атомной энергетики неразрывно связано с ионизирующим излучением (ИИ), которое присутствует на всех этапах ядерно-топливного цикла. Ионизирующее излучение подразделяется на четыре группы:

- тяжёлые положительно заряженные частицы: осколки деления и  $\alpha$ -частицы;
- лёгкие заряженные частицы: электроны и позитроны;
- фотонное излучение: фотоны различных энергий;
- нейтронное излучение: тепловые, промежуточные и быстрые нейтроны [1].

В качестве наиболее эффективного средства защиты от ИИ используют экраны, уменьшающие интенсивность излучения. Фотонное и нейтронное излучения, напротив, имеют большие длины пробега практически во всех веществах. Выбор материалов для экранов зависит от типа налетающих частиц, так для защиты от фотонов используют материалы, содержащие химические элементы с большим атомным номером, такие как свинец, вольфрам и различные стали. Для защиты от нейтронного излучения применяют водородосодержащие среды: вода, полиэтилен, парафин и др., так же возможно использование элементов, сильнопоглощающих нейтроны, таких как бор и кадмий [2].

Обычно нейтронное излучение сопровождается фотонным, поэтому для защиты от них применяются комбинации различных материалов или композиты. Одним из таких материалов является борид вольфрама (WB). Наличие в соединении вольфрама позволяет использовать данный материал для защиты от фотонного излучения, а бора – от нейтронного. К тому же, данное соединение обладает высокой плотностью, порядка 16 г/см<sup>3</sup>, что положительно сказывается на его защитных свойствах.

Наиболее перспективной материаловедческой технологией для получения WB можно считать методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В рамках данной работы представлены особенности СВ-синтеза композитов на основе системы W-B.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-43-703022/19.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов, В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом: учебное пособие / В.И. Беспалов; Томский политехнический университет. – 5-е изд., доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2014. – 427 с.
- Голубев, Б.И. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений: учебник для вузов / Б.И. Голубев; под. ред. Е.Л. Столяровой. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВ-СИНТЕЗА БОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ

М.М. Балачков, М.С. Кузнецов, А.А. Пермикин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kms@tpu.ru](mailto:kms@tpu.ru)

Композиты на основе бора нашли широкое применение в техники радиационной защиты благодаря способности изотопа бора-10 эффективно поглощать нейтроны. Наиболее перспективной материаловедческой технологией для получения композитов на основе бора можно считать методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1]. В рамках данной работы представлены особенности математического моделирования СВ-синтеза композитов на основе систем W-B и B-C.

Для расчета узлов использовалась следующая схема пересчета:

$$u_{i,j}^{n+1} = \left( \alpha^2 \cdot \left( u_{zz,i,j}^n + \frac{u_{r,i,j}^n}{j \cdot \Delta r} + u_{rr,i,j}^n \right) + f(i,n) \right) \cdot \Delta t + u_{i,j}^n;$$

$$i \in [1; i_{\max} - 1]; j \in [1; j_{\max} - 1],$$

где  $i, j, n$  – номер точки по оси  $z, r, t$  соответственно; – вторая разностная производная по координате  $z$  – центральная разностная производная по оси  $r$ ; вторая разностная производная по координате  $r$ ;  $f(i,n)$  – аналог модифицированной функции тепловых источников в разностном виде;  $\Delta z, \Delta r, \Delta t$  – шаг по оси  $z, r, t$  соответственно;  $i_{\max}, j_{\max}$  – число интервалов разбиения отрезка  $[0; H], [0; R]$  соответственно.

Проведенный тест на сходимость схемы показал, что расчет сходится при шаге 0,001 секунды (Рис. 1).

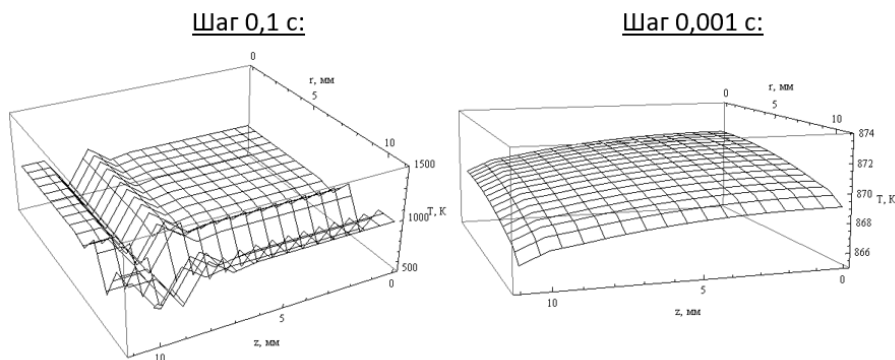


Рис. 1. Сходимость схемы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-43-703022/19.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. / Г.В. Самсонов, Т.И. Серебрякова, В.А. Неронов – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСОВ ХАУНСФИЛДА ОБЪЕКТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПРАВЛЕНИЯ, С РАЗНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ЭКСТРУЗИИ

Е.А. Бушмина, Ю.А. Зубкова, Ю.М. Черепенников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [eab60@tpu.ru](mailto:eab60@tpu.ru)

Особое внимание в современном мире приковано к борьбе с онкологическими заболеваниями, которая может осуществляться с помощью лучевой терапии. Для успешного проведения такого лечения необходимо проводить планирование облучения. Планирование лучевой терапии представляет собой поиск наилучшего варианта проведения курса лучевой терапии. Такой поиск обычно проводят расчетными методами и экспериментальными с помощью фантомов, которые состоят из тканеэквивалентного материала [1].

Однако, планирование лучевой терапии становится более сложным, значит, и верифицировать такие процедуры труднее, поэтому существует необходимость в создании индивидуальных фантомов. В данном исследовании предлагается изготавливать индивидуальные фантомы из тканеэквивалентных материалов с помощью аддитивных технологий, повторяющие анатомию человека. В качестве материалов для имитации различных органов и тканей пациента будет использоваться различный пластик [2].

Чтобы изготавливать индивидуальные фантомы с высокой точностью, необходимо знать, как зависит характер взаимодействия излучения с изделиями от параметров их изготовления. Для того чтобы оценить характер взаимодействия излучения с веществом, будет использоваться шкала Хаунсфилда (индексы Хаунсфилда), которая является шкалой ослабления рентгеновского излучения по отношению к дистиллированной воде. В качестве параметра изготовления изделий в данной работе исследовался коэффициент экструзии. Коэффициент экструзии – это скорость продавливания пластика через формирующее отверстие 3D-принтера и его количество.

Для исследования зависимости характера взаимодействия излучения с изделиями от параметров их изготовления необходимо определить индексы Хаунсфилда объектов, изготовленных методом послойного направления, с разными коэффициентами экструзии.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. - 500 с.
2. Красных А. А., Берчук Д. Ю., Журавлев Д. В., Милойчикова И. А., Ю. М. Черепенников, С. Г. Стучебров Оценка возможности изготовления материалов, пригодных для устройств быстрого прототипирования, с заданными КТ-индексами // Ядерная физика и инжиниринг. — 2017. — Т. 8. — № 1. — С. 91—95.

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА ОПТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В.В. Буйневич, А.А. Дериглазов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Е-mail: [ivanov@tpu.ru](mailto:ivanov@tpu.ru)

Сложные физические установки, такие, как, например, термоядерный реактор КТМ, зачастую требуют простых, но эффективных технических решений. Ярким примером служит предмет исследования данной работы.

Неотъемлемой частью всего жизненного цикла оборудования, от изготовления до монтажа и наладки, является тестирование работоспособности аппаратного и программного обеспечения. Если говорить об устройствах, использующихся в АСУТП токамаков, то, как правило, для их тестирования используются функциональные генераторы сигналов произвольной формы. На этапе разработки и работы с прототипами не представляет никакой трудности использовать профессиональное дорогостоящее лабораторное оборудование. Но во время монтажа и наладки на первое место выходит не столько точность и надежность генераторов, сколько их мобильность, автономность и универсальность. Именно эти свойства выбраны авторами в качестве основополагающих для разрабатываемого генератора оптоэлектрических сигналов.

В целом, генераторы импульсов хорошо подходят не только для проверки оборудования, требующего оценки реакции в виде переходных процессов на воздействие импульсов напряжения с высокой скоростью нарастания, но и для тестирования устройств, использующих дискретные сигналы в качестве управляющих. Не всегда речь идет строго об электрических сигналах. Часто, с целью увеличения помехозащищенности канала связи, в физических установках типа «токамак» используются оптоволоконные линии, а, следовательно, для тестирования оборудования включенного в подобный контур, необходим генератор оптических сигналов. Таким образом, разрабатываемый гибридный генератор станет незаменимым инструментом для тестирования подобных видов оборудования.

Кроме вышеперечисленных преимуществ, разрабатываемый генератор имеет удобный и понятный пользовательский интерфейс на основе бесплатного мобильного приложения и сопрягается со смартфоном по аудио выводу. В дальнейшем планируется внедрение модульной мезонинной системы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-11-2019-013 от «11» октября 2019 г. Идентификатор проекта RFMEFI58519X0007.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Издательство, 2001. – 30с.
2. Основные технологии передачи оптических сигналов. – URL: <https://www.cabeltov.ru/articles-about-cable/osnovnyie-tehnologii-peredachi-opticheskikh-signalov/> (дата обращения 27.07.2020)
3. Приложения на смартфон. – URL: <https://geekbrains.ru/posts/kak-sozdat-prilozhenie> (дата обращения 27.07.2020)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЖИМА САМОРАСПЫЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПАРЯЮЩИМИСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ**

Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков, Д.В. Сиделёв, В.А. Грудинин, Р.В. Попов  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Выполнены исследования механизмов и закономерностей функционирования разряда при работе магнетронной распылительной системы (МРС) в режиме самораспыления без напуска рабочего газа. Установлено, что МРС способна работать без подачи рабочего газа, если дополнительно к распылению создаётся испарение или сублимация мишени, за счёт которых концентрация атомов вблизи поверхности мишени становится достаточной для поддержания разряда. На примере МРС с расплавленными медными и алюминиевыми мишенями, помещёнными в тигли, а также с горячей твердотельной хромовой мишенью, определены минимально необходимые значения мощности, начиная с которых возможно функционирование разряда без напуска рабочего газа. Обнаружено, что пороговое значение мощности в значительной степени зависит от вещества мишени, степени черноты поверхности тигля (для жидкофазных мишеней) и вида источника питания. Выявлено, что термоэлектронная эмиссия не является необходимым фактором в поддержании разряда магнетрона, работающего на парах вещества мишени.

Было установлено, что коэффициенты эрозии металлических мишеней при испарении или сублимации достигают нескольких десятков атомов на ион, что на порядок выше, чем коэффициенты распыления. Вследствие этого осаждение покрытий в условиях самораспыления происходит без снижения скорости осаждения по сравнению со случаями участия рабочего газа. В экспериментах и с помощью расчётов определено, что скорости осаждения медных, алюминиевых и хромовых покрытий примерно на порядок превышают скорости осаждения, имеющие место при обычном распылении охлаждаемых мишеней с аналогичными значениями мощности МРС.

Исследовались плотности потоков осаждаемых частиц и энергии в условиях интенсивного испарения мишени. Получено, что в рассмотренном диапазоне мощности МРС благодаря испарению (или сублимации в случае хрома) плотность потока осаждаемых частиц возрастает примерно на порядок. Основной источник энергии, поступающей на подложку – тепловое излучение со стороны мишени. Величина суммарного потока энергии примерно одинаковая как при распылении мишени в атмосфере аргона, так и в режиме самораспыления. Выявлена возможность управления кинетической составляющей энергетических потоков на подложку путём приложения к ней отрицательного потенциала смещения. Плотность ионного тока смещения на подложке является примерно одинаковой как в случае осаждения с напуском аргона, так и в режиме полного самораспыления.

Структурные и функциональные характеристики покрытий проанализированы в зависимости от вида источника питания и атмосферы в камере (распыление с помощью рабочего газа при давлении 0,18-0,4 Па и в режиме полного самопораспыления при давлении 0,01 Па и ниже). Выяснилось, что в условиях интенсивного испарения (или сублимации) не прослеживается заметно выраженного влияния фактора самораспыления и вида источника питания на кристаллическую структуру и структуру роста исследованных плёнок. Однако получены свидетельства улучшения показателей электрической проводимости для медных

покрытий, твёрдости и коррозионной стойкости хромовых покрытий, осаждённых в условиях полного самораспыления при давлении в камере 0,01 Па и ниже по сравнению с осаждением в атмосфере аргона.

Исследования выполнялись при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-08-00454.

## МАТРИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТОКОВ ПЕРЕХОДА МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕМНОГО ФОТОНА ЭЛЕКТРОНОМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

И.В. Ворончихин, А.Ю. Трифонов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [IVV1211@yandex.ru](mailto:IVV1211@yandex.ru)

При исследовании динамики удаленных галактик возникло противоречие между данными наблюдения и теоретическими предсказаниями. Решение данной проблемы возможно с помощью введения понятия скрытой массы, впоследствии названной темной материей. В настоящее время такой подход стал общепринятым [1,2].

По аналогии со стандартной моделью на основе спонтанного нарушения калибровочной симметрии  $U(1)$  можно ввести векторную массивную частицу медиатор, которая отвечает за взаимодействие между видимым сектором и темной материей путем кинематического смешивания с электромагнитным фотоном [2,3]

В работе на основе обобщенного лагранжиана [1]:

$$\mathcal{L}_{\psi, A} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \left\{ \gamma_{\mu} (i\partial^{\mu} - eA^{\mu}) - M_{\psi} \right\} + \frac{1}{2} \epsilon F_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F'_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} + \frac{1}{2} \lambda_{M_A}^2 A'_{\mu} A'^{\mu} + \bar{\chi} \left\{ \gamma_{\mu} (i\partial^{\mu} - g'A'^{\mu}) - M_{\chi} \right\} \chi,$$

были получены матричные элементы токов перехода для мощности излучения темного фотона электроном в форме функционала от классической траектории излучающего электрона с учетом квантовых поправок, связанных с отдачей излучаемого темного фотона и квантовым характером движения электрона. Результаты получены в электромагнитных полях общего вида, при условии, что их потенциалы гладкие функции вместе со всеми производными.

Волновая функция электрона была рассмотрена в квазиклассическом приближении методом комплексного роста Маслова и удовлетворяет уравнению Дирака с точностью до  $O(\hbar^{5/2})$ ,  $\hbar \rightarrow 0$  [4].

Для полученных функционалов, решив вариационную задачу, можно найти траекторию частицы в электромагнитном поле, для которой мощность спонтанного излучения темного фотона максимальна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-41-700004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.N. Gninenko, Search for MeV dark photons in a light-shining-through-walls experiment at CERN — Phys. Rev. D 89, 075008 –Published 8 April 2014.
2. D. Banerjee et al. (The NA64 Collaboration), Search for vector mediator of dark matter production in invisible decay mode — Phys. Rev. D 97, 072002 – Published 4 April 2018.
3. Holdom B. Two  $U(1)$ 's and epsilon charge shifts //Phys. Lett., B. – 1986. – Т. 166. – №. 2. – С. 196198.

4. Bagrov V.V. Belov V.V. Trifonov A.Yu. Theory of spontaneous radiation by electrons in a trajectory coherent approximation // J.Phys A: Math. Gen. 1993.Vol 26, No 22. P. 6431-6449.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ КОЛЛИМАТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ**

А.А. Григорьева, А.А. Булавская, Ю.М. Черепенников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: agrigorieva@tpu.ru

Лучевая терапия (ЛТ) с применением электронных пучков, используется для лечения опухолей, расположенных на поверхности кожи или вблизи нее [1]. Преимуществом применения электронной ЛТ является проникновение пучка электронов на заданное значение глубины в зависимости от энергии электронов. Данная особенность позволяет добиться равномерного распределения дозы в планируемом объеме облучения, при этом существенно снижая дозовую нагрузку на здоровые ткани и органы [1].

В ЛТ защита нормальных тканей от облучения и точность доставки дозы имеет важное значение [2], отсюда возникает необходимость формирования полей излучения сложной формы. На сегодняшний день при проведении сеансов ЛТ электронными пучками формирование поперечного профиля поля облучения ограничивается применением стандартного набора аппликаторов прямоугольной или цилиндрической формы, блоков из свинца, индивидуальных металлических коллиматоров [3]. Однако, использование данных способов для формирования поперечных профилей электронных пучков терапевтического назначения имеет ряд недостатков, которые снижают эффективность процедур электронной ЛТ.

Решением данной проблемы может стать изготовление индивидуальных коллимирующих устройств при помощи 3D-печати. Посредством применения технологий трехмерной печати возможно изготавливать персонализированные объекты для медицинских целей за короткий срок. Использование данного подхода повысит точность доставки дозы при проведении сеансов электронной ЛТ и, как следствие, увеличит эффективность лечения.

В рамках данного исследования были изготовлены два коллиматора индивидуальной конфигурации из металла и пластика для реального клинического случая. Металлический коллиматор был изготовлен при помощи стандартной технологии изготовления коллиматоров, а пластиковый – с использованием методов трехмерной печати. Для сравнения методов были получены поперечные профили электронных пучков терапевтического линейного ускорителя исследуемыми образцами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Garibaldi C. et al. Recent advances in radiation oncology // *Ecancermedicalscience*. – 2017. – Т. 11. – С. 785.
2. Khan F. M., Gibbons J. P. *Khan's the physics of radiation therapy*. – Lippincott Williams & Wilkins, 2014. – 572 с.
3. Wojcicka J. B. Technical Note: On Cerrobend shielding for MeV 18–22 electron beams // *Medical Physics*. – 2008. – Т. 35. – №.10 – С. 4625-9.



## ПИРИДИЛКАМФОРАСУЛЬФОНАТЫ – НОВЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ ОРГАНИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

К.Д. Ерин, А.Н. Санжиев, Е.А. Краснокутская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ans14@tpu.ru](mailto:ans14@tpu.ru)

Арил- и гетероарилсульфонаты являются востребованными полупродуктами для синтеза фармацевтических субстанций. На основании результатов более ранних исследований [1-3] разработан ряд ранее неизвестных пиридилкамфорасульфонов (Rуг-O-SO<sub>2</sub>Cas) реакцией диазотирования аминопиридинов в присутствии камфорасульфокислоты (CasSO<sub>3</sub>H) (схема 1). С равным успехом в реакции может быть использован как рацемат, так и индивидуальные энантимеры CasSO<sub>3</sub>H.

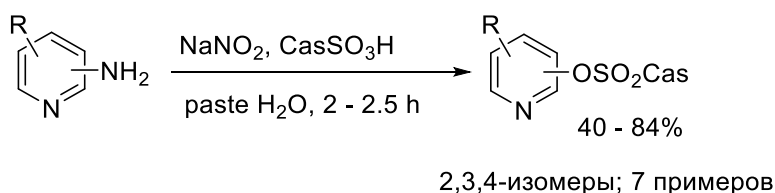


Схема 1.

Впервые показано, что Rуг-O-SO<sub>2</sub>Cas в присутствии основания могут под действием спиртов могут с успехом превращаться в алкоксипиридины (Rуг-OAlk). При этом обнаружено, что 2- и 4-пиридилкамфорасульфونات в указанном превращении образуют смесь таутомеров: Rуг-OAlk и N-алкилпиридон. По-видимому, под действием основания проходит гидролиз с образованием иона пиридония и соответствующего эфира камфорасульфокислоты (Alk-O-SO<sub>2</sub>Cas). Последний может алкилировать ион пиридония как по атому кислорода, так и по атому азота цикла. Данное предположение подтверждается, взаимодействием 2-пиридилкамфората (1) с изопропилбромидом в присутствии K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>: получена смесь 2-изопропилоксипиридина (2) и 1-изопропилпиридин-2(1H)-она (3) (схема 2).

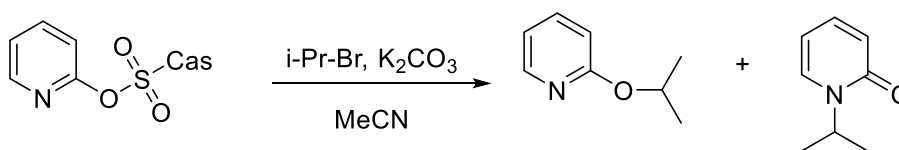


Схема 2.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-03-01097).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krasnokutskaya E.A., Kasanova A. Zh., Estaeva M.T., Filimonov V.D. A new synthesis of pyridinyl trifluoromethanesulfonates via one-pot diazotization of aminopyridines in the presence of trifluoromethanesulfonic acid. // *Tetrahedron Lett.* – 2014. Vol. 55. – P. 3771-3773.
2. Kasanova A. Zh., Krasnokutskaya E.A., Beisembei P.S., Filimonov V.D. A Novel Convenient Synthesis of Pyridinyl and Quinolinyl Triflates and Tosylates via One-Pot Diazotization of Aminopyridines and Aminoquinolines in Solution. // *Synthesis.* – 2016. – Vol. 48. – P. 256-262.



## ТОМОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНОГО КАЛИБРОВОЧНОГО ОБЪЕКТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Ю. А. Зубкова, Е. А. Бушмина, А. А. Григорьева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [yaz8@tpu.ru](mailto:yaz8@tpu.ru)

На сегодняшний день лечение онкологических заболеваний зачастую проводят с помощью лучевой терапии. В связи с тем, что имеется вероятность негативного проявления ионизирующего излучения, под разрушающим действием могут оказаться не только злокачественные клетки опухоли, но и здоровые клетки организма [1]. Таким образом возникает необходимость в проведении дозиметрического планирования процедур лучевой терапии. Проведение подобных процедур можно осуществить с помощью тканеэквивалентных дозиметрических фантомов. Подобные фантомы представляют собой модель тела человека, предназначенную для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения. Использование фантомов позволяет оценить распределение дозы в облученном объекте.

Дозиметрические фантомы изготавливаются из тканеэквивалентных материалов, обладающих составом близким к биологическим тканям. Они выполняются как в виде простых геометрических фигур, так и имитируя очертания тела человека. Фантомы, повторяющие свойства и размеры отдельных органов и тканей и изготавливающиеся на основе томографических данных пациента, называются индивидуальными. Авторами работы [2] предложено создавать такие фантомы с помощью применения технологии послойного наплавления.

Для исследования возможности реализации предложенного подхода был создан калибровочный объект с цилиндрическим сечением, содержащий участки шести различных плотностей, расположенных сложным образом. Калибровочный объект изготавливался с помощью устройства трехмерной печати Original Prusa i3 MK3 из чистого ПЛА пластика (полилактид) и ПЛА пластика с медной примесью. Дополнительно варьировался коэффициент заполнения для каждой зоны изделия.

Томографические данные сложного калибровочного объекта были получены на компьютерном томографе медицинского назначения Siemens Somatom Emotion 6. С помощью программного пакета RadiAnt DICOM Viewer были определены значения индексов Хаунсфилда для каждой зоны объекта. Были получены калибровочные зависимости индексов Хаунсфилда от параметров изготовления отдельных элементов объекта с учетом их взаимного расположения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 500 с.
2. Красных А. А. и др. Разработка способа экспериментальной верификации дозиметрического планирования лучевой терапии //Сборник материалов XII Всероссийской конференции молодых ученых-онкологов, посвященной памяти академика РАМН НВ Васильева «Актуальные вопросы фундаментальной и

клинической онкологии», 27–28 апреля 2017 г., г. Томск/под ред. Е. Л. Чойнзонова, Э. В. Галажинского, Н. В. Чердынцевой. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2017.–150 с. – 2017.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «PuO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ ПЛУТОНИЙ-ТОРИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

К.С. Иванов, И.Ю. Новоселов, А.Е. Тихонов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: ksi5@tpu.ru

Для дальнейшего развития ядерной энергетики перспективным является плутоний-ториевое дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) из оксидов делящихся металлов (плутоний, торий), равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и низкое сечение резонансного поглощения нейтронов [1]. При использовании изотопов торий-232 и плутоний-239 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении и появляется возможность создания энергетических установок сверхмалой (до 10 МВт) и малой (до 100 МВт) мощности.

В отличие от применяемых методов получения сложных оксидных композиций (СОК) путем раздельного получения и механического смешения оксидов металлов, плазмохимический синтез СОК из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), имеет следующие преимущества [2]: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты.

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы самария (вместо плутония), церия (вместо тория) и магния. Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/ч) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000$  °С осуществлялся синтез СОК, затем в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий, которые отстаивали, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре 150 °С. В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков. Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с), частоте диспергатора (50 Гц) и различных значениях  $\alpha = \text{Sm}/(\text{Sm} + \text{Nd})$  увеличение доли MgO (10...30 %) в составе СОК «Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» приводит: к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 9,4 до 7,4 мкм (при  $\alpha = 0,1$ ); с 12,9 до 5,3 мкм (при  $\alpha = 0,2$ ) и с 6,6 до 4,7 мкм (при  $\alpha = 0,3$ ). При этом размер «зерен» в частицах СОК не превышает 90 нм, что подтверждает плазмохимический синтез наноразмерных СОК из растворов ВОНР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.

2. Novoselov I. Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## 1-ОКСИПИРИДИНДИАЗОНИЙ СУЛЬФОНАТЫ: СИНТЕЗ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

А.Ж. Касанова, А.Н. Санжиев, Е.А. Краснокутская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: asiyakass@mail.ru

Соли диазония являются важными строительными блоками органического синтеза и все чаще используются в синтезе фармацевтических субстанций. Недавно нами разработан новый класс ароматических солей диазония – арендиазоний сульфонаты (тозилаты, трифлаты) [1, 2]. Показана их уникальная растворимость в водных и органических средах, безопасность при хранении. Целью данной работы является синтез и исследование ранее неизвестных гетероарендиазоний сульфонатов – пиридиндиазоний тозилатов, трифлатов и камфорасульфонов. Известная проблема – неустойчивость пиридиндиазониевых солей – решалась предварительным окислением исходных аминопиридинов. Мы впервые синтезировали ряд 1-оксидпиридиндиазоний сульфонов (тозилатов, трифлатов и камфорасульфонов) реакцией диазотирования аминопиридин-1-оксидов в присутствии соответствующих кислот (схема 1).

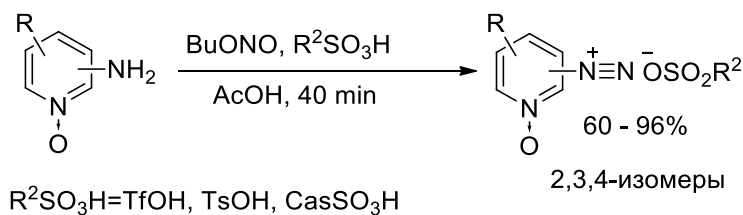


Схема 1.

Показано, что все синтезированные соли легко вступают в типичные для диазониевых солей превращения (азосочетание, иодирование, азидирование). В отличие от ароматических карбоциклических солей диазония 1-оксидпиридиндиазоний сульфонаты не вступают в Pd-катализируемые реакции кросс-сочетания (Хека, Сузуки, Соногашира), а восстанавливаются до 1-оксипиридинов. Обнаружено, что пиридиндиазониевые соли в отличие от арендиазоний сульфонов при взаимодействии с реагентами Гриньяра в отсутствие палладиевых комплексов с образованием продуктов С-С-сочетания.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-03-01097).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Filimonov V. D., Trusova M., Postnikov P., Krasnokutskaya E. A., Lee Y. M., Hwang H. Y., Kim H., Chi K.-W. Unusually Stable, Versatile, and Pure Arenediazonium Tosylates: Their Preparation, Structures, and Synthetic Applicability // Org.Lett. – 2008. – № 18. – P.3961–3964.
2. Filimonov V. D. et al. Synthesis, structure, and synthetic potential of arenediazonium trifluoromethanesulfonates as stable and safe diazonium salts //European Journal of Organic Chemistry. – 2019. – Vol. 2019. – №. 4. – P. 665-674.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО REMIX-ТОПЛИВА

А.А. Каренгин, К.С. Иванов, А.Г. Каренгин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: ksi5@tpu.ru

Применяемое на АЭС традиционное ядерное топливо из обогащенного по изотопу уран-235 диоксида урана, имеет низкую теплопроводность и короткий цикл использования. Представляет интерес использование регенерированного урана, обогащенного по изотопу уран-235, для изготовления дисперсионного REMIX-топлива в виде диоксида урана, равномерно распределенного в оксидной матрице с высокой теплопроводностью и низким сечением резонансного поглощения нейтронов [1].

В отличие от применяемых методов получения оксидных композиций (ОК) на основе отдельного получения и механического смешения оксидов металлов, плазмохимический синтез ОК в воздушно-плазменном потоке из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), имеет следующие преимущества [2]: одностадийность, высокая скорость, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза ОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы неодима (вместо урана) и магния. Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/ч) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000$  °С осуществлялся синтез ОК, далее в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий ОК, которые отстаивали, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре 150 °С.

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий ОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков.

Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с) и частоте диспергатора (35 Гц) увеличение содержания матрицы в виде оксида магния 5, 10, 15, 20, 30 и 50 % в составе ОК «Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» приводит соответственно к образованию частиц ОК в водных суспензиях размером 13,0; 9,4; 7,3; 6,8; 5,1 и 4,7 мкм. При этом удельная поверхность полученных порошков составляет 19,5; 18,0; 17,1; 15,2; 14,6 и 11,2 м<sup>2</sup>/г а размер «зерен» в частицах ОК – 39; 42; 45; 53; 56; 73 и 123 нм., что подтверждает плазмохимический синтез наноразмерных ОК из диспергированных растворов ВОНР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I. Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## **ОЦЕНКА ГРАДИЕНТОВ ДАВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ТОПЛИВНЫХ МИКРОКАПСУЛ И ГРАФИТОВОЙ МАТРИЦЫ С УЧЕТОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

В.В. Кнышев, И.В. Шаманин, С.В. Беденко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: vvk28@tpu.ru

В работе [1] рассматривается дисперсионный топливный элемент высокотемпературной ториевой реакторной установки эксплуатируемый в сверхдлинной кампании. По результатам исследований кампания одной топливной загрузки составляет более 8 лет (3000 эфф. сут.) работы без подпитки и перегрузки активной зоны, а выгорание изначального делящегося изотопа достигает  $\sim 90\%$  [1]. Эксплуатация микрокапсулированного топлива (МТ) в данном режиме сопровождается повышением термомеханических нагрузок на покрытия зерна МТ, в сравнение с привычными режимами эксплуатации и уровнем выгорания [2].

В данной работе разрабатывается расчетно-экспериментальная модель, позволяющая учесть влияние газообразных продуктов деления и их соединений на теплофизические свойства графитового топливного компакта ядерной энергоустановки с МТ, в условиях сверхдлинных режимах работы и больших глубинах выгорания. Разрабатываемая модель позволяет провести оценку градиентов давления на границе раздела МТ и графитовой матрицы с учетом термомеханических напряжений возникающих при сверхдлинной кампании топлива.

Данная модель учитывает диффузию продуктов деления и образующихся соединений, ионизационную и тепловую нагрузку на материалы МТ, и локализацию газообразных соединений в толщине равной двум длинам свободного пробега в первом защитном буферном слое, для осколков деления и тяжелых заряженных частиц, летящих с поверхности топливного зерна [3-4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90132.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Shamanin I.V., Grachev V.M., Chertkov Y.B., Bedenko S.V., Mendoza O., Knyshev V.V. Neutronic properties of high-temperature gas-cooled reactors with thorium fuel // *Annals of Nuclear Energy* – 2018-Vol. 113. - P. 286-293.
2. Дегальцев Ю.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.Ф. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении. – Москва.: Энергоатомиздат, 1987 – 208 с.
3. Беденко С.В., Кнышев В.В., Кузнецова М.Е., Шаманин И. В. Особенности формирования остаточного излучения дисперсионного микрокапсулированного ядерного топлива // *Известия вузов. Ядерная энергетика* – 2018 – Т. 2018. – №. 3. – С. 75-87.
4. Hales J.D., Williamson R.L., Novascone S.R., Perez D.M., Spencer B.W., Pastore G. Multidimensional multiphysics simulation of TRISO particle fuel // *Journal of Nuclear Materials* – 2013 – Volume 443 – Issues 1–3 – P. 531-543

## ВЛИЯНИЕ БОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.Г. Коротких<sup>1,2</sup>, И.В. Сорокин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: korotkikh@tpu.ru

Одним из способов повышения характеристик горения высокоэнергетических материалов (ВЭМ) является использование катализаторов или порошков металлов и их оксидов в составе твердого ракетного топлива [1-3]. В работе представлены результаты термодинамического расчета влияния добавок чистого бора на характеристики горения высокоэнергетических материалов (ВЭМ) на основе перхлората и нитрата аммония, активного горючего-связующего и порошков алюминия Al, титана Ti, магния Mg и бора B. С использованием программы термодинамического расчета «Терра» рассчитаны параметры горения и равновесного состава конденсированных продуктов сгорания (КПС) модельных составов ВЭМ. Рассмотрены составы твердых топлив, в которых варьировалось соотношение металлов (Al/B, Ti/B, Mg/B, Al/Mg/B). Определены значения температуры горения  $T_{ад}$  в камере сгорания, пустотного удельного импульса  $J$  на срезе сопла и массовой доли  $m_a$  конденсированных продуктов сгорания ВЭМ.

Установлено, что для составов ВЭМ на основе двойного окислителя и активного горючего-связующего увеличение содержания бора в составе твердого топлива приводит к снижению температуры горения ВЭМ. Для составов, содержащих металлическое горючее Ti/B и Mg/B, наблюдается повышение  $T_{ад}$  в диапазоне содержания бора в составе металлического горючего 20–32% и 5–15%, соответственно. Для составов ВЭМ, содержащих добавки металлов Al/B=55,5/44,5, Mg/B=52,9/47,1 и Al/Mg/B=37,5/37,5/25,0, получены максимальные значения удельного импульса на срезе сопла. Однако, данные металлизированные составы ВЭМ образуют достаточно большое количество КПС на срезе сопла. Составы топлив, содержащие добавки металлов с высокой концентрацией бора Al/B=20/80, Mg/B=15,8/84,2 и Al/Mg/B=8,6/8,6/82,8, снижают массовую долю КПС в 3,5, 3,2 и 3,4 раза по сравнению с базовыми составами ВЭМ на основе чистого алюминия, магния и Al/Mg сплава, соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-33-90015.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанопорошки алюминия, бора, боридов алюминия и кремния в высокоэнергетических материалах / Под ред. Ш.Л.Гусейнов, С.Г.Федоров. – М.: Торус Пресс, 2015. – 255 с.
2. Sinditsky V.P., Chjornyj A.N., Zhuo S.Kh., Bobylev R.S. Combustion of mixtures of ammonium perchlorate with high-calorific combustibles // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. – 2016. – Vol. 30, No. 8. – P. 18-20.
3. Korotkikh A.G., Glotov O.G., Arkhipov V.A., Zarko V.E., Kiskin A.B. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants // *Combustion and Flame*. – 2017. – V. 178. – P. 195-204.

## **СИСТЕМА ПОЛИМЕРНЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ ПТФЭ, СФОРМИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ**

И.М. Колесник, Е.Н. Большасов, В.М. Бузник

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: kolesnik0796@gmail.com

Изделия с развитой поверхностью на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) по причине высокой химической, термической устойчивости и гидрофобности находят широкое применение для очистки сбросных газов, мембранной и осмотической дистилляции, разделения водной и органических фаз, фильтрации кислот и щелочей [1]. В реконструктивно хирургии материалы из ПТФЭ благодаря биоинертности и своим диэлектрическим свойствам используются в качестве протезов сосудов, стенок клапанов сердца, мембран в стоматологии, пластической хирургии и т.д. Основными методами изготовления являются методы термомеханической обработки, лазерной абляции и применение порообразователей. Также для получения пористых нетканых материалов широко используется метод электроформования. Однако прямое электроформование ПТФЭ невозможно по причине отсутствия подходящих растворителей и высокой вязкости его расплава. В данной работе описывается метод получения пористых ПТФЭ мембран из водной суспензии ПТФЭ с волокнообразующим полимером – поливиниловым спиртом (ПВС), а также исследованы особенности их строения.

Для формирования нетканых материалов использовался ряд прядильных растворов с различным содержанием суспензии Ф-4Д и водного раствора ПВС. Формирование нетканых материалов осуществилось методом электроформования (Nanon NF-101, Япония). После формирования образцы нагревались до 360 °С. Измерение вязкости прядильных растворов проводилось с помощью синусоидального вибровязкозиметра. Исследование морфологии сформированных материалов осуществлялось с использованием сканирующего электронного микроскопа (JEOL JCM-6000, Япония).

Из результатов исследований следует, что сформированные мембраны обладают структурой, характерной для пористых материалов, полученных методом электроформования. После спекания наблюдается присутствие пор, однако на волокнах появляется большее число разрывов и неоднородностей. С увеличением содержания суспензии Ф-4Д уменьшается диаметр волокон, что является следствием снижения вязкости исходных растворов за счет меньшего содержания волокнообразующего полимера – ПВС. Согласно полученным данным возможно создание мембран из ПТФЭ вышеописанным методом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-03-00171

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Cui Z. Recent progress in fluoropolymers for membranes // Progress in Polymer Science. – 2014. – Vol.39. – P. 164–198 с.



## РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОГО ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПУЧКА МЕДИЦИНСКОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

В.С. Кондратьева, А.А. Григорьева, И.А. Милойчикова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: vsk29@tpu.ru

Линейные ускорители электронов успешно применяются для проведения лучевой терапии при лечении онкологических заболеваний [1]. Улучшение элементов и систем, генерирующих электронное излучение, новые компьютерные технологии, методы визуализации и способы формирования дозового поля, позволили ускорить прогресс в совершенствовании методов лечения пучками электронов [2].

Электронное излучение нашло широкое применение в лучевой терапии, благодаря своим особенностям взаимодействия с веществом. При лечении злокачественных образований пучками электронов достигается большая однородность дозы в области очага и меньшая дозовая нагрузка на критические органы и окружающие здоровые ткани [3].

Особенности взаимодействия электронов с веществом послужили причиной стремительного развития области электронно-лучевой терапии. Поэтому необходимо разработать как новые технические решения для точной доставки дозы, так и новые методы облучения.

На этапе прогнозирования результатов интеграции новых решений универсальным инструментом становится численное моделирование. Существует множество методов моделирования взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. Такие расчеты используются во многих областях, а именно в медицине, физике, химии и многих других. Это позволяет получить количественные характеристики эффектов взаимодействия. Точный расчет поглощенной дозы и профилей пучка может быть выполнен с помощью инструментария GEANT4 с применением метода Монте-Карло. Численное моделирование позволяет учесть сложную геометрию системы формирования терапевтических пучков, особенности взаимодействия электронов с веществом и оценить распределение дозы внутри мишени.

В рамках данного исследования была разработана численная модель, позволяющая моделировать поперечный профиль и процентную глубинную дозу для электронного терапевтического пучка в водном фантоме с использованием инструментария GEANT4.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милойчикова И. А. и др. Математическая модель источника терапевтического пучка электронов клинического линейного ускорителя // Медицинская техника. – 2019. – №. 5. – С. 35-38.
2. Thwaites D. I., Tuohy J. B. Back to the future: the history and development of the clinical linear accelerator // Physics in Medicine & Biology. – 2006. – V. 51. – №. 13. – P. R343.
3. Климанов В.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии Часть 2. Дистанционная лучевая терапия пучками заряженных частиц и нейтронов. Брахитерапия и радионуклидная терапия Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 328 с.



## ЗАПОЛНЕНИЕ БОЗЕ-КОНДЕНСАТОМ ОДНОМЕРНОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЫ В КВАЗИКЛАССИЧЕСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

А.Е. Кулагин<sup>1</sup>, А.Ю. Трифонов<sup>1</sup>, А.В. Шаповалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [aek8@tpu.ru](mailto:aek8@tpu.ru)

Достижения в экспериментальной технике позволили создавать ловушки сложной формы, в которых в течение длительного времени можно удерживать бозе-эйнштейновский конденсат. Например, одним из способов создания одномерной потенциальной ямы для бозе-конденсата является создание так называемых усредненных по времени ловушек за счет циклического перемещения локальной потенциальной ямы в пространстве [1].

Динамика бозе-эйнштейновского конденсата в потенциальной ловушке хорошо описывается моделью Гросса-Питаевского. При этом описание динамики конденсата со сложной геометрией, где существенно влияние нелинейного взаимодействия, является сложной математической задачей и на практике обычно ограничивается лишь прямым численным решением уравнения Гросса-Питаевского (см. напр. [2]).

Одним из таких процессов является расширение конденсата в одномерной потенциальной яме, которое происходит исключительно за счет нелинейного взаимодействия. Представленный нами в [3] подход позволяет на основе квазиклассического приближения для нелокальной модели Гросса-Питаевского получить простую модель описывающую динамику заполнения конденсатом ловушки без решения самого уравнения Гросса-Питаевского. Показано хорошее согласие квазиклассического описания с экспериментальными результатами и с численными решениями нелокального уравнения Гросса-Питаевского. В частности, оно позволяет с хорошей точностью рассчитать характеристические времена заполнения конденсатом потенциальной ямы. Также отмечены особенности учета феноменологического затухания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области, проект № 19-41-700004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bell T.A., Glidden J.A.P., Humbert L., Bromley M.W.J., Haine S.A., Davis M.J., Neely T.W., Baker M.A., Rubensztein-Dunlop H. Bose-Einstein condensation in large time-averaged optical ring potentials // *New Journal of Physics*. – 2016. – V. 18, no. 3. – article 035003.
2. Antoine, X., Duboscq, R. GPELab, a Matlab toolbox to solve Gross-Pitaevskii equations II: Dynamics and stochastic simulations // *Computer Physics Communications*. – 2015. – V. 193. – P. 95-117.
3. Shapovalov A.V., Kulagin A.E., Trifonov A.Yu. The Gross-Pitaevskii equation with a nonlocal interaction in a semiclassical approximation on a curve // *Symmetry*. – 2020. – V. 12, no. 2. – article 201.

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ГРАНИЦЫ, ПОЛОЖЕНИЯ И ТОКА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ КТМ ПО ДАНЫМ МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ

А.М. Ли, В.М. Павлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

e-mail: [alee@tpu.ru](mailto:alee@tpu.ru)

Реконструкция границы и положения плазмы в токамаках является одной из важнейших задач обработки экспериментальных данных, решение которой необходимо для анализа эксперимента. Существует большое количество методов реконструкции границы плазмы, большинство из которых основаны на обработке данных измерений магнитной диагностики токамака [1]. В состав измерений входят ток плазмы, токи обмоток и вакуумной камеры электромагнитной системы установки, а также, магнитный поток, компоненты магнитного поля и другие характеристики поля. Особенность токамака КТМ заключается в том, что ток плазмы не может быть измерен в результате прямого измерения, из-за наличия в вакуумной камере токопроводящих конструктивных элементов, расположенных внутри измерительного контура, следовательно, ток плазмы должен быть найден в ходе решения задачи реконструкции границы и положения плазмы. Для решения задачи реконструкции нами был выбран и модифицирован метод токовых нитей [2], метод основан на замене плазмы и токопроводящих элементов конечным набором витков, величина токов в которых определяется на основе обработки данных измерений. После нахождения всех неизвестных токов, строится карта магнитного потока и определяется граница плазмы, как крайняя замкнутая магнитная поверхность, целиком и полностью заключенная в области ограниченной лимитером вакуумной камеры установки. На рис. 1 показаны кадры реконструкции границы, положения и тока плазмы, в разные моменты времени разряда №3669 токамака КТМ.

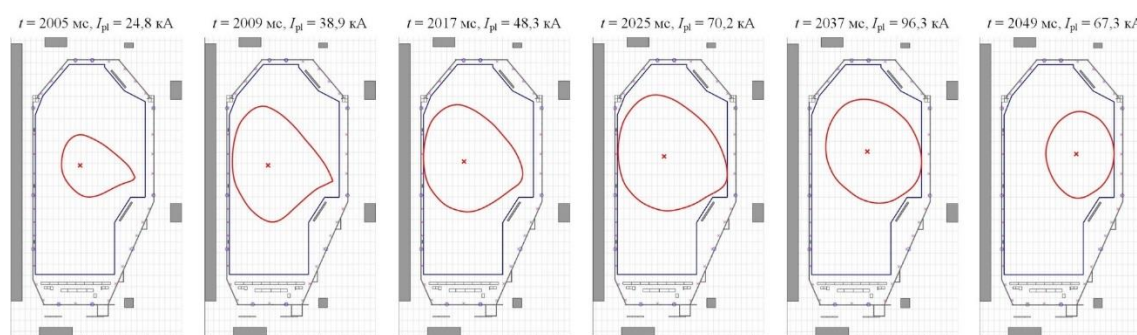


Рис. 1. Кадры реконструкции границы плазмы разряда №3669 токамака КТМ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-11-2019-013 от «11» октября 2019 г. Идентификатор проекта RFMEFI58519X0007.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Braams B.J. The interpretation of tokamak magnetic diagnostics // Plasma Phys. Control. Fusion. 1991. Vol. 33, № 7. P. 715–748.
2. Swain D.W., Neilson G.H. An efficient technique for magnetic analysis of non-circular, high-beta tokamak equilibria // Nucl. Fusion. 1982. Vol. 22, № 8. P. 1015.

## ОЦЕНКА РАДОНООПАСНОСТИ УЧАСТКОВ ЗАСТРОЙКИ НА ОСНОВЕ ДИФфуЗИОННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА РАДОНА

Ф.И. Ложников<sup>1</sup>, К.О. Ставицкая<sup>2</sup>, Н.К. Рыжакова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [shilovaxeniya@gmail.com](mailto:shilovaxeniya@gmail.com)

Важнейшим направлением деятельности любого государства является охрана здоровья населения. Особый интерес представляет радиационная безопасность, связанная с природными источниками излучения. К числу таких источников в первую очередь относится радиоактивный газ радон. Радон представляет серьезную угрозу для здоровья населения, проживающего на нижних этажах зданий. В связи с этим при проектировании и строительстве зданий проводятся оценки радоновых рисков на участках застройки. В странах Европы при проведении оценок измеряют объемную активность радона (ОА) в почвенном воздухе [1] на глубинах 0,8...1 м. Измерения проводят в точках, расположенных на равномерной сетке на расстояниях до 10 м, что является достаточно трудоемким. Затраты на измерения ОА можно существенно снизить за счет использования диффузионной модели переноса радона через грунты [2].

Для расчёта ОА на заданной глубине нужны значения коэффициентов диффузии и эманирования радона, которые измеряют в лабораторных условиях. Однако в ходе подготовки образцов к измерениям нарушаются естественная влажность и пористость грунтов, от которых зависит выход радона. В данной работе приведены результаты оценок коэффициентов диффузии и эманирования, полученные в условиях природного залегания суглинков. Оценки основаны на измерениях активности радона в почвенном воздухе на двух, отличающихся в два раза глубинах (0,4 м и 0,8 м) [2]. Измерения выполнены в основании фундамента строящегося здания на глубине 1,5 м. В работе приведены диапазоны и средние значения плотности сухого грунта, пористости, удельной активности радия и относительной влажности грунта, а также диапазон и средние значения коэффициентов диффузии и эманирования. В случае сравнительно однородных грунтов использование метода «двух глубин» и диффузионной модели позволяет рассчитать ОА радона на представляющих интерес глубинах и, следовательно, избежать трудоемких измерений этой величины на всей площади участка застройки. Отметим, что для населенных территорий характерны осадочные типы грунтов, залегание которых обычно характеризуется большой горизонтальной протяженностью и толщиной, поэтому на небольших территориях застройки условия однородности грунтов обычно выполняются.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90044.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mazur D., Measurements of radon concentration in soil gas by CR-39 detectors / Mazur D. [et.al.] // Radiation Measurements- 1999. Vol.31. -P.295- 300.
2. Ryzhakova Nadezhda K., A new method for estimating the coefficients of diffusion and emanation of radon in the soil // Journal of Environmental Radioactivity-2014. Vol.135 -P.63-66.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОЦЕССА ВОДООЧИСТКИ

И.С. Надеждин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kun9@tpu.ru](mailto:kun9@tpu.ru)

Очистка водных источников от вредных примесей, с каждым годом, становится все более актуальной и трудоемкой задачей. Сегодня использование электрической энергии в физико-химических методах очистки воды составляет основную концепцию новых методов. Одним из таких методов является метод очистки воды базирующийся на электрической эрозии. Целью данной работы является разработка математической модели электроэрозионного процесса очистки воды. В дальнейшем разработанная математическая модель процесса будет использована для оптимизации энергозатрат на процесс водоочистки.

В результате анализа было выделено три стадии протекания моделируемого технологического процесса. На первой стадии происходит распространение электрических разрядов между металлическими шариками в межэлектродном пространстве бака-реактора водоочистной установки, на второй стадии происходит образование электроэрозионных лунок на поверхности шариков и образование продуктов эрозии, и третья стадия – это протекание химических реакций окисления и сорбции вредных примесей, содержащихся в очищаемом водном растворе.

Для разработки математической модели распространения электрических разрядов между металлическими шариками в межэлектродном пространстве был использован метод вероятностных клеточных автоматов. Процесс формирования эрозионных лунок на поверхностях металлических шариков и выделения продуктов электрической эрозии был описан с помощью основных физических законов. Кинетика химических реакций окисления продуктов электроэрозии и осаждения примесей была описана системой дифференциальных уравнений [1].

Разработанная математическая модель была реализована в пакете MatLab. В ходе работы были сопоставлены экспериментальные данные и результаты моделирования. Расхождение между полученными данными составило не более 5 %. Полученные результаты являются приемлемыми для дальнейшего использования разработанной математической модели при оптимизации энергозатрат электроэрозионного процесса очистки воды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00085 мол\_а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nadezhdin I.S., Papasidero D., Goryunov A.G., Manenti F. Optimisation of EDM process for water purification // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Vol. 52. – P. 325–330.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА БОРА

А.А. Пермикин, М.М. Балачков, М.С. Кузнецов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aap71@tpu.ru](mailto:aap71@tpu.ru)

Карбид бора нашёл широкое распространение в ядерной технике благодаря высокой способности изотопа  $B^{10}$  поглощать нейтроны. Существует несколько методов получения  $B_4C$ , но все они либо являются дорогостоящими, либо отличаются большим содержанием примесей, использование метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) позволит избежать данных проблем. Одной из особенностей СВС является сильное влияние параметров прохождения синтеза на конечные продукты. Возникает необходимость определения оптимальных параметров для синтеза соединений с помощью математического моделирования. Простейшие математические модели прохождения СВС базируются на уравнении теплопроводности [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(c \cdot \rho \cdot u) = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}(u)) + f(\vec{r}, u, \eta),$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость;  $\rho$  – плотность;  $u$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $f(\vec{r}, u, \eta)$  – функция тепловых источников;  $\vec{r}$  – радиус вектор;  $t$  – время;  $\eta$  – массовая доля продукта.

Для описания скорости химической реакции можно воспользоваться следующим уравнением:

$$\frac{d\eta}{dt} = k(u) \cdot \varphi(\eta),$$

где  $k(u)$  – температурно-активационная функция;  $\varphi(\eta)$  – кинетическая функция химической реакции.

Для верификации построенной модели были проведены эксперименты по синтезу данного соединения. Синтез инициировался локальным подводом тепла вольфрамовой спиралью, температурный режим контролировался комплексом вольфрам-ренийевых термопар. Расчётная и экспериментальная термограммы приведены на рисунке 1.

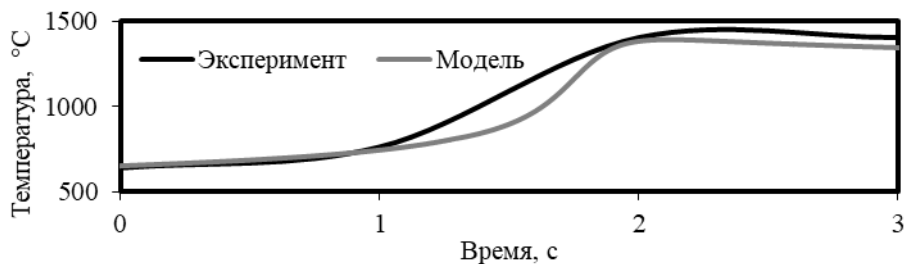


Рис. 1. Температурный режим протекания СВ-синтеза в системе В-С

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-43-703022/19.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князева А.Г. Макрокинетика: понятия, определения, приложения: учебное пособие / А.Г. Князева. – Томск: Изд-во Типография ООО «С-принт», 2014. – 36 с.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ПУЧКА С ШИРОКИМ СПЕКТРОМ КИНЕТИЧЕСКИХ ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА E. COLI

А.В. Полосков, А.А. Курилова (Быкова), М.А. Серебренников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [poloskovav@tpu.ru](mailto:poloskovav@tpu.ru)

Электронный пучок является высокотехнологичным инструментом, востребованным во многих отраслях промышленности, в том числе для обеззараживания. Импульсные ускорители электронов отличаются компактностью и низкой стоимостью по сравнению с ускорителями непрерывного действия. Кишечная палочка или *Escherichia coli* (*E. coli*) играет важную роль в современной промышленной микробиологии, биологической инженерии и считается универсальным организмом для синтеза чужеродных белков [1].

Обработка водных растворов с *E. coli* проводилась в кюветах (толщина слоя воды 400 мкм, больше среднего пробега электронов)[2] и мембранах типа МФАС-МА-6 (толщина обрабатываемого слоя 150 мкм, меньше среднего пробега электронов). Бактерии пребывали в стационарной фазе роста - наиболее устойчивой к воздействию ионизирующего излучения [3].

Источник электронного пучка - ускоритель Астра-М с широким спектром кинетических энергий электронов в пучке [4], со средним пробегом электронов в воде 275 мкм и средней дозой 3 кГр.

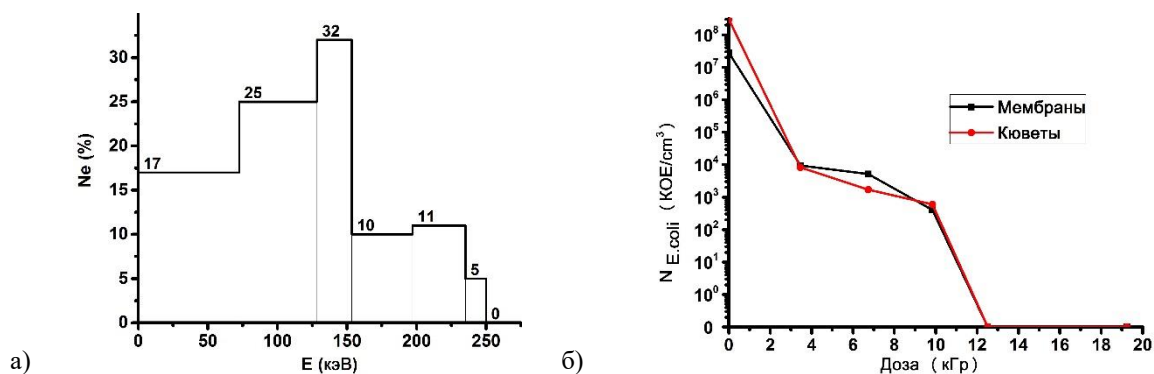


Рис. 1. а) Спектр энергий электронов пучка, б) Концентрация микроорганизмов от поглощенной дозы

Стерилизация *E. coli* в вводимом растворе и мембранных фильтрах достигнута при 12 кГр. Возможности стерилизации водного раствора с толщиной большей среднего пробега электронов объясняется химическим механизмом обеззараживания продуктами радиолиза водного раствора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта мол\_а № 18-32-00184

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определитель бактерий Берджи в 2 т. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. Дж. Хоулта, Н. Крига, П. Снита, Дж. Стейли, С. Уилльямса – М.: Мир, 1997. 432 с.
2. Kurilova A. и др. Application of Electron Beam for Wastewater Disinfection // Procedia Chemistry. – 2015
3. Туманян М.А., Каушанский Д.А. Радиационная стерилизация. – М.: Медицина, 1974. 304 с.
4. Poloskov A. и др. Energy depth distribution of pulsed electron beam with wide electron kinetic energy spectrum for an aluminum target // J. Phys. Conf. Ser. – 2019

## МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ КОМПЛЕКС МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

А.С. Попов<sup>1,2</sup>, Е.В. Обходская<sup>2</sup>, В.И. Сачков<sup>2</sup>, В.И. Чернов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>3</sup> НИИ Онкологии Томского НИМЦ,  
Россия, г. Томск, пер. Кооперативный, 5, 634009

E-mail: [asptomsktpu@gmail.com](mailto:asptomsktpu@gmail.com)

Анализ образцов дыхания является одним из перспективных методов ранней диагностики онкологических заболеваний. Один из способов анализа образцов дыхания – газовая хроматография масс-спектрометрия. Несмотря на то, что есть большое количество работ, показывающих эффективность этого метода при диагностировании раковых заболеваний, он не обладает достаточной мобильностью; требует относительно большого количества времени, если не на сам анализ, то на интерпретацию его результатов; а также необходимое оборудование является дорогостоящим и сложным в эксплуатации. По этим же причинам не подходит система газоанализаторов, основанная на флуорометрических датчиках, которые тоже успешно применяются при диагностике раковых заболеваний на основе выдыхаемого воздуха [1-2].

В качестве неинвазивного метода диагностики рака может выступать электронный нос – совокупность газовых датчиков и определенного метода обработки информации. В подавляющем большинстве работ, посвященных диагностике онкологических заболеваний с помощью анализа летучих органических соединений, используется искусственная нейронная сеть.

Исходя из поставленной задачи, наиболее подходящим вариантом архитектуры нейронной сети для подобного рода задачи классификаций, ближе всего подходит нейронная сеть прямого распространения типа персептрон. Входной слой соответствует количеству предварительно обработанных выходных сигналов с датчиков, выходной – количеству прорабатываемых диагнозов.

В настоящее время растет потребность в таких диагностических медицинских аппаратах, как мультисенсорный комплекс на основе электронного носа и искусственной нейронной сети. Он может использоваться в клинической практике, а также для слежения за стадиями протекания болезни. Конечное устройство обладает высокой мобильностью, поскольку не требует крупногабаритных элементов, как для сенсорной, так и для вычислительной части.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Соглашение о предоставлении гранта № 05.604.21.0221, RFMEFI60419X0221.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirsch, F.R., Franklin, W.A., Gazdar, A.F. Early detection of lung cancer: Clinical perspectives of recent advances in biology and radiology // *Clinical Cancer Research*. – 2001. – Vol. 7. – pp. 5–22.
2. Li, Z., Askim, J.R. & Suslick, K.S. The Optoelectronic Nose: Colorimetric and Fluorometric Sensor Arrays // *Chemical reviews*. – 2019. – Vol. 119. – No. 1. – pp. 231–292.



## СРАВНЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ МИШЕНЬ УСКОРЕННЫХ АТОМОВ И ИОНОВ

А.И. Прима, А.И. Пушкарев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aip17@tpu.ru](mailto:aip17@tpu.ru)

Выполнен сравнительный анализ воздействия пучка ускоренных атомов и ионного пучка на металлическую мишень в модели бинарных столкновений. Показано, что облучение мишени ускоренными атомами более соответствует облучению нейтронами в ядерном реакторе по спектру первично выбитых атомов (ПВА), эффективности и механизму формирования радиационных дефектов. Энергия ПВА в железной мишени после облучения ускоренными атомами углерода (энергия 0.2-0.4 МэВ) и нейтронами (1-3 МэВ) различается незначительно и превышает 10 кэВ. Энергия ПВА после облучения ионами с энергией 0.2-0.4 МэВ не превышает 0.1 кэВ [1]. На рисунке показана эффективность передачи энергии (произведение энергии ПВА на вероятность рассеяния) при торможении разных ионов и ускоренных атомов в железной мишени. Вероятность столкновения иона и ПВА нормализована, интеграл по энергиям ПВА (>10 эВ) равен единице.

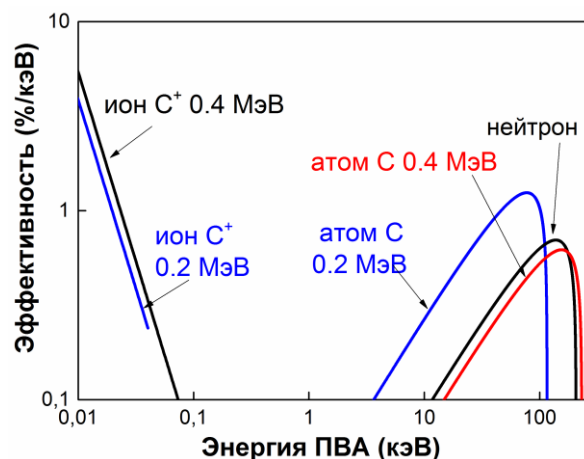


Рис. 1 Зависимость эффективности передачи кинетической энергии от энергии ПВА при торможении в железной мишени

Выполненные экспериментальные исследования показали, что при облучении пучком атомов углерода с энергией 250-300 кэВ среднее количество радиационных дефектов в каскаде смещения одного атома в 4-5 раз больше расчетных значений по программе SRIM [2] для ионов с той же энергией.

Выполненные исследования поддержаны РФФИ, грант 19-38-90001.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Was G.S. Challenges to the use of ion irradiation for emulating reactor irradiation // J. Mater. Res. – 2015. – Vol.30. – P. 1158-1182.
2. J.F. Ziegler - SRIM & TRIM. URL: <http://www.srim.org/>



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

К.С. Расторгуев, А.А. Каренгин, А.С. Пшеничников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: vir12@tpu.ru

Традиционное ядерное топливо из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, имеет ряд недостатков: низкая теплопроводность, короткий цикл использования, ограниченный ресурс изотопа уран-235. Перспективным является дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) из оксидов делящихся металлов (уран, плутоний), равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и низкое поглощение нейтронов [1]. В отличие от применяемых методов получения сложных оксидных композиций (СОК) путем раздельного получения и механического смешения оксидов металлов, плазмохимический синтез СОК из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), имеет следующие преимущества [2]: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты.

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и водные нитратные растворы неодима (вместо урана), самария (вместо плутония) и магния. Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/ч) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000$  °С осуществлялся синтез СОК, затем в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий СОК, которые отстаивали, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре 150 °С. В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков СОК. Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с), частоте диспергатора (50 Гц) и различных значениях  $\alpha = \text{Sm}/(\text{Sm} + \text{Nd})$  увеличение доли MgO (5...50 %) в составе СОК «Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» приводит:

- (при  $\alpha=0,1$ ) к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 13,5 до 4,3 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 10,1 до 21,0 м<sup>2</sup>/г и снижению размера «зерен» в СОК с 79 до 38 нм;
- (при  $\alpha=0,2$ ) к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 12,9 до 5,3 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 10,0 до 12,6 м<sup>2</sup>/г и снижению размера «зерен» в СОК с 79 до 63 нм;
- (при  $\alpha=0,3$ ) к снижению размера частиц СОК в водной суспензии с 6,6 до 4,7 мкм, снижению Суд порошков СОК с 15,2 до 11,9 м<sup>2</sup>/г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I. Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА ВЫХОД РАДОНА С ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТОВ

Н.К. Рыжакова<sup>1</sup>, К.О. Ставицкая<sup>1</sup>, Ф.И. Ложников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [shilovaxeniya@gmail.com](mailto:shilovaxeniya@gmail.com)

Наличие больших концентраций радона в жилых или производственных помещениях может спровоцировать появление онкологических заболеваний [1]. Основным источником радона, проникающим в здания и сооружения, являются грунты в основании фундамента зданий. В Российской Федерации для оценки радоноопасности участка застройки используются результаты измерения плотности потока радона (ППР). Однако, этот способ оценки подвергается критике из-за большой вариабельности результатов измерений [2]. Существует мнение, что одной из основных причин изменчивости ППР является влияние атмосферных условий. Однако, выводы, сделанные на основе ранее проведенных исследований о влиянии атмосферных условий на результаты измерения ППР имеют противоречивый характер. Кроме того, не ясно какие параметры атмосферы оказывают наиболее существенное влияние на значения ППР.

В работе проведено систематическое исследование зависимости результатов измерения ППР от температуры, давления и влажности атмосферного воздуха, а также от количества осадков, выпавших накануне измерений. Измерения проводили в летние периоды 2014, 2016 – 2018 гг методами накопительной камеры и угольных адсорберов на экспериментальных площадках, расположенных в г.Томске Российской Федерации; тип грунтов – суглинки, глины и глинистые сланцы. Для обработки результатов измерений использовали регрессионный анализ.

В ходе проведения исследования установлено, что комплексное влияние температуры и давления атмосферы не позволяет выявить какие-либо закономерности результатов измерения плотности потока радона в зависимости от этих параметров. Исключением является метод угольных адсорберов для которого обнаружена зависимость от влажности. На средние значения и вариабельность результатов измерения ППР сильное влияние оказывают осадки. Очевидно, это связано с изменением влажности грунтов, от которой зависит ППР. Зависимость значений ППР с поверхности исследованных грунтов от количества выпавших накануне осадков имеет разный характер, что обусловлено разной способностью грунтов впитывать влагу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90044.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nisar Ahmad, An overview of radon concentration in Malaysia / Nisar Ahmad [et al.] // Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2017, Vol. 10, N 4. – P. 327-330.
2. Neznal M., The new method for Assessing the Radon Risk of Building Sites / Neznal M., [et.al.] // Czech Geological Survey Special Papers. -2004. Vol.16. -P.7-47.

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ ТРИАЗЕНОВ ПИРИДИНОВОГО СКЕЛЕТА

А.Н. Санжиев, Ю.Н. Никитина, Е.А. Краснокутская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ans14@tpu.ru](mailto:ans14@tpu.ru)

Пиридин- и хинолинтриазены являются важными полупродуктами, например, при получении иод-фторпроизводных, кроме того, представляют самостоятельный интерес как медицинские препараты для лечения онкологических заболеваний. Как правило, триазены получают при взаимодействии солей диазония с органическими основаниями. Однако известная неустойчивость солей диазония пиридинового скелета является основной причиной дефицита надежных и эффективных методов синтеза пиридин- и хинолинтриазенов.

Показано, что в результате последовательного диазотирования 3-аминопиридина и 3-аминохинолина в присутствии трифторметансульфокислоты (TfOH) образуется соль диазония, устойчивость которой достаточна для дальнейшего взаимодействия с диэтиламино с образованием соответствующих триазенов с хорошими выходами (схема 1); 2- и 4-аминогетероциклы в указанных условиях, вследствие неустойчивости образующихся солей диазония, превращались в эфиры трифторметансульфокислоты [1].

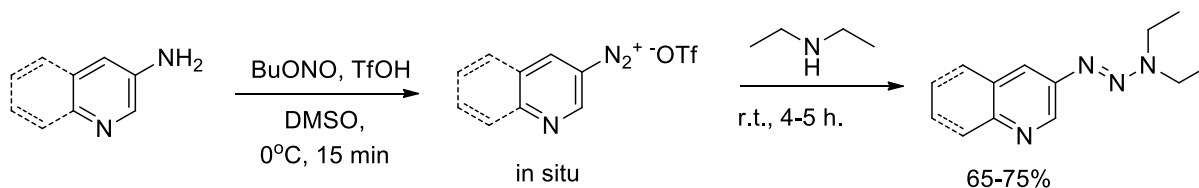


Схема 1.

Мы впервые показали, что последовательное диазотирование 2- и 4-аминопиридин-1-оксидов (**1, 2**) в присутствии TfOH приводит к образованию относительно устойчивых солей диазония, способных к дальнейшему взаимодействию с диэтиламино с образованием ранее не известных триазенов (**3, 4**) (схема 2).

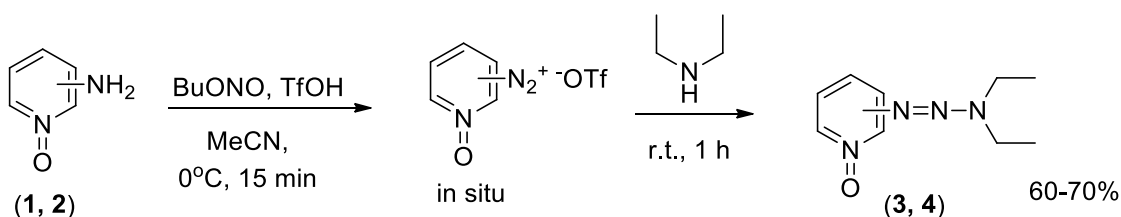


Схема 2

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 17-03-01097).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kasanova A. Zh., Krasnokutskaya E.A., Beisembei P.S., Filimonov V.D. A Novel Convenient Synthesis of Pyridinyl and Quinolinyll Triflates and Tosylates via One-Pot Diazotization of Aminopyridines and Aminoquinolines in Solution. // Synthesis. – 2016. – Vol. 48. – P. 256-262.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ АСПЕКТОВ ПОЛУЧЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д.В. Сиделёв

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [sidelevdv@tpu.ru](mailto:sidelevdv@tpu.ru)

В настоящее время ведётся поиск оптимального материаловедческого решения для толерантного топлива водо-водяных ядерных реакторов, стойкого при штатных условиях эксплуатации (360 °С, 18,6 МПа) и в случае аварийных ситуаций (до 1200 °С), в зарубежной литературе - accident tolerant fuel. Ключевая проблема, над решением которой работает большое количество научных групп и организаций, состоит в поиске защитного покрытия для циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) при возможных аварийных условиях (например, при аварии с потерей теплоносителя). В случае взаимодействия циркониевых сплавов (напр., Э110, Э635, Zircaloy 4, М5 и т.д.) с парами воды при высокой температуре (более 860 °С) происходит интенсивное окисление циркония, его охрупчивание, дополнительный нагрев оболочек ТВЭЛов (т.к. реакция окисления циркония - экзотермическая, -584,5 кДж/моль при 1200 °С). Покрытие, используемое для защиты Zr оболочек от окисления, должно обладать малым сечением захвата тепловых нейтронов, низкой водородопроницаемостью, высокой коррозионной и радиационной стойкостью, быть адгезионно прочным и иметь высокую износостойкость. Особые требования предъявляются к стойкости материалов к высокотемпературному окислению и растрескиванию под действием механических воздействий (например, на этапе изготовления тепловыделяющих сборок или при циклических деформациях Zr оболочек в турбулентном потоке теплоносителя) и микронапряжений, создаваемых в покрытии за счёт разницы коэффициентов температурного расширения материала покрытия и циркониевого сплава. На сегодняшний день из рассмотренных материалов наиболее подходящим кандидатом, удовлетворяющим указанным требованиям, является покрытие на основе хрома. В большом количестве научных работ показана перспектива использования хромовых покрытий для защиты циркониевых оболочек ТВЭЛов при штатных условиях работы ядерного реактора и при высокотемпературном окислении. Однако, как и для большинства металлов, при высоких температурах значительно возрастает коэффициент диффузии хрома в цирконий, особенно в β-фазе циркония. Взаимная диффузия атомов хрома и циркония приводит к формированию интерметаллидного слоя  $ZrCr_2$  и росту микрорёрен  $ZrO_2$  на границах зёрен хрома, что усиливает диффузию кислорода к циркониевому сплаву. В результате этого растрескивается хромовое покрытие, «открывается» прямой доступ кислорода к циркониевому сплаву, и покрытие теряет свои защитные свойства.

Для решения указанной проблемы необходимо разработать новую структуру покрытия с оптимальным элементным и фазовым составом с целью повышения коррозионной и радиационной стойкости, стойкости к тепловому удару, трещиностойкости и износостойкости циркониевого сплава в штатных условиях эксплуатации и при возможных аварийных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-21-00037.

## ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ С КОМБИНИРОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

Д.В. Сиделёв

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [sidelevdv@tpu.ru](mailto:sidelevdv@tpu.ru)

Для формирования функциональных металлических покрытий требуются новые технологические приёмы, ориентированные на расширение диапазона технологических параметров систем напыления. Одно из таких направлений состоит в снижении рабочего давления распылительных систем, что может быть реализовано с помощью комбинации слабо- и сильноточных импульсов. Настоящая работа посвящена изучению механизма распыления алюминиевой мишени в среде аргона при комбинированной схеме электрического питания. На рис. 1 представлен механизм поддержания газового разряда при распылении алюминиевой мишени в случае комбинированной схемы электрического питания.

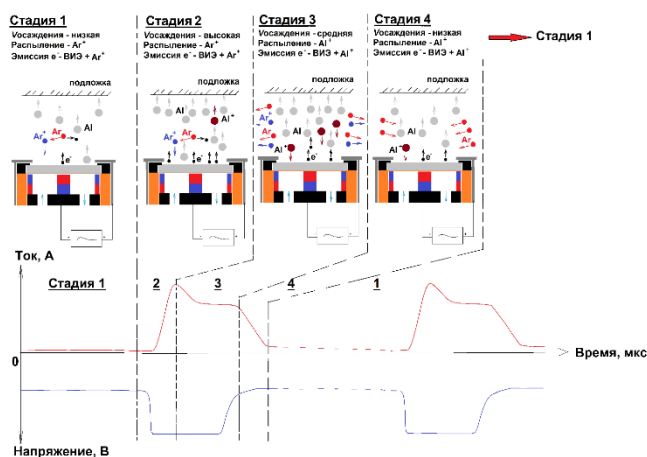


Рис. 1. Механизм поддержания газового разряда при распылении алюминиевой мишени

С помощью методов оптической спектроскопии плазмы газового разряда, зондовых исследований, данных по скорости осаждения покрытий, анализа осциллограмм были выявлена 4 стадии существования газового разряда. Стадия 1 – формирование слаботочного разряда, состоящего преимущественно из ионов аргона. Он поддерживается за счёт вторичной ион-электронной эмиссии и при ионизации аргона. Скорость осаждения здесь невелика. Стадия 2 – переход от слабо- к сильноточному разряду с формированием высокой плотности заряженных частиц. В этом режиме достигается максимальная скорость осаждения покрытий. Стадия 3 - при интенсивной эрозии материала мишени происходит (а) вымещение атомов и ионов аргона потоком атомов алюминия, направленным от мишени к подложке; (б) переход плазмы от газовой к металлической. Стадия 4 - в конце сильноточного импульса наблюдается дрейф плазмы к стенкам камеры, её рекомбинация, возврат газовой атмосферы в промежуток между мишенью и подложкой. Остаточная плазма используется для формирования нового сильноточного импульса, обеспечивая снижение разрядного напряжения, уменьшение вероятности перехода разряда в дуговой, стабильности тока разряда, снижения рабочего напряжения. В конечном счёте, это положительно сказывается на скорости осаждения и функциональных свойствах алюминиевых покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-38-00676 мол\_а.

## ГОРЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ БОРИДЫ МЕТАЛЛОВ

И. В. Сорокин<sup>1</sup>, А. Г. Коротких<sup>1,2</sup>, В.А. Архипов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: korotkikh@tpu.ru

Эффективным методом повышения энергетических характеристик высокоэнергетических материалов (ВЭМ) является использование порошков бора и боридов металлов, которые обладают высокими значениями удельной энергии, выделяемой в процессе окисления и горения [1-4]. В работе изучены порошки аморфного бора и боридов алюминия, которые добавлялись в состав твердого топлива на основе перхлората и нитрата аммония, активного горючего-связующего. Бориды алюминия были получены в НИИ ПММ ТГУ (Томск) с использованием СВС-метода. Проведена серия экспериментальных исследований процесса горения металлизированных составов твердого топлива в азоте при давлениях  $p = 0,5-7,0$  МПа. Определены значения скорости горения и степенного показателя для исследуемых составов ВЭМ в бомбе постоянного давления. Установлено, что полная замена порошка алюминия на аморфный бор в составе ВЭМ увеличивает скорость горения образца в 1,9–3,2 раза при изменении давления от 0,5 до 7,0 МПа. При этом показатель степени в законе горения топлива увеличивается с 0,58 до 0,84. При замене алюминия на бориды алюминия  $AlB_2$  и  $AlB_{12}$  скорость горения составов ВЭМ увеличивается 1,2–1,6 раза в указанном диапазоне давления, однако показатель степени остается постоянным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Korotkikh A.G., Kuznetsov V.T., Gromov A.A., Volkov S.A., Revyagin L.N. Influence of aluminum particle size on ignition and nonstationary combustion of heterogeneous condensed systems // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2012. – V. 48. – P. 625–635.
2. Berner M.K., Talawar M.B., Zarko V.E. Nanoparticles of energetic materials: synthesis and properties (Review) // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2013. – V. 49. – P. 625–647.
3. DeLuca L.T., Galfetti L., Severini F., Meda L., Marra G., Vorozhtsov A.B., Sedoi V.S., Babuk V.A. Burning of nano-aluminized composite rocket propellants // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2005. V. 41. – P. 680–692.
4. Chintersingh K.-L., Schoenitz M., Dreizin E.L. Boron doped with iron: Preparation and combustion in air // *Combustion and Flame*. – 2019. – V. 200 – P. 286–295.

## **ВЫХОД РАДОНА ИЗ ГРУНТОВ**

К.О.Ставицкая, Н.К.Рыжакова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [shilovaxeniya@gmail.com](mailto:shilovaxeniya@gmail.com)

Наиболее значимым источником радиоактивного излучения является инертный газ радон Rn-222 и его дочерние продукты распада, создающие более половины дозы от всех природных источников. В связи с этим в настоящее время при производстве инженерных изысканий проводятся радиационно-экологические исследования, составной частью которых является оценка радоноопасности участков застройки. В Российской Федерации для оценок потенциальной радоноопасности участка застройки используют плотность потока радона, измеренную на земной поверхности. К настоящему времени среди исследователей, занимающихся измерениями радона, сложилось мнение, что на количество выделяющегося с поверхности грунтов радона влияет геология территории [1,2]. Однако, исследования, посвященные выходу радона с поверхности грунтов разного типа практически отсутствуют. В работе представлены результаты измерения плотности потока радона на поверхности лессовидных суглинков, белой глины, глинистых сланцев, песчано-гравийных отложений, скального известняка, глинистого известняка, андезито-базальтового порфирита и кварцитов. Измерения плотности потока радона проведены методом накопительной камеры с помощью измерительного комплекса Альфарад Плюс. В работе также проведены измерения удельной активности радия и влажности грунта. В исследовании показано, что в зависимости от вида грунта количество выделяющегося с его поверхности радона отличается более чем на порядок. Самые большие значения плотности потока радона  $\sim 800$  мБк $\cdot$ м $^2$ с $^{-1}$  зарегистрированы для андезито-базальтового порфирита и кварцита, наименьшее значение  $\sim 40$  мБк $\cdot$ м $^2$ с $^{-1}$  – для лессовидных суглинков и глинистых сланцев. Для грунтов, состоящих из мелких песчаных и глинистых частиц, обнаружена достаточно сильная зависимость плотности потока радона от влажности. При измерениях грунтов с низкой влажностью (2...6 %) пропорциональной зависимости между удельной активностью радия и количеством радона, выделяющегося на поверхность грунта, не наблюдается. Вид грунта, в том числе его минеральный и дисперсный состав, а также природную влажность на глубинах залегания фундаментов зданий можно положить в основу классификации участков застройки по степени радоновых рисков. Соответствующая информация может быть предоставлена организациями, осуществляющими проектно-изыскательные работы на участках застройки. Предложенный в работе подход к оценке радоновых рисков позволит избежать проведения трудоемких измерений радона и, таким образом, снизить финансовые, материальные и трудовые затраты на строительство.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90044.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Mazur D., Measurements of radon concentration in soil gas by CR-39 detectors / Mazur D. [et.al.] // Radiation Measurements- 1999. Vol.31. -P.295- 300.
2. İçhedefa M., Soil gas radon concentrations measurements in terms of great soil groups / İçhedefa M.[et.al.] //Journal of Environmental Radioactivity – 2013, Vol.126 - P.165-171.



## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 С ИМПЛАНТИРОВАННЫМ СЛОЕМ ТИТАНА

М.С. Сыртанов, Е.Б. Кашкаров, А.Э. Шевелев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [maxim-syrtanov@mail.ru](mailto:maxim-syrtanov@mail.ru)

Авария на АЭС Фукусима-1 в результате потери теплоносителя дала серьезный толчок в области разработки покрытий для защиты тепловыделяющих элементов (ТВЭЛы) водо-водяных энергетических реакторов [1]. На сегодняшний день активно разрабатываются покрытия на основе Cr, SiC, CrN, TiN/TiAlN и другие, за счет высокой стойкости к окислению [2, 3]. Существенным недостатком нанесения покрытий является их плохая адгезия с циркониевыми сплавами, поэтому наряду с технологиями нанесения покрытий разрабатываются методы модификации поверхности пучками заряженных частиц. Высокоинтенсивная имплантация низкоэнергетических ионов титана может быть использована для формирования модифицированного слоя, обеспечивающего повышенные механические и трибологические свойства циркониевых сплавов [4]. Однако, исследования стойкости циркониевых сплавов с имплантированным слоем титана не проводились ранее. Таким образом, целью настоящей работы является изучение процессов высокотемпературного окисления циркониевого сплава Э110 модифицированного титаном.

Для исследования были подготовлены образцы циркониевого сплава Э110 размером 20×20×2 мм. Ионная имплантация титана осуществлялась на установке, разработанной в Томском политехническом университете, при следующих параметрах: плотность ионного тока – 100 мА/см<sup>2</sup>; продолжительность импульса – 5 мкс; температура – 973 К; флюенс – 5,6×10<sup>20</sup> ион/см<sup>2</sup>. Высокотемпературное окисление образцов осуществлялось в воздушной атмосфере при 873 К в течение 10 часов и в потоке водяного пара при 1373 К в течение 10 минут. По результатам исследования было установлено, что стойкость к окислению имплантированного сплава значительно ниже, чем у исходного циркониевого сплава Э110. Однако, при высокотемпературном окислении в водяном паре наблюдается увеличение коррозионной стойкости, прирост массы снижается до 10,1 мг/см<sup>2</sup>. Также установлено, что высокотемпературное окисление в среде водяного пара сопровождается формированием орторомбической фазы TiZrO<sub>4</sub>, которая имеет более плотную микроструктуру по сравнению с оксидами ZrO<sub>2</sub>. Оксидный слой имплантированного образца имеет неоднородную структуру поверхности, а на границе раздела оксид/металл обнаружено существенно меньше трещин, чем в образцах циркониевого сплава Э110 без имплантации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-48-703034.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minin N 2018 Energy Strategy Rev. 21 98.
2. Sidelev D V, Kashkarov E B, Syrtanov M S and Krivobokov V P 2019 Surf. Coat. Technol. 369 69.
3. Tang C, Stueber M, Seifert HJ and Steinbrueck M 2017 Corros. Rev. 35 141.
4. Ryabchikov A I, Kashkarov E B, Pushilina N S, Syrtanov M S, Shevelev A E, Korneva O S, Sutygina A N and Lider A M 2018 Appl. Surf. Sci. 439 106.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-MgO» ДЛЯ УРАН-ТОРИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

А.Е. Тихонов, В.И. Расторгуев, А.А. Каренгин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: aet13@tpu.ru

В отличие от применяемого ядерного топлива из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, имеющего низкую теплопроводность, короткий цикл использования и ограниченный ресурс изотопа уран-235, перспективным является уран-ториевое дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) из оксидов делящихся металлов (уран, торий), равномерно распределенных в оксидной матрице, имеющей высокую теплопроводность и низкое сечение резонансного поглощения нейтронов [1]. При использовании изотопа торий-232 не требуется дорогостоящее изотопное обогащение и появляется возможность создания энергетических установок сверхмалой (до 10 МВт) и малой (до 100 МВт) мощности.

Плазмохимический синтез сложных оксидных композиций (СОК) из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), в отличие от применяемых методов получения СОК путем отдельного получения и механического смешения оксидов металлов, имеет следующие достоинства: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты [2].

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы неодима (вместо урана), церия (вместо тория) и магния. Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/ч) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000$  °С осуществлялся синтез СОК, далее в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий СОК, которые отстаивали, фильтровали и прокаливали в течение 20 минут при температуре 150 °С.

В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков. Установлено, что при расходе воды на «закалку» (2,8 кг/с), частоте диспергатора (50 Гц) и различных значениях  $\alpha = \text{Nd}/(\text{Nd} + \text{Ce})$  увеличение доли MgO (10...30 %) в составе СОК «Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO» приводит: к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 9,8 до 9,3 мкм (при  $\alpha = 0,5$ ); с 8,9 мкм до 6,8 мкм (при  $\alpha = 0,6$ ) и с 6,6 мкм до 4,7 мкм (при  $\alpha = 0,7$ ). При этом, размер «зерен» в частицах СОК не превышает 70 нм, что подтверждает плазмохимический синтез наноразмерных СОК из растворов ВОНР.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I. Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## ПОВЕРХНОСТНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ГАЗООБРАЗНЫМ ФТОРОМ. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

И.О. Усольцева<sup>1</sup>, Н.А. Белов<sup>1</sup>, Д.С. Пашкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 195251

E-mail: [iou2@tpu.ru](mailto:iou2@tpu.ru)

Перфторированные полимеры играют огромную роль в современной промышленности. Однако их номенклатура относительно узка, что связано с ограниченным набором промышленных фторомономеров – тетрафторэтилен, гексафторпропилен, гексафторпропиленоксид и некоторые другие.

В тоже время широкое применение находит модификация полимерных изделий газообразным фтором. В этом случае на поверхности полимера-прекурсора формируется слой перфторированного полимера, который имеет свойства (химическая стабильность, адгезионные, барьерные и др.) существенно отличающиеся от свойств исходного полимера [1, 2].

Обычно процесс модификации проводят при температуре не выше 100 °С, используя фтор в смеси с инертными газами, кислородом и др. Углерод-углеродные насыщенные и эфирные связи при этом остаются стабильными, кратные углерод-углеродные связи фторируются, водород замещается фтором, гетероатомы (сера, кремний, азот и др.) вытесняются из полимерной структуры.

За времена порядка десятков минут на поверхности полимерного изделия формируется слой глубоко фторированного полимера толщиной до 10 мкм. После этого процесс фторирования лимитируется твёрдофазной диффузией фтора сквозь плёнку перфторированного полимера и его скорость становится пренебрежимо малой.

С использованием описанной методики были модифицированы изделия из полиэтилена и др.

Поверхностная модификация нашла практическое применение для повышения барьерных свойств полимерных топливных баков автомобилей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FSWW-2020-0020.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров В. Г. Поверхностная модификация полимеров: монография/ М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Московский гос. ун-т печати, Москва, 2008.
2. Харитонов А.П. Улучшение потребительских свойств полимерных изделий методом прямого фторирования // Химия фтора. – Томск, 2015. – С. 162-166.

## **ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ПОЛИКАПРОЛАКТОНА**

Е.О. Филиппова, Н.М. Иванова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [bosyheo@tpu.ru](mailto:bosyheo@tpu.ru)

Одним из перспективных направлений в лечении буллезной кератопатии является использование клеток, способных заместить дефект эндотелиального слоя роговицы. Однако клеточное культивирование и последующее наслаивание клеток на внутреннюю поверхность роговой оболочки без использования подложки проблематично. В связи с этим, использование биodeградируемого полимера – поликапролактона - в качестве временного материала для клеток может являться альтернативой нерастворимых полимеров, используемых в кератопластике. Так как поверхности пленок поликапролактона имеют гидрофобные свойства, то возникает вопрос о модификации материала и снижении значения его краевого угла смачивания, что достигается путем плазменной обработки без изменения объемных свойств полимера. Цель исследования – изучение влияния низкотемпературной плазмы атмосферного давления на поверхностные свойства пленок поликапролактона.

Плѐнки поликапролактона (PCL) были получены из раствора PCL, растворенного в  $\text{CHCl}_3$ . Модификация поверхности PCL проводилась путем обработки пленок низкотемпературной плазмы атмосферного давления. Время обработки составило 30с. Данные о строении поверхности пленок и ее шероховатости были получены с помощью микроскопа «Olympus Lext Ols 4100» (США). Профиль шероховатости поверхности строился в программе Gwyddion 2.47. Краевой угол смачивания измерялся с помощью прибора «KRÜSS Easy Drop DSA 20» (Германия).

В результате проведенных исследований выявлено, что вылитые пленки на основе PCL имеют топографически разные стороны поверхности: более рельефную – внешнюю и гладкую внутреннюю, что отражается в параметрах шероховатости (средняя шероховатость ( $R_a$ ) внешней стороны – 0,025 мкм, внутренней – 0,015 мкм). Модификация плазмой в 2,6 раз увеличивает шероховатость внешней и в 3,2 раз внутренней сторон пленок на основе PCL. Пленки на основе PCL обладают свойствами, близкими к гидрофобным, независимо от стороны поверхности (среднее значение краевого угла смачивания по воде  $75,6 \pm 0,88$ ). Модификация плазмой увеличивает гидрофильность материала, снижая краевой угол смачивания в среднем на  $12,5^\circ$  (на 16,5%), а также увеличивает значения поверхностной энергии в большей мере за счет полярной составляющей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00648.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» ДЛЯ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Н.С. Хоцеловский, А.А. Каренгин, А.Д. Побережников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: nsh4@tpu.ru

Приоритетным направлением развития ядерной энергетики в России является создание АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, использующих уран-плутониевое дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) в виде сложных оксидных композиций (СОК), включающих оксиды делящихся металлов (уран, плутоний) распределенных в матрице с высокой теплопроводностью и низким сечением резонансного поглощения нейтронов [1]. В отличие от применяемых методов получения сложных оксидных композиций (СОК) путем раздельного получения и механического смешения оксидов металлов, плазмохимический синтез СОК из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), имеет следующие преимущества [2]: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, низкие энерго- и трудозатраты.

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза СОК из диспергированных растворов ВОНР, включающих ацетон и смешанные водные нитратные растворы неодима (вместо урана), самария (вместо плутония) и магния. Подготовленные растворы ВОНР подавались (300 л/ч) через диспергатор в реактор плазменного модуля на базе ВЧФ-плазмотрона, где в воздушно-плазменном потоке при температурах  $\geq 1000^\circ\text{C}$  осуществлялся синтез СОК, затем в узле «мокрой» очистки происходило их резкое охлаждение («закалка») с образованием водных суспензий, которые отстаивали, фильтровали и прокачивали в течение 20 минут при температуре  $150^\circ\text{C}$ . В ходе исследований проводились лазерная дифракция водных суспензий СОК, сканирующая электронная микроскопия, БЭТ-анализ и рентгенофазовый анализ полученных порошков. Установлено, что при расходе воды на «закалку», частоте диспергатора (50 Гц) и различных  $\alpha = \text{Sm}/(\text{Sm}+\text{Nd})$  увеличение доли матрицы в виде Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10...30 %) в составе СОК «Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>» приводит:

- (при  $\alpha = 0,1$ ) к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 12,1 мкм до 4,3 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 5,5 до 7,8 м<sup>2</sup>/г и снижению размера «зерен» в СОК с 147 нм до 115 нм;

- (при  $\alpha = 0,3$ ) к снижению размера частиц водных суспензий СОК с 13,6 мкм до 10,2 мкм, увеличению Суд порошков СОК с 6,9 до 8,6 м<sup>2</sup>/г и снижению размера «зерен» в СОК с 118 нм до 93 нм;

Это позволяет утверждать, что плазменная переработка диспергированных растворов ВОНР в воздушно-плазменном потоке приводит к плазмохимическому синтезу наноразмерных СОК.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Novoselov I. Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО СВЧ РАЗРЯДА

А.А. Цхе<sup>1</sup>, С.А. Сосновский<sup>2</sup>, А.А. Луканин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

[ssa777@mail.ru](mailto:ssa777@mail.ru)

Высокие темпы развития нефтехимической, химической и фармацевтической отраслей, увеличение номенклатуры химической продукции неуклонно приводят к росту потребления химических препаратов. Со сточными водами от нефтехимической, химических и фармацевтических производств, лечебно-профилактических учреждений и животноводческих ферм химические вещества попадают в водоемы. Современные методы очистки водных стоков оказались неэффективными в отношении ряда химических препаратов. Эти препараты способны вызывать гибель микроорганизмов систем биоочистки сточных вод, а при попадании в водоем наносят тяжелый урон его флоре и фауне. В настоящее время наиболее универсальным и широко применяемым методом очистки сточных вод является биологическая и электрохимическая очистки. Одним из способов подготовки воды для биологической и электрохимической очистки могут служить процессы деструкции синтетической органики при действии активных радикалов, созданных в атмосферной плазме СВЧ- разряда в результате высокой энергетической эффективности плазмохимических реакций, протекающих в результате колебательного возбуждения молекул вещества в СВЧ-плазме. Одна из причин этого интереса заключается в новых возможностях, которые открывает этот разряд для практического использования. Основными разрядными продуктами являются активные окислители: короткоживущие частицы  $\cdot\text{O}$ ,  $\cdot\text{OH}$  и другие, способные воздействовать на растворы непосредственно во время СВЧ- электроразрядной обработки воздуха. Целью настоящей работы явилось исследование деструкции водных растворов диклофенака ( $\text{C}_{14}\text{H}_{11}\text{Cl}_2\text{NO}_2$ ), как модельного вещества, представляющего особую сложность при очистки сточных вод, в условиях воздействия активных радикалов, созданных в плазме атмосферного СВЧ-разряда. Также на выбор этого вещества повлияло возможностью прямого спектрофотометрического определения в интервале длин волн 200–600 нм с использованием спектрофотомера. Анализ оптических спектров поглощения водного раствора диклофенака показал протекание процесса деструкции, сопровождающегося снижением интенсивности поглощения в области 590 нм и увеличением интенсивности поглощения в области 200 нм. Согласно литературным данным снижение интенсивности поглощения в области 590 нм обусловлено деструкцией по азоксигруппам. Наибольшие изменения состава модельного раствора при воздействии плазмы СВЧ- разряда получены в среде воздуха. В докладе представлены обзорные данные, данные экспериментов, данные экспериментального оборудования, аналитические данные, общие выводы, выводы о перспективах использования этой технологии и список литературы. Показана физико-химическая и математическая модель процесса.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

## **ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С РАЗНОЙ РЕНТГЕНОКОНТРАСТНОСТЬЮ**

О.С. Чернова, А.А. Булавская, А.А. Григорьева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [osc6@tpu.ru](mailto:osc6@tpu.ru)

На сегодняшний день томография является одним из самых эффективных методов диагностики различных заболеваний. Высокая точность данного метода дает возможность исследовать отдельные составляющие человеческого организма, позволяя выявить малейшие патологии в их структуре[1]. Разного рода органы имеют различную рентгеноконтрастность, поэтому необходимо анализировать работу томографа на специализированных макетах, которые называются фантомами.

В медицине рентгеноконтрастность определяется путем облучения исследуемого объекта рентгеновским аппаратом с последующей проявкой снимков[2]. На основе полученных данных определяется соотношение между фотографической плотностью объекта и толщиной материала, принятого за стандарт.

В данной работе было проведено исследование образцов разной рентгеноконтрастности с целью определения состава фантома на основе изображений, полученных с помощью импульсного источника рентгеновского излучения с фиксированными значениями напряжения и тока, равными 70 кВ и 2 мА, соответственно, и газоразрядного детектора излучения. В ходе обработки результатов были составлены таблицы, включающие в себя данные RGB-профилей образцов материалов и тестовых моделей.

В результате был определен состав фантома, состоящего из четырех различных материалов, путем сравнения плотности просвечивания тестовых образцов и материалов данного фантома.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Булынин В. В., Смольянов В. В. Рентгеноконтрастная композиция для исследования пищевода // ВНМТ. 2011. №2.
2. Д.В. Щеглов, Т.М. Бабкина, Н.Н. Носенко, О.Е. Свиридюк, С.В. Конотопчик, А.А. Пастушин. Возможности рентгеноконтрастной цифровой субтракционной ангиографии и ультразвукового исследования при стенозах экстракраниальных артерий // Эндоваскулярная нейрорентгенохирургия. 2015. №2 (12).

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ «ОКНА ПРОЗРАЧНОСТИ ВОДЫ»**

М.В. Шевелев, А.С. Коньков, Б.А. Алексеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mvshev@tpu.ru](mailto:mvshev@tpu.ru)

Интенсивные и монохроматические источники излучения в спектральной области «водяного окна» необходимы для решения различных прикладных задач. Одним из перспективных источников излучения в рассматриваемом диапазоне частот является поляризованное излучение, возникающее при прохождении

заряда через тонкую пластинку. В энергетической области мягкого рентгеновского излучения, вблизи краев фотопоглощения вещества радиатора, реальная часть диэлектрической проницаемости может превышать единицу, и, как следствие, критерий Тамма-Франка будет выполняться. Таким образом, одновременно будет генерироваться два типа поляризационного излучения: переходное излучение и излучение Вавилова-Черенкова. В этом докладе мы представляем результаты теоретического исследования спектральных характеристик поляризационного излучения для двух случаев, когда критерий Тамма-Франка реализуется и не выполняется. В рамках представленной работы мы проанализировали влияние толщины и угла наклона радиатора на спектр возникающего излучения. Для описания свойств поляризационного излучения и комплексной диэлектрической проницаемости мы использовали метод поляризационных токов [1] и модель Хенке [2], соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00385 мол\_а.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карловец Д.В. К теории поляризационного излучения в средах с резкими границами // ЖЭТФ. – 2011. – Т.113. – вып. 1 (7). – С. 36–55.
2. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. X-ray Interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission, and Reflection at E=50-30,000 eV, Z=1-92 // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1993. – Vol. 54. – Issue 2. – P. 181-342.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Р.Б. Шишкин, В.М. Павлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [rbs2@tpu.ru](mailto:rbs2@tpu.ru)

Система управления плазмой ТОКАМАКа является совокупностью большого числа подсистем, представляющих собой контуры управления плазменными процессами (форма, ток, положение плазмы и т.д.). В ТОКАМАКе КТМ плазма имеет D-образную форму, вытянутую по вертикали. Стабилизация положения плазмы вертикали является сложной задачей, для её решения требуется обеспечить высокую точность и быстродействие системы управления [1].

В настоящее время существует возможность использования компьютерного моделирования с применением методов управления объектам и обработки информации, не используемых ранее, таких как нейронные сети и нечеткая логика. На данный момент уже существуют примеры успешного применения механизмов нечеткого вывода в системах управления плазмой [2, 3].

В рамках данной работы было проведено моделирование работы системы управления вертикальным положением плазмы с использованием в ней нечеткого регулятора на основе алгоритма Мамдани. Моделирование было проведено в среде графического моделирования SIMULINK с использованием встроенных средств реализации нечетких регуляторов. В дополнение был написан программный код на языке Си, реализующий нечеткий регулятор подобно реализации в Fuzzy Logic Toolbox – расширения к MATLAB.



Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-11-2019-013 от «11» октября 2019 г. Идентификатор проекта RFMEFI58519X0007.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.М. Павлов, А.В. Обходский, Ю.Н. Голобоков, А.В. Овчинников. Система управления плазмой. – М.: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 9 с.
2. Морелли Д.Э., Хиросе А., Вуд Х.С. Плазменный регулятор положения на основе нечеткой логики для STOR-M // TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY. – 2005. – Т.13. – № 5.
3. Суратия П., Патель Д., Раджпал Р., Котия С., Говиндараджан Д. Нечеткий регулятор на базе ПЛИС для управления положением плазмы в токамаке ADITYA // Fusion Engineering and Design. – 2012. – № 87. – С. 1866–1871.

### РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КАБЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Li Hongda<sup>1,2</sup>, С.А. Сосновский<sup>3</sup>, С.В. Тюрин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Shenyang ligong university, China, Shenyang, 6 Nanping Middle Rd, Hunnan Qu, Shenyang Shi, 110168

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>4</sup>ООО НПК "Авиор",  
Россия, г. Томск, ул. Бакунина, 26, Томск, 634003

[ssa777@mail.ru](mailto:ssa777@mail.ru)

Экономическая потребность в относительно недорогой электроэнергии в России, а также за рубежом в настоящее время постоянно увеличивается. В связи с этим строительство новых атомных станций, как одного из основных источников энергии является приоритетным в России. В настоящее время в Российской Федерации работает 38 энергоблоков АЭС общей мощностью 30 ГВт. Одним из важнейших элементов в системе ядерного реактора являются кабельная система. Актуальным является разработка теоретических моделей, методик и конструкций кабельных изделий, отличающихся повышенной надежностью, отвечающим всем современным критериям безопасности. Многочисленными исследованиями показано, что это может быть достигнуто с помощью создания новых методов контроля кабельных изделий при их производстве. Таким образом, в настоящее время, в связи с повышением уровня требований к безопасности атомных станций, разработка кабельных изделий повышенной надежности является актуальной задачей. Способ реализуется следующим образом. Через отверстие, выполненное по центру в корпусе устройства для бесконтактного измерения смещения токоведущего проводника, протягивается кабель, содержащий токоведущий проводник (жилу). При этом в памяти устройства после проведения калибровки хранятся электромагнитные координаты минимума неизолированной жилы. При помощи индуктора на токоведущий проводник наводится ток заданной частоты и формы. Осуществляя циклическое колебательное движение измерительной системы, относительно проходящего в измеряемой зоне кабеля происходит синхронное снятие показаний уровня напряжения с электромагнитных датчиков и соответствующих этим показаниям координат положения кабеля в измеряемой зоне. Из определенных электромагнитных координат минимума



неизолированной жилы, хранящихся в памяти устройства, и вычисленных на этапе калибровки устройства, вычитаются текущие электромагнитные координаты минимума рабочей изолированной жилы. После обработки результатов измерений определяется смещение токоведущего проводника относительно геометрического центра измеряемого кабеля. Результаты измерений в графическом виде отображаются на экране ЭВМ или любого портативного устройства для вычислений и обработки данных. Данный способ может быть использован при повышении качества и эффективности построения измерительных систем в области кабельного производства для атомных станций и в иных отраслях атомной промышленности.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

## **ПЕРЕРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ РАСТВОРОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО РЕАКТОРА**

Yu Xiaolin<sup>1</sup>, С.А. Сосновский<sup>2</sup>, В.И. Сачков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

[ssa777@mail.ru](mailto:ssa777@mail.ru)

Производства, связанные с химической обработкой руд и металлов, являются одними из наиболее вредных для окружающей среды. Поэтому вопросы эффективной утилизации жидких техногенных отходов (ЖТО) в настоящее время остаются весьма актуальными. Для группы промышленных ЖТО применение механического, биохимического, физико-химических и других методов очистки зачастую не даёт положительных результатов. Особенно затруднительна утилизация галогенсодержащих ЖТО, с большим набором и высокой концентрацией минеральных веществ. В этих случаях применяются термические методы обезвреживания, заключающиеся в окислении при повышенной температуре примесей в жидкости с образованием нетоксических соединений. Одним из термических методов обезвреживания промышленных ЖТО является термохимическое обезвреживание, проводимое в высокотемпературном распылительном реакторе (ВРР). Суть этого метода заключается в том, что жидкость в распылённом состоянии вводится в высокотемпературную зону ВРР. При этом капли жидкости полностью испаряются, токсические примеси подвергаются термохимическому разложению и окислению. Содержащиеся в жидкости минеральные примеси образуют твёрдые частицы, которые уносятся с газами и улавливаются в фильтрационном блоке установки. На этом принципе построены процессы, идущие в аппаратах по регенерации отработанных травильных растворов металлургических предприятий. В основе этих процессов лежит пирогирилиз отработанного раствора в распылительном термохимическом реакторе с последующим отделением твёрдой фазы в виде высокодисперсного порошка и конденсацией паров кислоты в массообменных колоннах. В нашем случае ВРР работал в режиме нисходящего прямотока. Пневматическая форсунка, через которую впрыскивается раствор, располагалась в центре крышки реактора. Подача реагента-теплоносителя происходила через тангенциальное отверстие верхней части распылительной камеры. Стендовый реактор работал с полным уносом твёрдой фазы. В качестве определяющей принималась температура аэрозольного потока на выходе из реактора. В ходе работы была проведена серия экспериментов при различных

температурах и получены образцы твердого и жидкого продуктов регенерации. Длительность отдельного опыта определялась количеством твёрдого и жидкого продукта, которое должно было быть достаточным для анализа его свойств. Приводятся примеры использования полученного порошка.

В настоящее время прорабатывается плазмохимическая схема процесса регенерации отработанных фторсодержащих растворов титановых, стекольных и рудо перерабатываемых производств, с возвратом регенерированной кислоты.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 0721-2020-0028.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИРОДНЫХ ГЛИН КАК БАРЬЕРОВ ДЛЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАО

В.Ф Мышкин, Ван Цайлунь, И.В. Туксов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [caylun1224@gmail.com](mailto:caylun1224@gmail.com)

Развитие атомной энергетики приводит к накоплению значительных количеств радиоактивных отходов (РАО). Потенциальная опасность актинидов сохраняется сотни тысяч лет. Для локализации РАО необходима разработка эффективных и экологически безопасных методов. Общеизвестно, что эффективным способом обращения с такими отходами является размещение их в геологических формациях, содержащих глины. Цель исследования – оценка коэффициентов диффузии различных катионов в глинистых минералах, используемых как барьер для локализации РАО.

Распространение РАО связано с диффузией радионуклидов в глине и в порах, а также переносом с помощью потоков воды. Установлено, что при плотности более  $1,5 \text{ г/м}^3$  глинистые минералы практически не проницаемы для воды [1]. Большая часть радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , изотопы Pu и U) сорбируется на глине за счёт обмена ионами. Скорость ионного обмена зависит от термодинамики обмена, состава и концентрации раствора, от сорбируемых ионов и ионной формы глины. Более эффективно обмен катионов происходит из нейтральных растворов [2]. Это связано с тем, что ионы металлов не конкурируют с  $\text{H}^+$  за активные центры.

Для оценки величины коэффициента диффузии катионов радионуклидов внутри кристаллитов иллита оценивали энергию связи межслоевых ионов с минералом с помощью программы для квантово-химических расчетов Materials Studio. В таблице приведены энергии кулоновской связи минерала иллита с ионами металлов. Известно, что координационные числа зависят от ионных радиусов. Координационные числа указаны в скобках, а радиусы приведены в ангстремах. Чем больше ионный радиус, тем на большее расстояние раздвигаются два соседних слоя атомов минерала, а суммарная энергия связи расчетной ячейки уменьшается. Максимальная энергия связи наблюдается для иона  $\text{Na}^+$ .

Таблица 1

ион	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr	Sr	Ra
энергия связи, кэВ	-23,930	-28,390	-26,293	-25,813	-25,374	-25,290	-26,515	-25,819
ионный радиус, Å	1,06 (8)	1,32 (8)	1,65 (8)	1,75 (8)	1,88 (8)	1,94 (6)	1,40 (8)	1,62 (8)

Видно, что с увеличением радиуса катионов щелочных элементов энергия связи уменьшается.

Однако, литий выпадает из этой закономерности. Во втором периоде также наблюдается координация между энергией связи и ионного радиуса. Энергия, необходимая для преодоления ионом барьера в элементарной ячейке иллита связана с ионным радиусом. В докладе приводится анализ процессов, приводящих к уменьшению коэффициента диффузии катионов радионуклидов через иллит.

Исследования выполнялись в рамках гранта РФФИ 16-08-0024616.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matusiewicz, M., Olin, M. Comparison of microstructural features of three compacted and water-saturated swelling clays: MX-80 bentonite and Na- and Ca-purified bentonite // Clay Minerals, 54(1), 75-81, 2019.
2. Leng Ya., Henderson M.J., Courtois J. at all. Sorption of plutonium on geological materials associated with a Chinese radioactive waste repository: influence of pH // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2016. – V. 308. – P. 895–903.

#### ЛАЗЕРНАЯ ДЕЗАКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЭЛОВ

В.А. Хан<sup>1</sup>, В.Ф. Мышкин<sup>1</sup>, Д.М. Хорохорин<sup>1,2</sup>, М.С. Кузнецов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат»,  
Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, 53, 662972

E-mail: [dmh1@tpu.ru](mailto:dmh1@tpu.ru)

В настоящее время перспективны ядерные реакторы 4-го поколения, такие как быстрые натриевые, использующие мокс-топливо. Производство мокс-топлива имеет множество технологических особенностей и контрольных операций, не характерных для технологии топлива на основе UO<sub>2</sub>.

Мокс-топливо содержит плутоний, который в ~180000 раз активнее природного урана, претерпевающий в основном  $\alpha$ -распад. Поэтому попадание мельчайших частиц топлива на внешнюю поверхность трубки твэла, вносит большое  $\alpha$ -загрязнение. Поэтому при производстве твэлов с мокс-топливом требуется контроль поверхностного загрязнения  $\alpha$ -активными радионуклидами.

При загрузке трубки топливным столбом микрочастицы топлива могут попасть на торец трубки. При последующей приварке заглушки возможно попадание микрочастиц в сварной шов заглушки. Загрязнение твэла представляет из себя микрочастицы мокс-топлива находящиеся на поверхности трубки, а также включенные в объем сварочного шва заглушки твэла.

Известна технология дезактивации трубки твэла, включающая протирку поверхности твэла через тканевые чистящие элементы картриджа [патент РФ№2605540]. Однако, метод не обеспечивает удаление радиоактивных пылинок, частично утопленных в объем сварного шва заглушки твэла.

Для дезактивации сварного шва предлагается использовать лазерное испарение поверхности оболочки твэла. Задача исследования – оптимизация параметров лазерных импульсов, позволяющих максимально уменьшить активность сварного шва трубки твэла при минимальном увеличении шероховатости поверхности трубки.

Стальные сплавы и оксиды урана, плутония отличаются теплоемкостью, температурами плавления и кипения. Селективному испарению микрочастиц оксидов способствует их меньшая теплопроводность и высокий коэффициент поглощения лазерного излучения на рабочей длине волны. Металлы и оксиды металлов нагреваются с разной скоростью из-за того, что имеют разные показатели преломления и

теплопроводность. Это позволяет селективно испарять внедренные в металл микрочастицы оксидов, находящихся в поверхностных слоях сварного шва.

Для экспериментальных исследований использованы импульсный лазер на стекле с неодимом, линза, позиционирующее устройство с закрепленной пластиной, имитирующей сварной шов твэла.

В докладе обсуждаются экспериментальные результаты и модель процессов, протекающих на поверхности сварного шва, в объеме которого содержатся полупроводниковые микрочастицы, при облучении импульсным лазерным излучением. Контроль остаточной активности поверхности проводили с помощью гамма-спектрометра. Кратеры, образующиеся на поверхности металла при облучении фокусированным лазерным излучением, рассматривали с различным увеличением с помощью сканирующего электронного микроскопа. Глубину кратера на поверхности трубки твэла оценивали с помощью оптического профилометра.

Исследования выполнялись в рамках гранта РФФИ 16-08-0024616.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ИЗДЕЛИЙ, НАПЕЧАТАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

В.Ф. Мышкин, К.Т. Шикерун

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [shikerunk@gmail.com](mailto:shikerunk@gmail.com)

Атомная энергетика является динамически развивающейся отраслью – повышается эффективность ядерных технологий, разрабатываются безотходные технологии. Это стимулирует развитие новых направлений, например, аддитивных технологий, связанных с лазерным плавлением порошка.

При использовании технологии селективного лазерного плавления, в микроструктуре металлических заготовок возникают дефекты. Наличие дефектов негативно сказывается на механических свойствах изделий. Дефекты представляют из себя следующие включения.

1. Газовые поры, возникающие при неполном выходе газа из расплава. Это поры сферической формы, которые остаются и после того, как металл затвердеет.
2. Поры, которые возникли в результате неполного проплавления слоя порошка. Это по большей части плоские пустоты в местах, где, в результате плавления, не произошло слияния частиц порошка с предыдущим слоем. Располагаются такие поры перпендикулярно направлению роста заготовки.

Количество пор в объеме заготовки характеризуется понятием пористости. Высокий показатель пористости существенно ухудшает такие характеристики, как: прочность, упругость, вязкопластичность. Поэтому поры ограничивает функциональное применение изделий, изготовленных при помощи метода селективного лазерного плавления.

В работе приводятся результаты исследований зависимости механических свойств от ориентации заготовок относительно рабочей платформы экспериментальной установки. Анализ микрошлифов из Ti-6Al-4V [1] показывает, что при выращивании образца прямоугольной формы, направление зеренной структуры совпадает с направлением выращивания. В случае с изготовлением тонких элементов, за счет их меньшего сечения, протекают иные тепловые процессы, что влияет на формирование микроструктуры. Направление роста и форма зерен в таком случае зависит от угла наклона элемента конструкции относительно лазерного луча.

Таким образом, микроструктура изделия зависит от технологии воздействия на слой порошка с

помощью лазерного луча. Для формирования изделия с заданными свойствами необходимо оптимизировать параметры лазерного излучения [2, 3].

В докладе приводится анализ процессов, протекающих на поверхности формируемого изделия, в зависимости от интенсивности на поверхности детали, длины волны и длительности импульсов лазерного излучения на порошки различной микроструктуры. Показываются возможности аддитивных технологий.

Исследования выполнялись в рамках гранта РФФИ 16-08-0024616.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simonelli M., Tse Y.Y., Tuck C. Effect of the build orientation on the Mechanical Properties and Fracture Modes of SLM Ti-6Al-4V. // Mater. Sci. Eng. A. 2014. Vol. 616. P. 1-11.
2. Kunze K., Etter T., Grässlin J., Shklover V. Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN-738LC alloy processed by selective laser melting (SLM). // Mater. Sci. Eng. A. 2015. Vol. 620. P. 213-222.
3. Thijs L., Kempen K., Kruth J.P., Van Humbeeck J. Fine structured aluminum products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. // Acta Mater. 2013. Vol. 61. No. 5. P. 1809-1819.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОГО СТЕКЛА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОРИСТОГО СТЕКЛОКОМПОЗИТА НА ЕГО ОСНОВЕ

В.И. Семенова, О.В. Казьмина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [stebeneva\\_valeriya@mail.ru](mailto:stebeneva_valeriya@mail.ru)

Преимущества получения композитов на основе неорганической матрицы в виде жидкого стекла это экологичность, пожаробезопасность, низкая стоимость и др. Имеются технологические сложности, связанные с изменением реологических свойств жидкостекольных композиций при твердении системы, что затрудняет формирование пористой структуры с заданным размером и формой пор, толщиной межпоровой перегородки. Основной реологической характеристикой данной системы является вязкость.

Цель работы – определить вязкость жидкого стекла в зависимости от его состава и плотности по экспресс методике при получении пористого стеклокомпозита по ранее разработанной технологии.

Для получения стеклокомпозита использовали порошок измельченного боя тарного стекла, жидкое натриевое стекло, газообразователь и гидроксид натрия, количество которого менялось и, как следствие, изменялись модуль и вязкость жидкого стекла. Исходными данными для расчета коэффициента динамической вязкости выбраны плотность жидкого стекла (по ареометру) и продолжительность истечения жидкого стекла из стеклянной воронки (затрачивается около 2 мин.). По формуле 1 рассчитывается силикатный модуль стекла [1], далее по формулам 2 и 3 уточняются константы  $B$  и  $W_0$ , и окончательный расчет вязкости по формуле 4 [2].

$$M = 3,175 - \frac{135 \cdot (\rho - 1,385)}{\tau} \quad (1)$$

$$B = 21,77 - 1,95 \cdot M \quad (2)$$

$$W_0 = 20,93 \cdot M - 46,39 \quad (3)$$

$$\text{Ln}\mu = \frac{B}{B - W_0} \quad (4)$$

где  $M$  – силикатный модуль;  $\rho$  – плотность жидкого стекла, г/см<sup>3</sup>;  $\tau$  – продолжительность истечения, сек.;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $B$  и  $W_0$  – константы.

Расчитанное значение вязкости составило 1,3 Па·с согласуется с экспериментальными значениями вязкости, полученными с применением ротационного вискозиметра Брукфильда DV-II (0,9 – 1,5 Па·с в зависимости от скорости вращения шпинделя). Таким образом, вязкость жидкого стекла можно рассчитывать в зависимости от количества введенного гидроксида натрия, что может служить теоретической базой для моделирования и реализации процесса низкотемпературного получения пористого стеклокомпозита.

Исследование выполнено при финансовой поддержке научного проекта РФФИ № 19-33-90099.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Тихомирова И.Н., Макаров А.В., Кирсанова С.В. Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2016. – 92 с.
2. Илларионов И.Е., Петрова Н.В. Особенности применения жидкостекольных смесей // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. – 2010. – № 4(68). – С. 62 – 70.

Научное издание

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В НАУКЕ,  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ. РОССИЙСКИЙ И  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ

Сборник научных трудов X Международной научно-практической конференции

Компьютерная верстка А.О. Семенов

Зарегистрировано в ООО Издательство «Ветер»

Размещено на корпоративном портале ТПУ