

АНОТАЦІЯ

Чернов І.О. Розробка складнооксидних сполук нейтронопоглинаючих матеріалів на основі диспрозію для поглинаючих елементів реактора ВВЕР-1000. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) зі спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (10 – Природничі науки). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої актуальної науково-практичної задачі атомнопромислового комплексу України, яка полягає в формуванні фізико-хімічних основ створення перспективних нейтронопоглинаючих матеріалів з титанату диспрозію та гафнату диспрозію, а також в випробуванні та обґрунтуванні працездатності матеріалів в умовах реактора ВВЕР-1000.

Дисертаційна робота виконана у Науково-технічному комплексі «Ядерний паливний цикл» Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» та на кафедрі фізики металів і напівпровідників Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Метою дисертаційної роботи є дослідження синтезу та встановлення параметрів виготовлення титанату диспрозію та гафнату диспрозію в порошковій і таблеткових формах із заданим комплексом характеристик та обґрунтування їх працездатності в умовах реактора ВВЕР-1000.

У *вступі* показана актуальність та важливість теми дослідження, визначена мета, предмет і основні завдання дисертаційної роботи. Висвітлена наукова новизна і практична значимість одержаних результатів.

У *першому розділі* представлений аналіз джерел інформації по нейтронопоглинаючим матеріалам що знайшли застосування в поглинаючих елементах (ПЕЛ) водо-водяних енергетичних реакторах. Показано, що сучасні

дослідження і випробування направлені на розробку нових матеріалів, таких як гафнат диспрозію. Сформульовано постановку завдання..

У *другому розділі* наведений перелік вихідних компонентів, експериментального обладнання, схеми виготовлення таблеток і викладено опис методик дослідження структурного стану та властивостей матеріалів.

У *третьому розділі* наведено результати досліджень впливу композиційних складів, розміру часток TiO_2 і HfO_2 та режимів синтезу на структурно-фазовий стан титанату диспрозію і гафнату диспрозію. Встановлено, що використання нанорозмірного порошку HfO_2 (~22 нм) при спіканні при 1650 °С, призводить до формування однофазного флюориту. Введення MoO_3 в кількості 2,5% ваг. сприяє утворенню структури флюориту та зниженню температури синтезу з 1650 °С до 1450 °С. Використання нанорозмірного порошку TiO_2 (~63 нм) призводить до формування однофазної гексагональної структури. Додаткове введення MoO_3 в кількості 3% ваг. у композицію титанату диспрозію сприяє формуванню однофазної структури типу пірохлору.

У *четвертому розділі* наведено результати досліджень характеристик таблеток титанату диспрозію і гафнату диспрозію при спіканні та гарячому пресуванні. Розроблено схему виготовлення таблеток з високою густиною методом спікання, яка включала попередній синтез, подрібнення порошків, формування і спікання таблеток. Наведено результати досліджень впливу гранулометричних складів порошків на щільність засипок в оболонках ПЕЛ.

У *п'ятому розділі* наведено результати позареакторних корозійних випробувань порошків і таблеток титанату диспрозію і гафнату диспрозію, як у відкритому вигляді, так і в складі макетів ПЕЛ в середовищі складу і параметрів теплоносія реактора ВВЕР-1000. Встановлено що характерним є збільшення маси таблеток, зі збільшенням часу витримки в автоклаві, при чому збільшення маси залежить від їх пористості (густини). Тривалими автоклавними випробуваннями (до 7200 годин) встановлено, що таблетки гафнату диспрозію з густиною 8,2...8,3 г/см³ характеризуються найвищою корозійною стійкістю, цілісністю та стабільністю структурно-фазового стану. Встановлено, що основним показником

при корозії таблеток, що обумовлює збільшення маси, є гідратація матеріалу таблеток. Вона полягає у проникненні ОН-групи в кристалічну ґратку гафнату диспрозію. Не виявлено ознак змін фізичного стану та фазового складу порошків що були випробувані у складі макетів ПЕЛ зі штучними дефектами протягом 5000 годин. Показана відсутність взаємодії між таблетками і сплавом 42ХНМ при перегрівих у водяній парі в температурному інтервалі 800...1200 °С. Встановлено що серед розглянутих матеріалів (B_4C , Hf, $\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$, $\text{Dy}_2\text{O}_3 \cdot \text{HfO}_2$) найбільш високу фізичну ефективність поглинання нейтронів при експлуатації більше 10 років має гафнат диспрозію в таблетковому варіанті.

У шостому розділі показано практичне застосування результатів досліджень на прикладі виготовлення дослідних партій порошків титанату диспрозію та ПЕЛ реактора ВВЕР-1000.

У висновках наведено основні результати дисертаційної роботи при розв'язанні поставлених завдань.

За результатами дослідження отримано наступні наукові результати:

1. Вперше встановлені наукові основи та вдосконалені параметри економічного синтезу однофазних титанату диспрозію з густиною 7,1...7,3 г/см³ та гафнату диспрозію з густиною 8,0...8,6 г/см³ у вигляді таблеток методами спікання та гарячого пресування.

2. Вперше встановлено вплив розміру часток оксидів титану та гафнію на кінетику та повноту синтезу титанату диспрозію та гафнату диспрозію, їх структурно-фазовий стан та густину таблеток. Показано, що використання нанопорошку TiO_2 та HfO_2 сприяє підвищенню густини таблеток титанату диспрозію та гафнату диспрозію та досягненню однофазного стану.

3. Вперше отримані дані про залежність корозійної стійкості таблеток титанату диспрозію і гафнату диспрозію в модельному середовищі теплоносія реактора ВВЕР-1000 від їх густини. Встановлено, що показником збільшення маси таблеток є гідратація матеріалу. Показано, що таблетки титанату диспрозію з густиною 7,1...7,3 г/см³, та гафнату диспрозію з густиною 8,2...8,3 г/см³ характеризуються найбільшою корозійною стійкістю.

4. *Вперше* досліджено вплив гранулометричних складів порошків титанату диспрозію і гафнату диспрозію з розміром крупної фракції від 0,9 до 0,1 мм і дрібної фракції $< 0,1$ мм на щільність засипок в оболонках ПЕЛ. Встановлено що найбільша щільність засипки забезпечуються при вмісті дрібної фракції в діапазоні (20...40) %.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Результати досліджень впливу середовища, температурних і часових параметрів на синтез складноокисневих сполук – титанату диспрозію та гафнату диспрозію дозволили отримати нейтронопоглинаючі матеріали з заданим структурно-фазовими характеристиками стосовно до конкретних параметрів роботи цих матеріалів в активній зоні реактора ВВЕР-1000.

2. Результати досліджень матеріалів в порошковій і таблеткових формах дозволять створювати технології виготовлення матеріалів з регульованими характеристиками структурно-фазового стану, густини і пористості для ПЕЛ будь-якого типу реакторів.

3. Результати комплексних позареакторних випробувань показали високу надійність і працездатність матеріалів в умовах роботи в реакторі ВВЕР-1000.

4. Результати застосовані при впровадженні у виробництво порошків титанату диспрозію і поглинаючих стрижнів системи управління і захисту реактору ВВЕР-1000. Виготовлено дослідні партії поглинаючих стрижнів системи управління і захисту і поставлено в опитно-промислову експлуатацію в реактора ВВЕР-1000 Рівненської АЕС.

Ключові слова: нейтронопоглинаючий матеріал, порошки, таблетки, вакуумне спікання, гаряче пресування, рентгенівська дифрактометрія, скануюча електронна мікроскопія, корозійна стійкість, структурно-фазовий стан, фазове перетворення, мікроструктура, нанопорошок, композиційний склад, легування, домішки.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Наукові праці у наукових фахових виданнях України та у наукових виданнях, проіндексованих у базах Scopus і Web of Science:

1. Красноручський В.С., Белаш М.М., Чернов І.О., Валежний Є.Б., Саєнко С.Ю., Белкін Ф.В., Сурков О.Є., Пилипенко О.В., Богатиренко С.І. Дослідження впливу способів виготовлення і легування на властивості таблеток гафнату диспрозію. *Питання атомної науки і техніки*. 2012. №5 (81). С. 62–68. (Scopus, Україна, А).
2. Красноручський В.С., Саєнко С.Ю., Белаш М.М., Сурков О.Є., Чернов І.О., Матющенко Р.В., Рибальченко Н.Д., Белкін Ф.В. Одержання таблеток поглинаючих матеріалів квазіізостатичним пресуванням у графітовому порошкові. *Питання атомної науки і техніки* 2009. №2 (60). С. 85–89. (Scopus, Україна, А).
3. Чернов І.О., Белаш М.М., Романьков В.О., Євсєєв В.М., Легенький Є.С. Дослідження впливу гранулометричних складів порошків нейтронопоглинаючих матеріалів на їх ущільнюванність в оболонках ПЕЛ. *Питання атомної науки і техніки*. 2023. №5 (147). С. 97–102. (Scopus, Україна, А).
4. Зуйок В. А., Рудь Р. О., Трет'яков М. В., Чернов І. О., Куштим Я. О., Грудницький В. В. Основні напрямки підвищення ресурсу та ефективності ПЕЛ ПС СУЗ для ядерних реакторів України. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2024. № 2(102). С. 46-57. (Scopus, Україна, А).
5. Chernov I.O., Kushtym A.V., Malykhin S.V. Synthesis of materials based on compounds of rare earth elements with titanium, hafnium and zirconium as promising neutron absorbers for nuclear reactors. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2024. № 4 (152). P. 64–78. (Scopus, Ukraine, A).
6. Чернов І. О., Зуйок В. А., Грицина В. М., Белаш М. М., Колодій І. В. Корозійна тривкість порошків і таблеток титанату диспрозію в модельному середовищі теплоносія реактора ВВЕР-1000. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2023. том 59, № 1, С. 100–103. (Україна, А).

7. Белаш Н.Н., Чернов И.А., Зуек В.А., Зигунов В.В., Березняк Е.П., Колодий И.В. Корозійна стійкість гафната диспрозію в теплоносії реактора ВВЕР-1000. *Сбірник праць: Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів. Спецвипуск журналу Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2016. №11 Львів С. 24–29. (Україна, А).

8. Чернов І.О., Белаш М.М., Колодій І.В., Валежний Є.Б., Кальченко О.С., Слабоспицька О.О. Фазоутворення і характеристики таблеток титанату диспрозію при твердо фазному синтезі. *Питання атомної науки і техніки* 2017. № 2 (108). С. 150–155. (Scopus, Україна).

9. Белаш М.М., Чернов І.О., Зігунов В.В., Зуек В.А., Пасенов Ф.А., Березняк О.П. Дослідження корозійної стійкості і механічних властивостей таблеток гафнату диспрозію. *Питання атомної науки і техніки*. 2016. №1 (101). С. 167–170. (Scopus, Україна).

10. Белаш Н.Н., Куштым А.В., Татаринев В.Р., Чернов И.А. Анализ разработок конструкций и материалов ПЭЛ ПС СУЗ повышенной работоспособности. *Ядерні та радіаційні технології*. 2007. Том 7, № 3-4. С. 18–28. (Україна).

Зарубіжні видання:

11. Krasnorutskii V.S., Saenko S.Yu., Belash N.N., Chernov I.A., Surkov A.E., N.D. Rybalchenko, F.V. Belkin. Hot pressing of dysprosium hafnate and titanate pellets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. № 50(11-12). P. 708–713. (Scopus, United States).

12. Chernov I.O., Belash M.M., Romankov V.O., Slabospytska O.O., Kolodiy I.V. and Kalchenko O.S. Effect of MoO₃ and TiO₂ powder particle sizes on the phase composition and density of dysprosium titanate pellets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2023. № 62 (3-4). P. 257–264. (Scopus, United States).

13. Chernov I.O., Zuyok V.A., Grytsyna V.M., Belash M.M., Kolodiy I.V. Corrosion Resistance of Dysprosium Titanate Powders and Pellets in the Model Environment of the WWER-1000 Coolant. *Materials Science*. 2023. № 59(1), P.98–102 (Scopus, United States).

Патенти:

14. Белаш М.М., Чернов І.О., Зігунов В.В., Ворожко В.В. Поглинаючий стрижневий елемент ядерного реактора. Патент України на винахід № 104325 від 27.01.2014 р., G21C7/00. Дата подання заявки 27.01.2012, номер заявки а201200848, дата публ. 27.01.2014.

15. Белаш М.М., Чернов І.О., Куштим А.В. Поглинаючий стрижневий елемент ядерного реактора. Патент України на винахід № 98429 від 10.05.2012 р., G01C 7/00. Дата подання заявки 22.06.2011, номер заявки а201107869, дата публ. 10.05.2012.

Опубліковані праці апробаційного характеру

16. Чернов І.О., Белаш М.М., Валежный Є.Б., Євсєєв В.М. Дослідження процесу віброущільнення порошків титанату диспрозію та карбиду бору в оболонках ПЕЛ. *Тези доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та спеціалістів «Проблеми сучасної ядерної енергетики»*. Харків. 2018. С. 15.

17. Чернов І.О., Белаш М.М., Романьков В.О., Євсєєв В.М. Дослідження впливу гранулометричних складів порошків нейтронопоглинаючих матеріалів на їх ущільнюваність в оболонках ПЕЛ. *Тези доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики»*. Нетішин. 2022. С. 21.

18. Чернов І.О., Красноручський В.С., Белаш М.М., Татарінов В.Р., Романьков В.О., Грицина В.М. Дослідження в обґрунтування розробки технології виготовлення порошку титанату диспрозію. // *Збірник тез IV Міжнародної конференції «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику»*. Київ. 2022. С. 78-79.

19. Chernov I.A., Belash M.M., Romankov V.O., Slabospitskaya O.O., Kolodiy I.V., Kalchenco A.S. Effect of MoO₃ and TiO₂ partical size on dysprosium titanate pellets phase composition and density. *Book of abstracts 7th International Samsonov Conference "Materials Science of Refractory Compounds" (MSRC-2021)*. Kyiv. 2021. P. 55.

20. Chernov I., Zuyok V., Gritsina V., Belash N., Kolodiy I. Corrosion resistance of dysprosium titanate powders and pellets in VVER-1000 coolant. *Proceedings International Young Scientists Conference of Materials Science and Surface Engineering (MSSE2021)*. Lviv. 2021. P. 95-96.
21. Chernov I., Romankov V., Malykhin S., Kolodiy I., Kalchenko A. Influence of MoO_3 and HfO_2 particle size on the phase composition and density of dysprosium hafnate pellets. *International Young Scientists Conference of Materials Science and Surface Engineering (MSSE2023 Proceedings)*. Lviv. 2023. P. 13-16.
22. Chernov I., Zuyok V., Grytsyna V., Tretyakov M., Kushtym Ya. Compatibility of dysprosium titanate powder and pellets with 42XHM alloy in water vapor environment at temperatures in range (600...1200) °C. *Abstract book XVI International Conference "Problems of Corrosion and corrosion Protection of Materials (Corrosion-2022)*. Lviv. 2022. P. 106.
23. Зуйок В.А., Рудь Р.О., Трет'яков М.В., Чернов І.О., Куштим Я.О., Грудницький В.В. Основні напрямки підвищення ефективності ПЕЛ ПС СУЗ для ядерних реакторів України. *Збірник тез V Міжнародної конференції «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику»*. Київ. 2023. С. 33-36.
24. Чернов І.О., Малихін С.В. Огляд методів синтезу сполук рідкісноземельних елементів з гафнієм та цирконієм як перспективних нейтронопоглинаючих матеріалів ядерних реакторів. *Збірник тез доповідей на XVII-й Міжнародній науково-практичній конференції магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених»*. Харків. 2023 Online, с. 475.
25. Chernov I.O., Malykhin S.V. Review of methods for synthesis, preparation of powders and pellets of materials based on rare earth elements with titanium, hafnium and zirconium as promising neutron absorbers for nuclear reactors». *Book of abstracts V. Voyevodin International Scientific and Technical Conference «Problems of Modern Nuclear Power»*. Kharkiv. 2024. P. 36.

ABSTRACT

Chernov I.O. Development of neutron absorbing complex oxide compounds based on dysprosium for VVER-1000 control rods. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy (PhD) on a specialty 105 Applied physics and nanomaterials (10 - Natural sciences). - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2024.

The dissertation is focused on solving an urgent applied research task of the Ukrainian nuclear industry, which is to develop neutron-absorbing materials: dysprosium titanate and dysprosium hafnate, to develop technological operations for their fabrication, and to justify the performance of materials under VVER-1000 reactor operation conditions.

The dissertation work was completed at the Scientific and Technical Complex "Nuclear Fuel Cycle" of the National Science Center "Kharkiv Physical and Technical Institute" and at the Department of Physics of Metals and Semiconductors of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The objective of the dissertation is to specify the parameters of technological operations for the fabrication of neutron-absorbing materials to develop a technology for the synthesis and production of dysprosium titanate and dysprosium hafnate as powder and pellets and to justify their performance in VVER-1000 reactors.

The *Introduction* describes the relevance and importance of the research topic, defines the objective, subject and main tasks of the dissertation. The scientific novelty and practical implications of the results are highlighted..

The *first section* presents an analysis of information sources on neutron-absorbing materials applied in control rods (CR) of pressurized water reactors. It is

shown that current research and testing are focused on the development of new materials, such as dysprosium hafnate. The problem definition is formulated.

The *second section* provides a list of starting materials and experimental equipment and describes the research methods.

The *third section* presents the results of studies into the effect of compositions, particle size of TiO_2 and HfO_2 , the dopant MoO_3 , and synthesis modes on the structural and phase condition of dysprosium titanate and dysprosium hafnate. It has been observed that the application of HfO_2 nanopowder (~ 22 nm) during sintering at 1650°C results in the formation of single-phase fluorite. When applying TiO_2 nanopowder (~ 63 nm), a single-phase hexagonal structure is formed. The introduction of 2.5%wt. MoO_3 into the composition of dysprosium hafnate contributes to the formation of the fluorite structure and a decrease in the synthesis temperature from 1650°C to 1450°C . The introduction of 3%wt. MoO_3 into the composition of dysprosium titanate enhances the formation of a single-phase pyrochlore-type structure.

The *fourth section* presents the results of studies of the characteristics of dysprosium titanate and dysprosium hafnate pellets during sintering and hot pressing. A scheme for the fabrication of high-density pellets by sintering was developed, which included the operations of preliminary synthesis, powder grinding, molding, and sintering of pellets. The results of studies of the granulometric compositions of powders effect on the density of fills in CR claddings are presented.

The *fifth section* presents the results of out-of-reactor corrosion tests of dysprosium titanate and dysprosium hafnate powders and pellets, both in open form and as part of CR dummies in the VVER-1000 reactor simulated coolant with corresponding composition and parameters. It was observed that the mass of pellets increases with the increase in the autoclave exposure time, and the mass increase depends on their density (porosity). Long-term autoclave testing (up to 7200 hours) has revealed that dysprosium hafnate pellets with a density of $8.2\text{--}8.3\text{ g/cm}^3$ are characterized by the highest corrosion resistance, integrity, and stability of the structural and phase condition. It was observed that the main mechanism of pellet

corrosion is material hydration. There was no evidence of changes in the physical condition and phase composition of the powders tested as part of CR dummies with artificial defects throughout 5000 hours. No interaction between dysprosium hafnate and dysprosium titanate pellets with a cladding (42CrNiMo alloy) was detected when overheated in water steam in the range 800...1200 °C. It was shown that among the materials considered (B_4C , $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$, $Dy_2O_3 \cdot HfO_2$), dysprosium hafnate as pellet-type absorber exhibits the highest efficiency under operation more 10 years.

The sixth section shows the practical application of the research results on the example of fabrication of pilot batches of dysprosium titanate powders and VVER-1000 CRs.

The conclusions summarize the main results of the dissertation in solving the tasks set.

The following scientific results were obtained as a result of the study:

1. *For the first time*, the scientific basis and detailed parameters for the economical synthesis of single-phase dysprosium titanate with density 7.1...7.3 g/cm³ and dysprosium hafnate with density 8.0...8.6 g/cm³ have been established in the form of pellets by sintering and hot pressing methods.

2. *For the first time*, it was established the effect of the nanostructural of the oxides of titanium and hafnium into the kinetics and completeness of the synthesis dysprosium titanate and dysprosium hafnate, their structural-phase state and the density of the pellets. It has been shown that the addition of TiO_2 and HfO_2 nanopowder increases the density of dysprosium titanate and dysprosium hafnate pellets and reaches a single-phase state.

3. *For the first time*, the effect of the density of dysprosium titanate and dysprosium hafnate pellets on their corrosion resistance in the simulated VVER-1000 reactor coolant was studied. It was observed that the indicator of increasing the mass of the pellets is the hydration of the material. It is demonstrated that dysprosium titanate pellets with a density of 7.1...7.3 g/cm³ and dysprosium hafnate

pellets with a density of 8.2...8.3 g/cm³ are characterized by the highest corrosion resistance.

4. *For the first time* The effect of the particle size distribution of dysprosium titanate and dysprosium hafnate powders with a coarse fraction from 0.9 to 0.1 mm and a fine fraction less than 0.1 mm on the density of fills in CR claddings was studied. It has been observed that the highest bulk density and filling density are achieved at the content of the fine fraction in the range of 20...40%.

Practical significance of the results:

1. The results of studies into the effect of the medium and the temperature-time parameters on the synthesis of dysprosium titanate and dysprosium hafnate enabled the fabrication of neutron-absorbing materials with specified structural and phase characteristics with respect to specific performance parameters of these materials in the VVER-1000 reactor core.

2. The developed technological operations for the fabrication of powder materials and pellets enabled the development of a technology for the fabrication of materials for control rods of any reactor type.

3. The results of comprehensive out-of-reactor tests revealed high reliability of the materials' performance under VVER-1000 reactor conditions.

4. The results of the research were applied to the development of the technology for fabrication of rods for the VVER-1000 control and protection system. Technological operations for the fabrication of dysprosium titanate and control rods have been introduced in production. The pilot batches of the control and protection system absorbing rods were fabricated and introduced into pilot operation in the VVER-1000 reactor of Rivne NPP.

Keywords: neutron absorbing material, powders, pellets, vacuum sintering, hot pressing, X-ray diffractometry, scanning electron microscopy, corrosion resistance, structural-phase state, phase transformation, microstructure, nanopowder, composition, alloying, impurities.

List of the applicant's publications

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

Scientific papers in scientific professional editions of Ukraine and in scientific publications indexed in Scopus and Web of Science databases

1. Krasnorutsky V.S., Belash N.N., Chernov I.A., Valezhny Ye.B., Sayenko S.Yu., Belkin F.V., Surkov A.Ye., Pilipenko A.V., Bogatyrenko S.I.. Research into effects of manufacturing and alloying methods on dysprosium hafnate pellet properties. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2012. № 5 (81). P. 62–68. (Scopus, Ukraine, A).
2. Krasnorutsky V.S., Sayenko S.Yu., Belash N.N., Surkov A.Ye., Chernov I.A., Matyushchenko R.V., Rybalchenko N.D., Belkin F.V. Production of absorber material pellets by quasi-isostatic pressing in graphite powder. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2009. №2 (93). P. 85–89. (Scopus, Ukraine, A).
3. Chernov I.O., Belash M.M., Romankov V.O., Yevseyev V.M., Legenkyi Y. S. Research into the effect of particle size distribution of neutron-absorbing powder materials on the compaction in absorbing rod claddings. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2023. № 5 (147). P. 97–102. (Scopus, Ukraine, A).
4. Zuyok V., Rud R., Tretyakov M., Chernov I., Kushtym Ya., Grudnitskii V. The Main Ways to Improve the Efficiency of the RCCA Rods for Nuclear Reactors in Ukraine. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. № 2(102). P. 46-57. (Scopus, Ukraine, A).
5. Chernov I.O., Kushtym A.V., Malykhin S.V. Synthesis of materials based on compounds of rare earth elements with titanium, hafnium and zirconium as promising neutron absorbers for nuclear reactors. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2024. № 4 (152). P. 64–78. (Scopus, Ukraine, A).
6. Chernov I. O., Zuyok V. A., Grytsyna V. M., Belash M. M., Kolodiy I. V. Corrosion resistance of dysprosium titanate powders and tablets in the model

environment of the coolant of the WWER-1000. *Physicochemical mechanics of materials*. 2023. V. 59. № 1. P. 100-103. (Ukraine, A).

7. Belash N.N., Chernov I.A., Zuyok V. A., Zigunov V.V., Berezhnyak Y.P., Kolodiy I.V. Corrosion resistance of dysprosium hafnate in VVER-1000 reactor coolant. *Problems of corrosion and anticorrosion protection of materials. Physicochemical mechanics of materials*. 2016. №11. C. 24-29. (Ukraine, A).

8. Chernov I.O., Belash M.M., Kolodiy I.V., Valezhnyi Ye. B., Kalchenko O.S., Slabospitska O.O. Phase formation and characteristics of dysprosium titanate pellets prepared by solid state synthesis. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. № 2 (108). P. 150 – 155. (Scopus, Ukraine).

9. Belash N.N., Chernov I.A., Zigunov V.V., Zuyok V.A., Pasyonov F.A., Berezhnyak Y.P. Investigation of corrosion resistance and mechanical properties of dysprosium hafnate pellets. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2016. № 1 (101), P. 167–170. (Scopus, Ukraine).

10. Belash N.N., Kushtym A.V., Tatarinov V.R., Chernov I.A. Analysis of the development of constructions and materials of the absorber elements RCCA with increased performance. *Nuclear and radiation technologies*. 2007. Vol. 7, № 3-4. P. 18-28. (Ukraine).

11. Krasnorutskii V.S., Saenko S.Yu., Belash N.N., Chernov I.A., Surkov A.E., N.D. Rybalchenko, F.V. Belkin. Hot pressing of dysprosium hafnate and titanate pellets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012. № 50(11-12). P. 708–713. (Scopus, United States).

12. Chernov I.O., Belash M.M., Romankov V.O., Slabospitska O.O., Kolodiy I.V. and Kalchenko O.S. Effect of MoO_3 and TiO_2 powder particle sizes on the phase composition and density of dysprosium titanate pellets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2023. № 62 (3-4). P. 257–264. (Scopus, United States).

13. Chernov I.O., Zuyok V.A., Grytsyna V.M., Belash M.M., Kolodiy I.V. Corrosion Resistance of Dysprosium Titanate Powders and Pellets in the Model

Environment of the WWER-1000 Coolant. *Materials Science*. 2023. № 59(1), P.98–102 (Scopus, United States).

Patents:

14. Belash M.M., Chernov I.O., Zigunov V.V., Vorozhko V.V. Absorber rod of nuclear reactor *Patent of Ukraine for an invention* № 104325 dated January 27, 2014 p., IPC (2014.01) G21C7/00. - Application submitted on January 27, 2012, Application number a201200848, published on January 27. 2014.

15. Belash M.M., Chernov I.O., Kushtym A.V. Absorbing rod element of a nuclear reactor. *Patent of Ukraine for an invention* № 98429 dated May 10. 2012 p., IPC (2012.01) G01C7/00. Application submitted on June 22. 2011, Application number a201107869, published on May 10. 2012.

Scientific works testifying to the approbation of the thesis materials:

16. Chernov I.O., Belash M.M., Valezhny Ye.B., Yevseyev V.M. Investigation of the process of vibration strengthening of powders with dysprosium titanate and boron carbide in absorber elements claddings. *Problems of modern nuclear power: Abstractbook XIV International scientific and technical conference young scientists and specialists*. Kharkiv, 2018. P. 15.

17. Chernov I.O., Belash M.M., Romankov V.O., Yevseyev V.M. Investigation of the infusion of granulometric warehouses of powders of neutron-mulching materials on their strength in absorber elements claddings. *Problems of modern nuclear power: Abstractbook XVI International scientific and technical conference young scientists and specialists*. Netishin, 2022. P. 21.

18. Chernov I.O., Krasnorutskyy V.S., Belash M.M., Tatarinov V.R., Romankov V.O., Gritsina V. Research for justification of the development of technology for the production of dysprosium titanate powder. *Prospects for the promotion of innovation in nuclear energy: Abstracts of the IV International Conference*. Kyiv. 2022. P. 46-48.

19. Chernov I.A., Belash M.M., Romankov V.O., Slabospitskaya O.O., Kolodiy I.V., Kalchenco A.S. Effect of MoO₃ and TiO₂ partical size on dysprosium titanate pellets phase composition and density. *7th International Samsonov*

Conference "Materials Science of Refractory Compounds" (MSRC-2021): Book of abstracts. Kyiv, 2021. P. 55.

20. Chernov I., Zuyok V., Gritsina V., Belash N., Kolodiy I. Corrosion resistance of dysprosium titanate powders and pellets in VVER-1000 coolant. *Proceedings International Young Scientists Conference of Materials Science and Surface Engineering (MSSE2021)*: Book of abstracts. Lviv, 2021. P. 95-96.

21. Chernov I., Romankov V., Malykhin S., Kolodiy I., Kalchenko A. Influence of MoO_3 and HfO_2 particle size on the phase composition and density of dysprosium hafnate pellets. *International Young Scientists Conference of Materials Science and Surface Engineering (MSSE2023 Proceedings)*. Lviv, 2023. P. 13-16.

22. Chernov I., Zuyok V., Grytsyna V., Tretyakov M., Kushtym Ya. Compatibility of dysprosium titanate powder and pellets with 42XHM alloy in water vapor environment at temperatures in range (600...1200) °C. *Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials (Corrosion-2022)*: Abstract book XVI International Conference. Lviv, 2022. P. 106.

23. Zuyok V.A., Rud R.O., Tretyakov M.V., Chernov I.O., Kushtym Ya.O., Grudnitskiy V.V. The main directions of improving the efficiency of absorber elements RCCA for nuclear reactors in Ukraine. *Prospects for the promotion of innovation in nuclear energy*: Abstracts of the V International Conference. Kyiv, 2023. C. 33-36.

24. Chernov I.O., Malykhin S.V. A review of methods for the synthesis of semi-rare earth elements with hafnium and zirconium as promising neutron-bug materials for nuclear reactors. *Theoretical and Practical Research of Young Students*: Lecture of evidence at the XVIII International Scientific and Practical Conference of Master's and Postgraduate Students. Kharkiv. 2023, P. 475.

25. Chernov I.O., Malykhin S.V. Review of methods for synthesis, preparation of powders and pellets of materials based on rare earth elements with titanium, hafnium and zirconium as promising neutron absorbers for nuclear reactors». *Problems of Modern Nuclear Power*: Book of abstracts V. Voyevodin International Scientific and Technical Conference. Kharkiv, 2024. P. 36.