

О. Л. Улыбкін<sup>1,\*</sup>, О. В. Рыбка<sup>1</sup>, К. В. Ковтун<sup>1</sup>, В. Є. Кутній<sup>1</sup>, В. М. Воєводін<sup>1,2</sup>, О. О. Пудов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»,  
«Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій», Харків, Україна  
<sup>2</sup> Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна

\*Відповідальний автор: a.ulybkin@gmail.com

### КОМПТОН-ЕМІСІЙНИЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНІВ ІЗ ГАФНІЮ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОРЕАКТОРНОГО КОНТРОЛЮ

Обґрунтовано застосування металевого гафнію в якості емітера комптонівських внутрішньореакторних детекторів теплових і резонансних нейтронів. Розглянуто основні тенденції в розвитку атомної енергетики, що піднімають інтерес до використання гафнію. Узагальнено відомі дані про особливості функціонування як комптонівських, так і β-емісійних детекторів прямого заряду. Розглянуто механізми формування сигналу комптонівського детектора, що знаходиться в потоках реакторних нейтронів і γ-квантів. Наведено результати розрахунку ступеня вигорання атомів гафнію для умов реакторів РБМК і ВВЕР. Розглянуто дію «джерел» γ-випромінювання, що реалізують найбільший внесок у народження електронів у детекторі.

*Ключові слова:* ядерна енергетика, детектор нейтронів, гафній, миттєвий відгук, енерговиділення, контроль, радіаційний ресурс.

А. Л. Улыбкин<sup>1,\*</sup>, А. В. Рыбка<sup>1</sup>, К. В. Ковтун<sup>1</sup>, В. Е. Кутний<sup>1</sup>, В. Н. Воеводин<sup>1</sup>, А. О. Пудов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
«Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий», Харьков, Украина  
<sup>2</sup> Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

\*Ответственный автор: a.ulybkin@gmail.com

### КОМПТОН-ЭМИССИОННЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ ИЗ ГАФНИЯ ДЛЯ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО КОНТРОЛЯ

Работа посвящена обоснованию применения металлического гафния в качестве эмиттера комптоновских внутриреакторных детекторов тепловых и резонансных нейтронов. Рассмотрены основные тенденции в развитии атомной энергетики, поднимающие интерес к использованию гафния. Обобщены известные данные об особенностях функционирования как комптоновских, так и β-эмиссионных детекторов прямого заряда. Рассмотрены механизмы формирования сигнала комптоновского детектора, находящегося в потоках реакторных нейтронов и γ-квантов. В работе приведен результат расчета степени выгорания атомов гафния для условий реакторов РБМК и ВВЭР. Рассмотрено действие «источников» γ-излучения, реализующих наибольший вклад в рождение электронов в детекторе.

*Ключевые слова:* ядерная энергетика, детектор нейтронов, гафний, мгновенный отклик, энерговыделение, контроль, радиационный ресурс.

A. L. Ulybkin<sup>1,\*</sup>, A. V. Rybka<sup>1</sup>, K. V. Kovtun<sup>1</sup>, V. E. Kutny<sup>1</sup>, V. N. Voyevodin<sup>1,2</sup>, A. O. Pudov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Science Center “Kharkov Institute of Physics and Technology”,  
“Institute of Solid State Physics, Materials Science and Technologies”, Kharkiv, Ukraine  
<sup>2</sup> V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

\*Corresponding author: a.ulybkin@gmail.com

### COMPTON-EMISSIVE HAFNIUM DETECTOR OF NEUTRONS FOR IN-CORE MONITORING

The work is devoted to substantiating the use of metallic hafnium as the emitter of the Compton (prompt-response) in-core detector of thermal and resonant neutrons. The main trends in the development of nuclear power engineering, which raise the interest in the use of hafnium, are considered. The known data on the behavior of both Compton and β-emission self-powered neutron detectors (SPND) are generalized. The Compton SPND signal formation mechanism for the case of the irradiation by reactor-type fluxes of neutrons and gamma quanta is considered. The paper presents the calculation result of the hafnium burning-out degree for the conditions of WWER and RBMK reactors. The influence of the gamma radiation “sources”, which provide the largest contribution to the electrons production in the detector is considered.

*Keywords:* nuclear energy, neutron detector, hafnium, prompt response, energy yield, control, radiation resource.

## REFERENCES

1. B.A. Shilyaev et al. Compton detector of neutrons for the energy yield control in the active zone of WWER. *Problems of Atomic Science and Technologies (PAST)* 2(108) (2017) 75.
2. B.A. Shilyaev et al. Hafnium in Nuclear Power Industry: The Evolution of Increasing of the Economic Indicators and the Operation Safety of Pressurized Water Nuclear Reactors. *Problems of Atomic Science and Technologies (PAST)* 1(113) (2018) 43.
3. K.V. Kovtun et al. Hafnium - a material for the system of excess reactivity compensation in nuclear power reactors. *Problems of Atomic Science and Technology (PAST)* 2(84) (2013) 118.
4. V.D. Risovanyi et al. Parameters and Structure of the Primary Radiation Damage of Hafnium in the Core of a Nuclear Reactor. Materials of Scientific Conf. "New Materials for Innovation Development of Nuclear Power Engineering", Dmitrovgrad, Russia, March 24 - 27, 2014 (Dmitrovgrad, 2014) 18. (Rus)
5. Yu.M. Semchenkov, V.A. Mil'to, B.E. Shumskii. Incorporation of the procedure for monitoring coolant boiling in a VVER-1000 core into the in-reactor noise diagnostics system. *Atomic Energy* 105(2) (2008) 99.
6. Yu.M. Semchenkov et al. Analysis of neutron flux noise due to coolant parameter fluctuations in a VVER core. *Atomic Energy* 103(5) (2007) 845.
7. P.A. Ponomarenko, M.A. Frolova, N.N. Lenivenko. Influence of surface boiling with underheating on the state of a boiling surface. *Global Nuclear Safety* 1(18) (2016) 60. (Rus)
8. P.E. Blomberg. Reactor physics problems concerning the startup and operation of power reactors. Technical reports series No. 143 "Developments in the Physics of Nuclear Power Reactors" (Vienna, IAEA, 1973) p. 183.
9. V.I. Karnachuk. *Automatic Neutron Flux Equalization Systems in Nuclear Reactors* (Tomsk Polytechnic University, 2009) 221 p. (Rus)
10. V.I. Mitin, V.F. Shikalov, S.A. Tsimbalov. Experimental study of current formation in direct charge detectors with an emitter from rhodium. *Sov. Atomic Energy* 34 (1973) 376.
11. W.H. Todt, Sr. Characteristics of self-powered neutron detectors used in power reactors. Proc. of specialists' meeting "In-core instrumentation and core assessments", Mito-spi, Japan, 14 - 16 Oct. 1996 (Paris: Nuclear Energy Agency: Organisation for Economic Co-operation and Development, 1997) p. 181.
12. V.D. Risovanyi, E.P. Klochkov, V.B. Ponomarenko. *Hafnium in Nuclear Power Engineering* (Dimitrovgrad: NIIAR, 1993) 143 p. (Rus)
13. D. Gosset. *Absorber Materials for Generation IV Reactors. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 106. Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors.* (Ed. P. Yvon). (Elsevier, 2017) p. 533.
14. J. Giacobbe, D.N. Dunning. New Developments in the Fabrication of Hafnium Control Rods. *Nucl. Sci. Eng.* 4 (1958) 467.
15. G.W. Cunningham et al. Development of a Composite Control Rod. *Nucl. Sci. Eng.* 4 (1958) 449.
16. *Absorbent Materials for the Regulation of Nuclear Reactors.* Trans. from Eng. under ed. B.G. Arabey, V.V. Chekunov (Moskva: Atomizdat, 1965) 450 p. (Rus)
17. E.P. Klochkov, V.D. Risovanyi. Hafnium in nuclear power engineering. *Nuclear Technology Abroad* 10 (1987) 12. (Rus)
18. M.G. Mitelman, N.D. Rozenblum. *Charge Detectors of Ionizing Radiations* (Moskva: Energoatomizdat, 1982) 78 p. (Rus)
19. I.Ya. Emelyanov et al. Radiation-thermal tests of Compton emission neutron detectors with an emitter containing hafnium. *Atomic Energy* 54(3) (1983) 198.
20. Yu.I. Volodko et al. Tests of Compton neutron detectors with an emitter containing hafnium in RBMK reactors. *Atomic Energy* 62(6) (1987) 472.
21. A.Yu. Kondakov et al. Factory calibration of in-core detectors. Materials of the 16th annual scientific and technical "Conference of Young Specialists on Nuclear Power Plants". OKB "Hydropress", 26 - 27 March, 2014. (Rus)
22. I.Ya. Emelyanov, V.V. Postnikov, Yu.I. Volodko. Power distribution monitoring and control for a RBMK reactor. *Sov. Atomic Energy* 48(6) (1980) 360.
23. I.V. Shamanin, A.V. Kiselev, V.A. Luzko. Monitoring of the energy release field during the operation of a nuclear reactor using direct charge detectors. Proc. of Tomsk Polytechnic University 316(2) (2010) 67. (Rus)
24. A.S. Gerasimov, T.S. Zaritskaya, A.P. Rudyk. *Handbook on the Formation of Nuclides in Nuclear Reactors* (Moskva: Energoatomizdat, 1989) 575 p. (Rus)
25. I.N. Nigmatulin, B.I. Nishamatulin. *Nuclear Power Plants* (Moskva: Energoatomizdat, 1986) 168 p. (Rus)
26. M.G. Mitelman, R.S. Erofeev, N.D. Rozenblyum. Transformation of the energy of short-lived radioactive isotopes. *Sov. J. Atomic Energy* 10(1) (1961) 70.
27. P.S. Rao, S.C. Misra. Neutron sensitivity of vanadium self-powered neutron detectors. *Nucl. Instrum. Meth. A* 253(1) (1986) 57.
28. O. Moreira, H. Lescano. Analysis of vanadium self-powered neutron detectors signal. *Annals of Nuclear Energy* 58 (2013) 90.

29. V. Verma. Development of a Neutron Flux Monitoring System for Sodium-cooled Fast Reactors. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 1508* (Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 2017) 70 p.
30. H. Böck, J. Rantanen. Temperature and radiation tests with Pt- and Rh-self-powered neutron detectors. *Nuclear Instruments and Methods* 164(1) (1979) 205.
31. H.D. Warren, N.H. Shah. Neutron and Gamma-Ray Effects on Self-Powered In-Core Radiation Detectors. *Nucl. Science and Engineering* 54 (1974) 395.
32. K.N. Mukhin. *Experimental Nuclear Physics*. Vol. 1: *Physics of the Atomic Nucleus* (Moskva: Atomizdat, 1974) 584 p. (Rus)
33. N.N. Belash et al. Analysis of construction developments and materials of RCSS AA AE of increased working capacity. *Nuclear and Radiation Technology* 7(3-4) (2007) 18. (Rus)
34. B.A. Shilyaev et al. The sequential conversion of hafnium isotopes upon irradiation in the core of the WWER-1000 nuclear reactor. Preprint NSC KIPT. KIPT 2017-1 (Kharkov, 2017) 32 p. (Rus)
35. B.A. Shilyaev et al. Basics of a new Compton SPND development for the core of a WWER-1000 nuclear reactor. Preprint NSC KIPT. KIPT 2017-2 (Kharkov, 2017) 46 p. (Rus)
36. <http://www.ciaaw.org/isotopic-abundances.htm>

Надійшла 12.06.2018

Received 12.06.2018