Вестник НЯЦ РК

2021
ВЫПУСК 3
ISSN 1729-7516

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(87), СЕНТЯБРЬ 2021

Издается с января 2000 г.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(87) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРКҮЙЕК, 2021 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 3(87), SEPTEMBER 2021

СОДЕРЖАНИЕ

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-3-8
УДК: 519.876.5

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА VOLUME OF FLUID ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТОПЛИВА

Қабдылқақов Е.А., Сураев А.С.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: kabdylkakov@nnc.kz; suraev@nnc.kz

В работе рассмотрена возможность применения метода многофазной жидкости *Volume of Fluid* (VOF), программы Ansys Fluent, для численного моделирования процесса плавления материалов экспериментального устройства и их перемещения по объему расчетной области. Для моделирования выбрана конструкция типового экспериментального устройства, испытываемого в реакторе, разработана двухмерная расчетная модель, описаны методы решения тепловой задачи, приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: экспериментальное устройство, безопасность, расплав, метод объема жидкости, фазовый переход, вязкость.

Введение

Расчетное обоснование безопасности всех экспериментальных работ, связанных с реакторными и внереакторными экспериментами, проводится в Филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК с помощью лицензионного программного обеспечения ANSYS Fluent [1], которое предназначено для решения широкого спектра задач теплофизики, гидро-газодинамики, аэродинамики, химии и многих других [2–5].

При выполнении анализа условий безопасного проведения реакторных экспериментов возникает необходимость моделирования теплового состояния топливной секции в момент ее плавления и перемещения в объеме устройства в расплавленном состоянии. В данный момент в филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК такие задачи решаются путем поэтапного перестроения геометрии модели, когда новое положение и форма расплава топлива и конструкционных материалов задается расчетчиком самостоятельно [6–8]. Такой подход содержит в себе ряд допущений и предположений, а также требует значительных временных затрат на перестройку модели.

В работе представлен новый подход к решению задач моделирования теплового состояния экспериментальных устройств, который способствует развитию применяемых методов компьютерного моделирования и в существенной мере расширяет спектр решаемых задач.

В программе Ansys Fluent для решения подобных задач используется модель многофазной жидкости, а именно метод объема жидкости *Volume of Fluid* (VOF). Метод VOF может моделировать две или более несмешивающихся жидкости (фаз), решая один набор уравнений движения и отслеживая объемную долю каждой из них во всей расчетной области. Данный метод успешно применяется для прогнозирования разрыва струи, решения задачи перемещения больших пузырьков в жидкости, движения жидкости после прорыва плотины, а также для отслеживания границ раздела «*жидкость-газ*» [9, 10].

Если объемную долю q-ой фракции в ячейке обозначить как α_q, то в процессе моделирования возможны три состояния:

− $\alpha_q = 0$ – в расчетной ячейке q-ая фракция отсутствует;

− $\alpha_q = 1$– ячейка заполнена q-ой фракцией на 100 %;

− $0 < \alpha_q < 1$ – расчетная ячейка частично заполнена q-ой фракцией

Использующиеся в уравнениях неразрывности и движения теплофизические свойства жидкости определяются с учетом объемной доли каждой из фракций в расчетном элементе. В качестве примера приведена формула вычисления плотности материала:

$$\rho = \sum_{q=1}^{n} \alpha_q \cdot \rho_q$$

Таким образом, решая единый набор уравнений импульса, отслеживается объемная доля каждой из фаз многофазной модели по всей расчетной области [11].

В программе Ansys Fluent имеется возможность оперировать двумя типами материалов: «*fluid*» и «*solid*». Материалы типа «*solid*» используется для моделирования твердых тел, в которых уравнения скорости не решаются. Материалы типа «*fluid*» предназначены для моделирования поведения жидкостей и газов под действием внутренних и внешних сил, например, гравитации. Решение задачи плавления топлива осложняется тем, что необходимо моделировать два последовательных состояния материала – первое состояние соответствует неподвижному твердому телу до температуры плавления, второе – характеризуется изменением фазового состояния в отдельных ячейках материала, которые достигли температуры плавления и могут свободно перемещаться в пределах расчетной области.

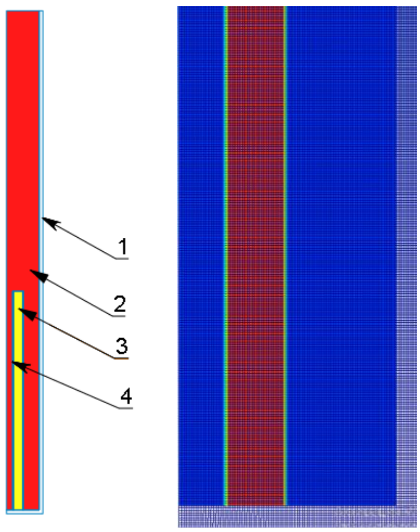
Реализация такой задачи возможна в программе Ansys Fluent при использовании модели «*solidification and melting*» [12], которая отслеживает фазовое состояние каждой ячейки материала и контролирует решение уравнений скорости и импульса для данной области.

Помимо этого, есть возможность задавать функциональные зависимости свойств материалов, таких как плотность, вязкость, теплоемкость и теплопроводность от температуры, что обеспечивает наиболее точное моделирование их поведения в различных тепловых состояниях.

Постановка задачи

Цель данной работы – исследование возможности применения программного комплекса Ansys Fluent для моделирования теплового состояния экспериментального устройства (ЭУ) в момент фазового перехода материалов.

Для достижения данной цели построена расчетная модель ЭУ. Расчетная модель типового ЭУ выполнена в двухмерной постановке и имеет осевую симметрию. Модель состоит из корпуса, топливного стержня, топливной оболочки и свинцового теплоносителя (рисунок 1). Конечно-элементная сетка ЭУ состоит из 139000 элементов. Минимальный размер расчетного конечного элемента составляет 0,2 мм.



а) б)

1 – стальной корпус, 2 – свинцовый теплоноситель,
3 – топливо из диоксида урана, 4 – стальная оболочка топлива

Рисунок 1. Расчетная двухмерная модель ЭУ:
а) геометрия расчетной области,
б) расчетная конечно-элементная сетка

Учитывая симметричность экспериментального устройства относительно вертикальной оси, расчетная область представлена одной второй частью двухмерной модели ЭУ. В таблице 1 представлены геометрические параметры ЭУ.

В качестве материала топлива задан диоксид урана, а оболочкой топлива является нержавеющая сталь ЭП-823, которая также служит материалом корпуса ЭУ. Для обеспечения неподвижности в расчетной области материалов типа «*fluid*», при температуре ниже точки фазового перехода данным материалам заданы большие значения вязкости (10^5 кг/м·с). Вязкость данных материалов имеет линейную зависимость от температуры. В таблице 2 приведены заданные зависимости вязкости материалов от температуры.

Таблица 1. Геометрические параметры ЭУ

Параметр	Значение
Высота экспериментального устройства, мм	278
Высота топливного столба, мм	121
Внутренний радиус корпуса, мм	18
Толщина корпуса, мм	2
Внутренний радиус топлива, мм	3,8
Внешний радиус топлива, мм	8,8
Толщина оболочки топлива, мм	0,6

Таблица 2. Зависимость вязкости диоксида урана и стали от температуры

Диоксид урана		Сталь ЭП-823	
Интервал температуры, К	μ, кг/м·с	Интервал температуры, К	μ, кг/м·с
300–2800	10^5	300–1650	10^5
2800–2890	10^5–50	1650–1698	10^5–50
2890–3500	50–1,06	1698–3500	50–0,3

Выбор этих температурных интервалов обусловлен тем, что необходимо обеспечить неподвижность жидкой фракции в расчетной области при температурах ниже точки фазового перехода и постепенное изменение вязкости с изменением температуры, поскольку резкое изменение вязкости приводит к потере сходимости задачи. Принятая в данной работе температура начала фазового перехода для топлива составляет 3120 К, для стали ЭП-823 – 1670 К, для свинца – 600 К.

Свойства материалов ЭУ, такие как теплоемкость и теплопроводность, были заданы для широкого диапазона температур, и заимствованы из справочной литературы [13, 14].

Начальные условия

Для моделирования плавления материала методом VOF необходимо, чтобы материал при температуре ниже точки фазового перехода был неподвижным, и после разогрева до температуры фазового перехода начал перемещаться в расчетной области. С этой целью проведены два расчета с различными начальными условиями.

В первом расчете:

− включен учет влияния сил гравитации;

− начальная температура топлива из диоксида урана равна 300 К;

− начальная температура стальной оболочки топлива равна 300 К;

− начальная температура свинцового теплоносителя равна 700 К;

− начальная температура стального корпуса ЭУ равна 300 К.

Во втором расчете:

− включен учет влияния сил гравитации;

− начальная температура топлива из диоксида урана равна 3500 K;

− начальная температура стальной оболочки топлива равна 1000 K;

− начальная температура свинцового теплоносителя равна 700 K;

− начальная температура стального корпуса ЭУ равна 300 K.

При начальной температуре 3500 K вязкость диоксида урана имеет значение 1,06 кг/м·с, которое ниже значения вязкости диоксида урана при 300 K в 10^5 раз [14].

В первом расчете ожидается, что фракция диоксида урана и стали будет оставаться неподвижной на протяжении всего времени расчета, а значение температуры теплоносителя (свинца) снизится за счет теплопередачи диоксиду урана и стали.

Во втором расчете предполагается, что фракция топлива при температуре 3500 K будет перемещаться под действием гравитации вниз, снижая собственную температуру за счет теплообмена с другими материалами. Стальная оболочка, поглощая тепло от диоксида урана, достигнет температуры плавления и тоже начнет перемещаться в объеме ЭУ под действием сил гравитации.

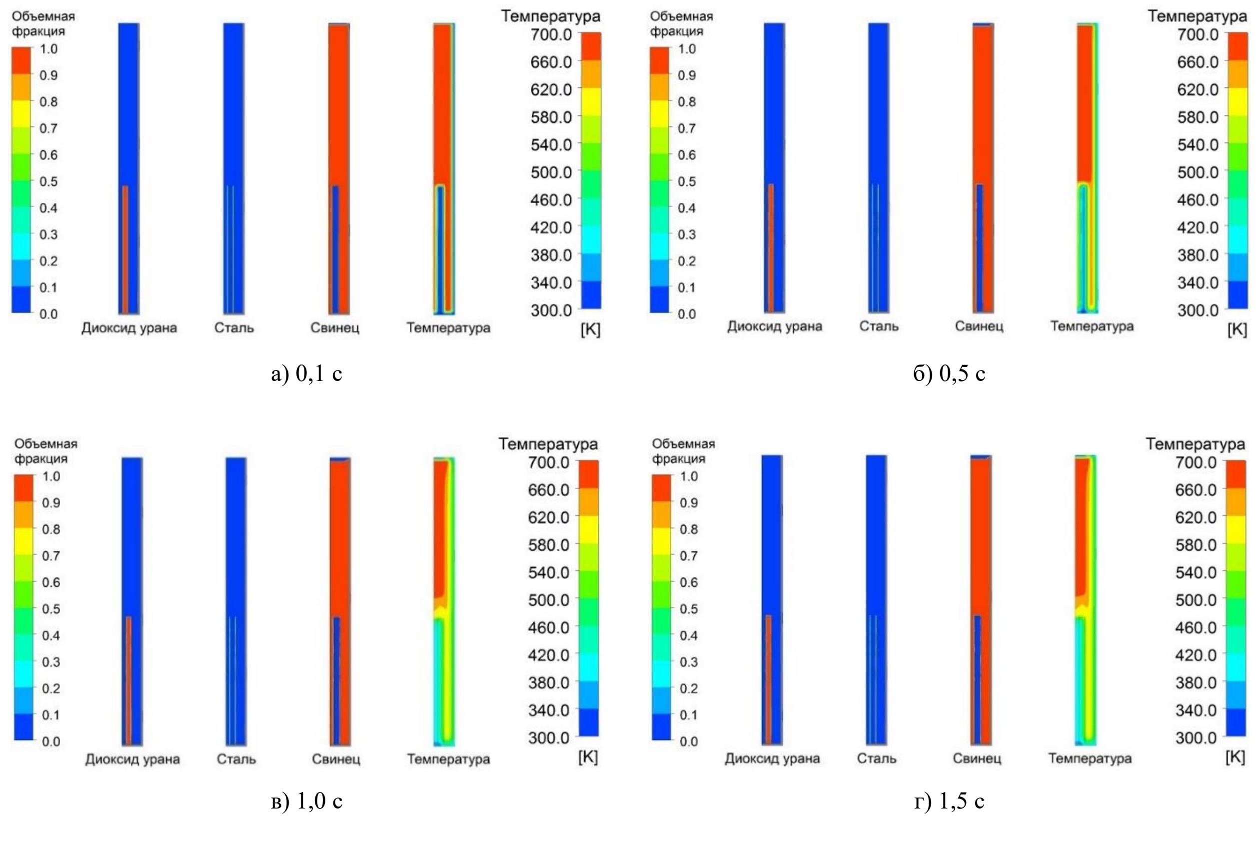
Результаты моделирования

Результаты расчета теплового состояния ЭУ при начальной температуре диоксида урана 300 K

Обработка результатов расчетов проведена с использованием программы CFD-Post. Следует заметить, что программа CFD-Post входит в программный пакет ANSYS и предназначена для обработки результатов моделирования. В данной программе имеется возможность создавать анимационное видео по результатам нестационарного решения, что позволяет визуализировать процесс взаимодействия материалов ЭУ между собой.

В ходе решения получены результаты расчета в виде распределений объемных фракций материалов для различных значений времени. Результаты первого расчета, где начальная температура диоксида урана и его стальной оболочки равны 300 K, приведены на рисунке 2.

На протяжении всего расчета наблюдается процесс теплообмена между свинцовым теплоносителем, топливом и стальной оболочкой. Температура свинца снижается вдоль стенок стальной оболочки топлива и стального корпуса ЭУ (рисунок 2, б–г). При снижении температуры свинца вдоль границы взаимодействия, вязкость свинца увеличивается, что ведет к «затвердеванию» материала.



а) 0,1 с

б) 0,5 с

в) 1,0 с

г) 1,5 с

Рисунок 2. Распределение объемной фракции материалов и температуры в ЭУ для различных значений времени при начальной температуре топлива 300 K

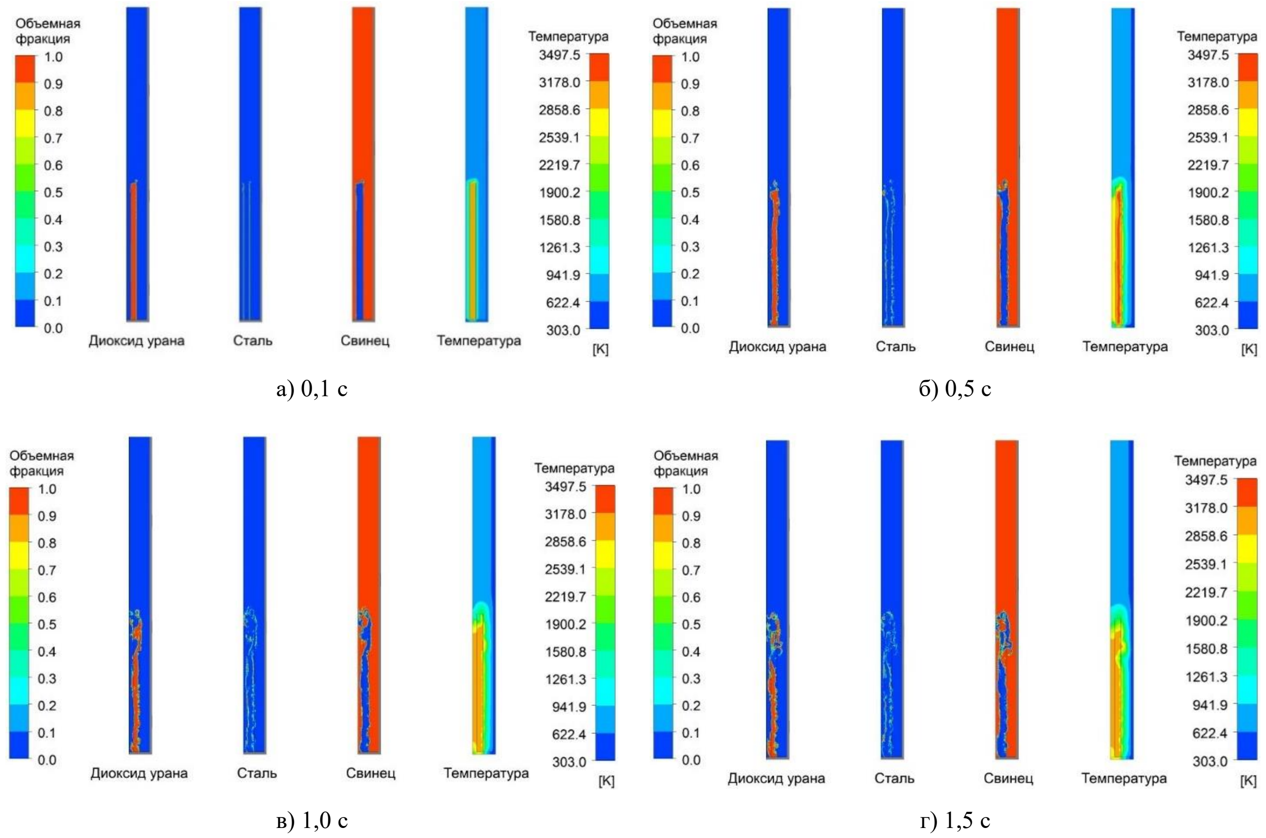


Рисунок 3. Распределение объемной фракции материалов и температуры в ЭУ для различных значений времени при начальной температуре топлива 3500 К

Стальная оболочка и топливо из диоксида урана увеличивают свою температуру, поглощая тепло от свинцового теплоносителя (рисунок 2, б–г). Вследствие чего температура данных материалов не достигает точки фазового перехода. Поэтому объемные фракции топлива и стальной оболочки остаются неподвижными, сохраняют начальную геометрическую форму и целостность на протяжении всего расчета (рисунок 2).

Результаты расчета теплового состояния ЭУ при начальной температуре диоксида урана 3500 К

На рисунке 3 представлено распределение объемных фракций материалов ЭУ при начальной температуре диоксида уранового топлива 3500 К.

Свинцовый теплоноситель с начальной температурой 700 К нагревается на протяжении всего времени расчета, поглощая тепло от топлива и стальной оболочки (рисунок 3, а–г).

Стальная оболочка топлива имеет температуру ниже точки фазового перехода. В начальный момент времени (рисунок 3, а) целостность данного материала сохраняется. В процессе теплообмена с топливом стальная оболочка разогревается (рисунок 3, б–г), снижается ее вязкость, и начинается процесс ее разрушения. Наблюдается всплытие фракции стальной оболочки в объеме свинца, поскольку плотность стала меньше.

Диоксид урана имеет низкую вязкость (таблица 2) при начально заданной температуре 3500 К, поэтому данный материал теряет свою начально заданную геометрическую форму и целостность (рисунок 3, б–г). При расчетном времени 1,5 с (рисунок 3, г) можно увидеть, что температура топлива в некоторых расчетных областях ниже точки фазового перехода, и данный материал начинает «затвердевать» из-за увеличения вязкости материала.

Выводы

В программе Ansys Fluent с использованием модели многофазной жидкости методом объема жидкости (*Volume of Fluid*) проведен численный расчет процесса плавления материалов ЭУ типовой конструкции. Расчет проведен для различных начальных значений температуры топлива и его стальной оболочки. Начальная температура свинцового теплоносителя оставалась неизменной. В результате численных расчетов установлено:

− применение метода VOF позволяет получить распределение объемных фракций материалов ЭУ для различных значений времени, по которым можно визуализировать динамическую картину перемещения материалов в расчетной области;

− с использованием метода VOF, с учетом модели плавления и кристаллизации (*solidification and melting*) и путем задания свойств материала в зависимости от температуры, было достигнуто состояние, при котором топливо и его стальная оболочка, будучи материалами типа «*fluid*», сохраняют свою геометрическую форму при температуре ниже точки фазового перехода;

− получена картина перемещения материалов ЭУ под действием сил гравитации и их затвердевания при снижении температуры.

Таким образом, использование метода VOF при моделировании теплового состояния ЭУ позволяет отказаться от многократных пошаговых перестроений геометрии модели и ее сетки, проводить расчет теплового состояния ЭУ с учетом возможных фазовых переходов, отслеживать перемещение жидких фракций и их взаимодействие с конструкционными материалами.

Данная работа выполнена в рамках научно-технической программы № BR09158470 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

Литература

1. ANSYS, Inc. Products Release 14.5.7, 2013.
2. Shoev G. V. et al. Development and testing of a numerical simulation method for thermally nonequilibrium dissociating flows in ANSYS Fluent //Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – Т. 23. – No. 2. – P. 151–163.
3. Panchal S. et al. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 122. – P. 80–90.
4. Muis A., Sutikno P. Design and simulation of very low head axial hydraulic turbine with variation of swirl velocity criterion //International Journal of Fluid Machinery and Systems. – 2014. – Т. 7. – No. 2. – P. 68–79.
5. Safiullina L., Gubaydullin I. Numerical analysis of parameter identifiability for a mathematical model of a chemical reaction //International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation. – 2020. – Т. 11. – No. 4. – P. 207–213.
6. Витюк Г. А. и др. Расчет теплогидравлических параметров испытаний топлива быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – № 3. – С. 77–85.
7. Сулейменов Н. А., Пахниц А. В., Сураев А. С. Внутриреакторный эксперимент по испытанию твэла быстрого реактора в условиях аварии с потерей теплоносителя // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – № 1. – С. 133–138.
8. Технический отчет о научно-исследовательской работе анализ условий безопасного проведения испытаний экспериментального устройства ID-6. Курчатов – 2020.
9. Issakhov A., Zhandaulet Y., Nogaeva A. Numerical simulation of dam break flow for various forms of the obstacle by VOF method //International Journal of Multiphase Flow. – 2018. – Т. 109. – P. 191–206.
10. Сураев А. С., Иркимбеков Р. А., Вурим А. Д. Моделирование взаимодействия струи расплава со стальной стенкой // Вестник НЯЦ РК. – 2020. – № 1. – С. 19–22.
11. Анализ результатов эксперимента WF. Отчет по научно-исследовательской работе // Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2006.
12. Fluent A. ANSYS fluent theory guide 15.0 //ANSYS, Canonsburg, PA. – 2013. – Т. 33.
13. Haynes W. M. CRC handbook of chemistry and physics, (Internet Version 2011) //Taylor Francis Group: Boca Raton, FL. – 2011.
14. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1968. – 121–128, 237–239, 291–294 с.

References

1. ANSYS, Inc. Products Release 14.5.7, 2013.
2. Shoev G. V. et al. Development and testing of a numerical simulation method for thermally nonequilibrium dissociating flows in ANSYS Fluent //Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – Т. 23. – No. 2. – P. 151–163.
3. Panchal S. et al. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 122. – P. 80–90.
4. Muis A., Sutikno P. Design and simulation of very low head axial hydraulic turbine with variation of swirl velocity criterion //International Journal of Fluid Machinery and Systems. – 2014. – Т. 7. – No. 2. – P. 68–79.
5. Safiullina L., Gubaydullin I. Numerical analysis of parameter identifiability for a mathematical model of a chemical reaction //International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation. – 2020. – Т. 11. – No. 4. – P. 207–213.
6. Vityuk G. A. i dr. Raschet teplogidravlicheskikh parametrov ispytaniy topliva bystrogo reaktora so svintsovo-vismutovym teplonositelem // Vestnik NYaTs RK. – 2016. – No. 3. – P. 77–85.
7. Suleymenov N. A., Pakhnits A. V., Suraev A. S. Vnutri-reaktornyy eksperiment po ispytaniyu tvela bystrogo reaktora v usloviyakh avarii s poterey teplonositelya // Vestnik NYaTs RK. – 2021. – No. 1. – P. 133–138.
8. Tekhnicheskiy otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote analiz usloviy bezopasnogo provedeniya ispytaniy eksperimental'nogo ustroystva ID-6. Kurchatov – 2020.
9. Issakhov A., Zhandaulet Y., Nogaeva A. Numerical simulation of dam break flow for various forms of the obstacle by VOF method //International Journal of Multiphase Flow. – 2018. – Т. 109. – P. 191–206.
10. Suraev A. S., Irkimbekov R. A., Vurim A. D. Modelirovanie vzaimodeystviya strui rasplava so stal'noy stenkoy // Vestnik NYaTs RK. – 2020. – No. 1. – P. 19–22.
11. Analiz rezul'tatov eksperimenta WF. Otchet po nauchno-issledovatel'skoy rabote // Filial IAE RGP NYaTs RK. – Kurchatov, 2006.
12. Fluent A. ANSYS fluent theory guide 15.0 //ANSYS, Canonsburg, PA. – 2013. – Т. 33.
13. Haynes W. M. CRC handbook of chemistry and physics, (Internet Version 2011) //Taylor Francis Group: Boca Raton, FL. – 2011.
14. Chirkin, V.S. Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki / V.S. Chirkin. – Moscow: Atomizdat, 1968. – 121–128, 237–239, 291–294 pp.

VOLUME OF FLUID ӘДІСІНІҢ ОТЫННЫҢ БАЛҚУ ЖӘНЕ БАЛҚЫМА ҚОЗҒАЛЫСЫН МОДЕЛЬДЕУ ПРОЦЕССІНДЕ ҚОЛДАНУ

Е.А. Қабдылқақов, А.С. Сураев

ҚР ҰЯО РМҚ «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада Ansys Fluent бағдарламасында *Volume of Fluid* (VOF) есептеу әдісін қолдану арқылы, материалдардың балқу және балқыманың қоғалу процессің математикалық модельдеу мүмкіндігі қарастырылады. Математикалық модельдеу үшін эксперименталдық құрылғының екі өлшемді геометрилық және сандық-есептеулік моделі жасалды. Жылулық есептің шығару әдісі сипатталып, математикалық модельдеудің нәтижелері көрсетілген.
Түйін сөздер: *балқыма, қауіпсіздік, эксперименталыдық құрылғы, фаза аралық ауысу, тұтқұрлық.*

APPLICATION OF THE VOLUME OF FLUID METHOD TO SIMULATE THE PROCESS OF MELTING AND MOVEMENT OF FUEL

Ye.A. Kabdylkakov, A.S. Suraev

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The article considers the possibility of using the method of multiphase fluid *Volume of Fluid* (VOF), the Ansys Fluent program, for numerical simulation of the melting process of the materials of the experimental device and their movement over the volume of the computational domain. For modeling the design of a typical experimental device tested in the reactor was selected, a two-dimensional computational model was developed, methods for solving the thermal problem were described, and the simulation results were presented.
Keywords: *experimental device, safety, melt, liquid volume method, phase transition, viscosity.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-9-14
УДК 612.039

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАДМИЯ В КАЧЕСТВЕ НЕЙТРОННО-ПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭКРАНА ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ КРЕМНИЯ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

Шаймерденов А.А., Романова Н.К., Сайранбаев Д.С., Гизатулин Ш.Х.

РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

E-mail для контактов: ashaimerdenov@inp.kz

Наличие градиента нейтронного поля в ядерном реакторе и требований по допустимому разбросу удельного электрического сопротивления по объему слитка кремния делает необходимым разработку облучательного устройства. Особенно, это актуально для слитков кремния большого размера. Одним из вариантов снижения градиента потока нейтронов по высоте слитка является применение нейтронно-поглощающих экранов в конструкции облучательного устройства. На реакторе ВВР-К в качестве нейтронно-поглощающего материала экрана применяется кадмий с природным изотопным составом. В работе приведены результаты исследования облучательного устройства с кадмиевым экраном. Показано влияние экрана из кадмия на нейтронно-физические характеристики облучательного устройства для легирования кремния.

Ключевые слова: *нейтронно-трансмутационное легирование, ядерный реактор, кадмий, плотность потока нейтронов, неравномерность легирования.*

Введение

Нейтронно-трансмутационное легирование кремния на базе ядерных реакторов имеет ряд преимуществ по сравнению с другими промышленными методами легирования, но одной из главных научно-технических задач, которую нужно решить при облучении кремния в ядерном реакторе – это обеспечение объемной однородности легирования. Любому ядерному реактору характерен градиент плотности потока нейтронов, как по высоте, так и по диаметру активной зоны, что связано с утечкой нейтронов с боковых поверхностей реактора, поэтому разработка научно-обоснованных технологических способов для равномерного легирования слитков кремния является востребованной задачей. Требуемые условия облучения, как правило, формируются за счет конструкции облучательного устройства, где одним из методов снижения высотной неравномерности плотности потока нейтронов является применение нейтронно-поглощающих экранов (статичный метод), а для снижения радиальной неравномерности плотности потока нейтронов применяется вращение слитка кремния вокруг центральной оси. Вторым методом снижения высотной неравномерности плотности потока нейтронов является реверсивный метод. Суть второго метода заключается в перемещении (изменении) положения слитка кремния относительно зоны облучения [1, 2].

Формирование однородного нейтронного поля при облучении кремния является обязательным условием при его легировании. При выборе статичного метода, в качестве нейтронно-поглощающих экранов используются материалы с большим сечением поглощения тепловых нейтронов, так как трансмутация кремния протекает на тепловых нейтронах. Например, для профилирования потока тепловых нейтронов используются следующие материалы: кадмий, карбид бора, гадолиний, европий, титан и др. [2–4].

В реакторе ВВР-К для профилирования потока тепловых нейтронов по высоте облучательного устройства при нейтронно-трансмутационном легировании кремния планируется использовать кадмий [5–7]. С точки зрения физико-технических и экономических показателей, кадмий хорошо себя зарекомендовал как материал экрана. Однако применение кадмия в качестве нейтронно-поглощающего экрана имеет свои особенности, которые и рассмотрены в настоящей работе. Исследование нейтронно-физических характеристик облучательного устройства проводилось на критическом стенде. Целью настоящей работы является описание особенностей применения кадмия в качестве нейтронно-поглощающего материала при легировании кремния в ядерном реакторе, с учетом опыта, полученного на критическом стенде и реакторе ВВР-К.

Материалы и методы

В работе рассмотрено облучательное устройство, предназначенное для нейтронно-трансмутационного легирования слитков монокристаллического кремния диаметром до 6 дюймов в реакторе ВВР-К. В устройстве используется нейтронно-поглощающий экран для профилирования плотности потока нейтронов по высоте. В качестве материала экрана выбран кадмий с природным изотопным составом. Легирование кремния протекает по следующей ядерной реакции: $^{30}Si(n,\gamma)^{31}Si \rightarrow ^{31}P$. Сечение ядерной реакции радиационного захвата кремния показано на рисунке 1 [8]. Из рисунка 1 видно, что чем меньше энергия налетающего нейтрона, тем эффективнее будет протекать ядерная реакция. Однако, данная ядерная реакция имеет два больших резонанса в эпитепловой области. Первый резонанс соответствует энергии нейтронов 2235 эВ при котором сечение поглощения нейтрона составляет 506 барн. Второй резонанс соответствует энергии нейтронов 4977 эВ, при котором сечение поглощения нейтрона составляет 126,9 барн [8].

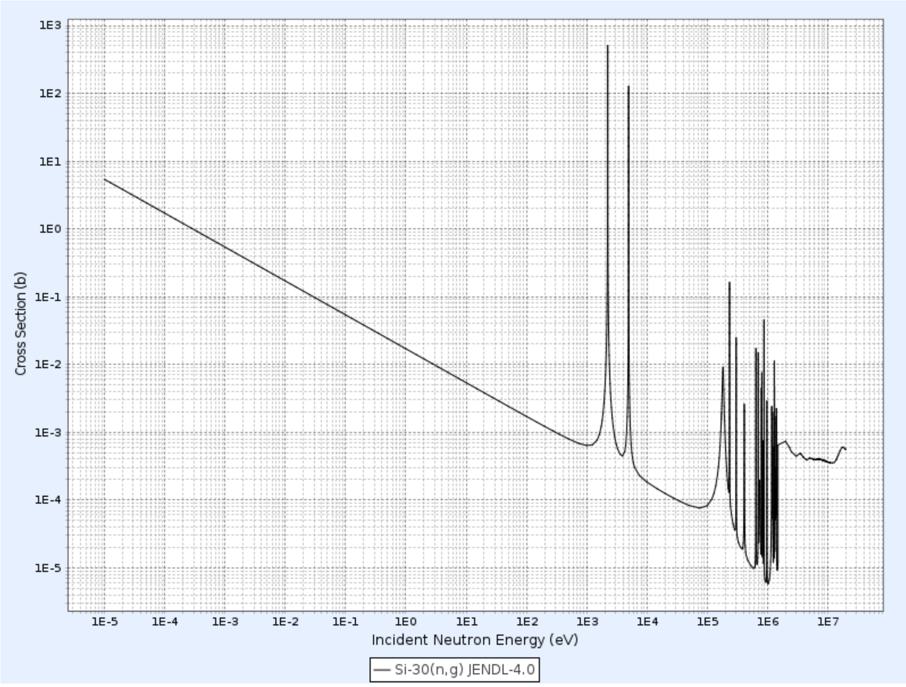


Рисунок 1. Микроскопическое сечение ^{30}Si

На внешнюю поверхность облучательного устройства устанавливаются кадмиевые кольца толщиной 0,5 мм и высотой от 3 до 5 мм. Регулирование распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте устройства достигается изменением шага расположения и ширины кадмиевых колец. Облучательное устройство изготовлено из сплава алюминия А1070. Внешний вид облучательного устройства показан на рисунке 2.

Рисунок 2. Внешний вид облучательного устройства

Исследование пространственно-энергетического распределения нейтронов в облучательном устройстве проводилось экспериментальным методом. В качестве метода экспериментального исследования нейтронного поля внутри облучательного устройства был выбран нейтронно-активационный метод как наиболее полно удовлетворяющий специфике реакторных измерений. К преимуществам данного метода можно отнести: малые размеры детекторов; пассивный метод измерений нейтронного потока, не требующий громоздкой аппаратуры; энергетическое разбиение измеряемой величины; простота и удобство в обращении; приемлемая точность измерения. Плотность потока тепловых нейтронов измерялась с помощью фольг из диспрозия. Экспериментальные исследования проводились на критическом стенде, где были смоделированы условия облучения, близкие к условиям в реакторе ВВР-К [9–11].

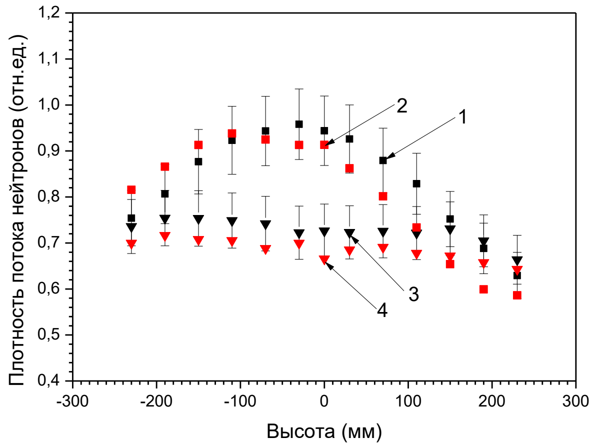
Критический стенд запущен в эксплуатацию в 1972 году и является реактором малой мощности на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и отражателем из воды или бериллия. Критическая сборка критстенда позволяет создавать и исследовать активные зоны водо-водяных реакторов различной конфигурации [12]. Так как облучение слитка кремния диаметром 6 дюймов планируется в вертикальном канале реактора ВВР-К, то на критическом стенде были созданы аналогичные условия облучения (расстояние от центра активной зоны, расположение по высоте поглощающих стержней, конфигурация активной зоны и т.д.).

Расчетные исследования выгорания кадмия проведены с применением программного средства MCU-REA, где уравнение переноса нейтронов решается методом Монте-Карло [13]. В расчетах использовалась библиотека ядерных данных DLC/MCUDAT 2.1 [14]. Метод крайне полезен при решении сложных задач, которые невозможно смоделировать программой, основанной на детерминистском методе. Для каждой частицы моделируются случайные события. Совокупность отдельных событий, носящих статистический характер, составляет полную картину происходящего процесса. Точность расчетов методом Монте-Карло зависит от точности описанной модели (геометрия и материальный состав), а также от количества смоделированных историй взаимодействия частиц с веществом. Статистическая погрешность метода Монте-Карло пропорциональна $1/\sqrt{N}$, где N – количество рассматриваемых историй.

В расчетной модели, все элементы активной зоны реактора ВВР-К были смоделированы как гетерогенная среда, за исключением ТВС, которая описана как гомогенная среда из уран-алюминий-водного материала. В расчетах учитывалось выгорание топлива, фактический материальный состав ТВС (около 200 изотопов) и отравление бериллия (наработка ядер-поглотителей). В расчетах не учитывалось влияние стержней компенсации реактивности на высотное распределение плотности потока нейтронов. При моделировании было рассмотрено более 10^9 историй взаимодействия нейтронов со средой. Статистическая погрешность расчетов не превышала 3% [15].

Результаты и обсуждение

Измерено распределение плотности потока тепловых нейтронов по высоте облучательного устройства с имитатором слитка кремния. В качестве имитатора кремния использовался чистый алюминий. Имитатор представлял собой слиток диаметром 152,4 мм и высотой 500 мм, с 5 сквозными отверстиями для размещения в них детекторов нейтронного излучения. Имитатор помещался в облучательное устройство, которое представляло собой алюминиевую трубу с заваренным дном и далее загружался в облучательный канал. Экспериментальное значение неоднородности нейтронного поля по высоте слитка (имитатора) составило 18% (см. рисунок 3), что обуславливает необходимость разработки дополнительных мер для выравнивания профиля нейтронов.



1 – экспериментальные данные, без кадмиевого экрана; 2 – расчетные данные, без кадмиевого экрана; 3 – экспериментальные данные, с кадмиевым экраном; 4 – расчетные данные, с кадмиевым экраном

Рисунок 3. Высотная неравномерность плотности потока нейтронов в облучательном устройстве

Формирование равномерного профиля плотности потока тепловых нейтронов осуществлено с применением кадмиевого экрана. Экспериментальным путем были подобраны ширина кадмиевых колец и расстояния между ними, что позволило минимизировать высотную неоднородность. Полученный профиль тепловых нейтронов в облучательном устройстве с кадмиевым экраном показан на рисунке 3. Неоднородность нейтронного поля менее 4%.

Из рисунка 3 также видно, что применение кадмиевого экрана приводит к снижению интенсивности потока тепловых нейтронов в облучательном устройстве и соответственно к увеличению времени облучения слитка кремния для достижения необходимого удельного электрического сопротивления. В нашем случае, максимальное снижение плотности потока нейтронов составило 33%.

Погрешность экспериментальных данных, приведенных на рисунке 3, не превышает 8%. Следует отметить, что согласование экспериментальных результатов с расчетными находится в пределах измеренной погрешности. Расхождение между экспериментальными и расчетными результатами, по всей видимости, связано с неточностью расчетной модели облучательного устройства и имеющейся погрешности ядерно-физических данных, используемых в расчетах.

Проведенные эксперименты и опыт применения кадмиевого экрана показал, что кадмий в процессе облучения истощается (выгорает), что вызывает серьезную озабоченность. Проведенные оценки показали, что Cd^{113} будет истощен на 2,3% в течение одного года облучения на полной мощности (6000 кВт) при облучении плотностью потока нейтронов 10^{12} см$^{-2}$с$^{-1}$ [15]. Конечно же, такая оценка является консервативной и не учитывает периоды останова реактора между облучательными кампаниями и высотную неравномерность плотности потока нейтронов. Из-за наличия высотного градиента плотности потока нейтронов, истощение кадмия по высоте неравномерно и на центральных кольцах истощение кадмия выше, чем на периферийных. Неравномерное истощение кадмия будет влиять на эффективность экрана, что повлечет за собой неравномерность легирования слитков кремния. Такой эффект возможен только при длительном использовании кадмиевого экрана в интенсивных нейтронных полях.

В работе [3] показано, что кадмий склонен к нагреванию и деформации из-за поглощения основной части потока тепловых нейтронов. Нагревание кадмия будет вносить свой вклад в температурное поле вокруг слитка кремния, поэтому после разработки конструкции облучательного устройства требуется проведение теплофизических расчетов для определения необходимости дополнительных мер по охлаждению кремния. Деформация кадмия зависит от толщины используемого кадмия, нейтронного потока, которому он подвергается, и окружающей среды, в которой он находится. В связи с этим, требуется использование дополнительных конструкционных материалов для сохранения целостности экрана.

Выводы

Кадмий широко применяется в качестве нейтронно-поглощающего экрана в конструкциях облучательных устройств при нейтронно-трансмутационном легировании кремния, но необходимо учитывать некоторые особенности его использования, такие как:

– происходит снижение интенсивности плотности потока тепловых нейтронов, что приведет к увеличению времени облучения слитка кремния;

– в процессе нейтронного облучения кадмий истощается, что будет оказывать влияние на эффективность экрана;

– склонен к нагреванию и деформации, что будет оказывать влияние на целостность конструкции, поэтому требуются проведения дополнительных теплофизических и прочностных расчетов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках программы целевого финансирования научных и научно-технических программ № BR09158958.

Литература

1. Романова Н.К., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Накипов Д.А., Чакров П.В., Кенжин Е.А. Обзор нейтронно-трансмутационного легирования кремния на исследовательских реакторах // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – № 4(72). – С. 95–101.
2. Masao Komeda, Kozo Kawasaki, Toru Obara A new irradiation method with a neutron filter for silicon neutron transmutation doping at the Japan research reactor no.3 (JRR-3) // Applied Radiation and Isotopes. – 2013. – No. 74. – P. 70–77. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.01.005
3. L. Desgranges, J. Escleine, P. Bienvenu, I. Roure, D. Gosset, et al.. A new methodology for studying neutron absorber materials first results with boron carbide // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2017. – No. 432. – P. 42–47.
4. B.A. De Luna, D.A. Haas, D.C. Barron, E.J. Artnak, Design of an in-core fission-spectrum neutron irradiation facility with pneumatic sample transfer at a research reactor // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2020. – No. 957. – P. 163292. https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163292
5. N. Romanova, Sh. Gizatulin, D. Dyussambayev, A. Shaimerdenov, M. Aitkulov and Ye. Kenzhin Calculated and experimental studies at critical facility in view of development of a technology for neutron transmutation doping of a large size silicon specimen in WWR-K reactor // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – No. 1115. – P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032052
6. Ota A., Aitkulov M., Dyussambayev D., Gizatulin Sh., Kenzhin Ye., Kanazawa H., Romanova N., Shaimerdenov A., Kawamura H. Study of the axial neutron flux distribution in the irradiation device with a cadmium-screen // Proceedings of International forum “Nuclear Science and Technologies”, 24–27 June, 2019, Almaty, Kazakhstan, p. 136.
7. А. Ота, М. Айткулов, Д. Дюсамбаев, Ш. Гизатулин, Е. Кенжин, Х. Каназава, Н. Романова, А. Шаймерденов, Х. Кавамура Исследование высотного распределения плотности потока нейтронов в облучательном устройстве с кадмиевым экраном // Вестник НЯЦ РК. – 2019. – № 4. – С. 34–37.
8. Nuclear Data Center of KAERI, 2020. http://atom.kaeri.re.kr/ (accessed 23 August 2021).
9. Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чакров П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К // Атомная энергия. – 2017. – № 123. – С. 15–20. https://doi.org/10.1007/s10512-017-0294-0
10. Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Аринкин Ф.М., Гизатулин Ш.Х., Чакров П.В., Кенжин Е.А. 50 лет исследовательскому реактору ВВР-К // Ядерная физика и инжиниринг. – 2017. – № 5. – С. 413–418.
11. A. A. Shaimerdenov, D. A. Nakipov, F. M. Arinkin, Sh. Kh. Gizatulin, P. V. Chakrov, and Ye. A. Kenzhin The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – No. 81. – P. 1408–1411. https://doi.org/10.1134/S1063778818100162
12. А. А. Шаймерденов, Ф.М. Аринкин, Ш.Х. Гизатулин, Д.С. Дюсамбаев, С.Н. Колточник, П.В. Чакров, Л.В. Чекушина, И.В. Шаманин Пуск и нейтронно-физические характеристики критического стенда РГП «Институт ядерной физики» РК с низкообогащенной активной зоной // Альтернативная энергетика и экология, № 23 (187), стр. 51–59, – Саров, Россия – 2015.
13. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU: Учебное пособие. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ; 2012. 154 с.
14. Abagyan L.P., Glushkov A.E., Yudkevich M.S. The MCU-REA program with the DLC/MCUDAT 2.1. Nuclear data library DLC/MCUDAT 2.1: report RNC “Kurchatov Institute” Moscow, Russia, 1998. – 1–24 p. – Inv. No. 36/5-98.
15. Романова Н.К., Д. С. Сайранбаев, А. Ота, Х. Кавамура, Х. Каназава Расчётные исследования выгорания экрана из кадмия при его длительном использовании для нейтронного легирования кремния // Анищик В.М., Материалы 13-й Межд. конф. ВИТТ-2019, Минск: Издательский центр БГУ, 2019, С. 548–551

References

1. Romanova N.K., Shaymerdenov A.A., Gizatulin Sh.Kh., Nakipov D.A., Chakrov P.V., Kenzhin E.A. Obzor neytronno-transmutatsionnogo legirovaniya kremniya na issledovatel'skikh reaktorakh // Vestnik NYaTs RK. – 2017. – No. 4(72). – P. 95–101.
2. Masao Komeda, Kozo Kawasaki, Toru Obara A new irradiation method with a neutron filter for silicon neutron transmutation doping at the Japan research reactor no.3 (JRR-3) // Applied Radiation and Isotopes. – 2013. – No. 74. – P. 70–77. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.01.005
3. L. Desgranges, J. Escleine, P. Bienvenu, I. Roure, D. Gosset, et al.. A new methodology for studying neutron absorber materials first results with boron carbide // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research

Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2017. – No. 432. – P. 42–47.
4. B.A. De Luna, D.A. Haas, D.C. Barron, E.J. Artnak, Design of an in-core fission-spectrum neutron irradiation facility with pneumatic sample transfer at a research reactor // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2020. – No. 957. – P. 163292. https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163292
5. N. Romanova, Sh. Gizatulin, D. Dyussambayev, A. Shaimerdenov, M. Aitkulov and Ye. Kenzhin Calculated and experimental studies at critical facility in view of development of a technology for neutron transmutation doping of a large size silicon specimen in WWR-K reactor // Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – No. 1115. – P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/3/032052
6. Ota A., Aitkulov M., Dyussambayev D., Gizatulin Sh., Kenzhin Ye., Kanazawa H., Romanova N., Shaimerdenov A., Kawamura H. Study of the axial neutron flux distribution in the irradiation device with a cadmium-screen // Proceedings of International forum “Nuclear Science and Technologies”, 24–27 June, 2019, Almaty, Kazakhstan, p. 136.
7. A. Ota, M. Aytkulov, D. Dyusambaev, Sh. Gizatulin, E. Kenzhin, Kh. Kanazava, N. Romanova, A. Shaymerdenov, Kh. Kavamura Issledovanie vysotnogo raspredeleniya plotnosti potoka neytronov v obluchatel'nom ustroystve s kadmievym ekranom // Vestnik NYaTs RK. – 2019. – No. 4. – P. 34–37.
8. Nuclear Data Center of KAERI, 2020. http://atom.kaeri.re.kr/ (accessed 23 August 2021).
9. Arinkin F.M., Shaymerdenov A.A., Gizatulin Sh.Kh., Dyusambaev D.S., Koltochnik S.N., Chakrov P.V., Chekushina L.V. Konversiya aktivnoy zony issledovatel'skogo reaktora VVR-K // Atomnaya energiya. – 2017. – No. 123. – P. 15–20. https://doi.org/10.1007/s10512-017-0294-0
10. Shaymerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Chakrov P.V., Kenzhin E.A. 50 let issledovatel'skomu reaktoru VVR-K // Yadernaya fizika i inzhiniring. – 2017. – No. 5. – P. 413–418.
11. A. A. Shaimerdenov, D. A. Nakipov, F. M. Arinkin, Sh. Kh. Gizatulin, P. V. Chakrov, and Ye. A. Kenzhin The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – No. 81. – P. 1408–1411. https://doi.org/10.1134/S1063778818100162
12. A. A. Shajmerdenov, F.M. Arinkin, Sh.H. Gizatulin, D.S. Djusambaev, S.N. Koltochnik, P.V. Chakrov, L.V. Chekushina, I.V. Shamanin Pusk i nejtronno-fizicheskie harakteristiki kriticheskogo stenda RGP “Institut jadernoj fiziki” RK s nizkoobogashhennoj aktivnoj zonoj // Al′ternativnaâ ènergetika i èkologiâ, №23 (187), pp. 51–59, – Sarov, Russia – 2015.
13. Gurevich M.I., Shkarovskij D.A. Raschet perenosa nejtronov metodom Monte-Karlo po programme MCU: Uchebnoe posobie. Moscow: National research nuclear university; 2012. 154 p.
14. Abagyan L.P., Glushkov A.E., Yudkevich M.S. The MCU-REA program with the DLC/MCUDAT 2.1. Nuclear data library DLC/MCUDAT 2.1: report RNC “Kurchatov Institute” Moscow, Russia, 1998. – 1–24 p. – Inv. No. 36/5-98.
15. Romanova N.K., D. C. Sajranbaev, A. Ota, H. Kavamura, H. Kanazava Raschjotnye issledovanija vygoranija jekrana iz kadmija pri ego dlitel'nom ispol'zovanii dlja nejtronnogo legirovanija kremnija // Anishhik V.M., Materialy 13-j Mezhdunarodnoj konferencii VITT-2019, Minsk: BSU, 2019, P. 548–551

ЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДА КРЕМНИЙДЫ ҚОСПАЛАУҒАНДА КАДМИЙДІ НЕЙТРОН СІҢІРЕТІН ЭКРАН РЕТІНДЕ ҚОЛДАНУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

А.А. Шаймерденов, Н.К. Романова, Д.С. Сайранбаев, Ш.Х. Гизатулин

РМК «Ядролық физика институты» ҚР ЭМ, Алматы, Қазақстан

Ядролық реакторда нейтрон өрісінің градиентінің болуы және кремний құймасының көлеміне меншікті электрлік қарсылықтың рұқсат етілген таралуына қойылатын талаптар сәулелендіру қондырғысын жасауды қажет етеді. Бұл әсіресе үлкен кремний құймаларына қатысты. Құйманың биіктігі бойынша нейтрон ағынының градиентін төмендету нұсқаларының бірі-сәулелендіру қондырғысының конструкциясында нейтронды сіңіретін экрандарды қолдану. ССР-Қ реакторында нейтронды сіңіретін экран материалы ретінде табиғи изотоптық құрамы бар кадмий қолданылады. Мақалада кадмий қалқаны бар сәулелендіру қондырғысының зерттеу нәтижелері берілген. Кадмий экранының кремнийлі допингке арналған сәулелендіру қондырғысының нейтронды-физикалық сипаттамаларына әсері көрсетілген.

Түйін сөздер: *нейтрондық трансмутациялық қоспалау, ядролық реактор, кадмий, нейтрон ағынының тығыздығы, әркелкілік қоспалар.*

SPECIFIC FEATURES OF APPLICATION OF CADMIUM AS A NEUTRON-ABSORBING SCREEN WHILE DOPING SILICON IN A NUCLEAR REACTOR

A.A. Shaimerdenov, N.K. Romanova, D.S. Sairanbayev, Sh.Kh. Gizatulin

RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

The gradient of the neutron field in a nuclear reactor and the requirements for the permissible spread of the specific electrical resistance over the volume of the silicon ingot makes it necessary to develop an irradiation device. This is especially true for large silicon ingots. One of the options for reducing the gradient of the neutron flux along the height of the ingot is the use of neutron-absorbing screens in the design of the irradiation device. At the WWR-K reactor, cadmium with a natural isotopic composition is used as a neutron-absorbing screen material. The paper presents the results of a study of an irradiation device with a cadmium screen. The effect of a cadmium screen on the neutron-physical characteristics of an irradiation device for silicon doping is shown.
Keywords: *doping, nuclear reactor, cadmium, neutron flux, irregularity of doping.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-15-20
УДК 581.5:539.163:581.4:631.45

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ МОРКОВИ И СВЕКЛЫ, ВЫРАЩИВАЕМОЙ В ЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЕ РОССИИ В ОРЕОЛЕ ВОСТОЧНОГО ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО СЛЕДА

[1] Парамонова Т.А., [1] Комиссарова О.Л., [2] Кузьменкова Н.В., [3] Турыкин Л.А., [1] Денисова О.Е.

[1] Факультет почвоведения, [2] Химический факультет и [3] Географический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail для контактов: tparamonova@soil.msu.ru

На территории Плавского радиоактивного пятна Тульской области России, образовавшегося вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, в 2019 г. проводили оценку радиационной безопасности выращивания корнеплодов моркови и свеклы. Установлено, что содержание ^{137}Cs в пахотных выщелоченных черноземах в 2,5–4,5 раза превышает допустимый уровень плотности поверхностного радиоактивного загрязнения почв. Однако средние величины удельной активности радионуклида в овощах не превышают 5 Бк/кг, что существенно меньше допустимого санитарно-гигиеническими нормами уровня накопления ^{137}Cs в овощах, а индивидуальная годовая эффективная доза при их поедании составляет менее 0,01% от допустимой для населения величины облучения от техногенных источников. Коэффициенты накопления ^{137}Cs в общей биомассе моркови и свеклы составляют $2{,}0\cdot10^{-2}$ и $7{,}5\cdot10^{-2}$, а в поедаемых корнеплодах – $1{,}1–2{,}0\cdot10^{-2}$, что хорошо согласуется с оценкой МАГАТЭ по интенсивности перехода ^{137}Cs в продукцию овощных корнеплодов из почв суглинистого и глинистого состава.

Ключевые слова: *Цезий-137 (^{137}Cs), радиоактивное загрязнение, чернобыльская авария, продовольственная безопасность.*

Введение

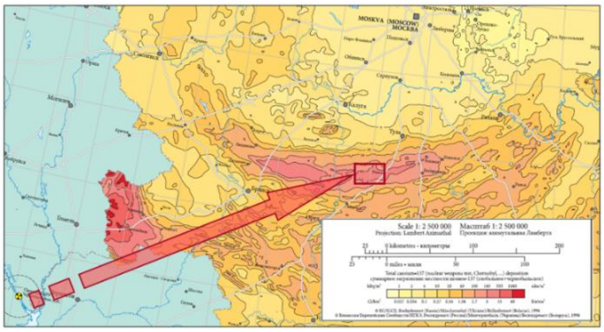
Овощи составляют важную часть рациона питания человека и рекомендуются диетологами и нутрициологами к регулярному потреблению для предотвращения таких болезней цивилизации, как ожирение, диабет 2-го типа, гипертония и т.д. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (2012), ежедневное потребление овощей и фруктов должно составлять от 400 до 800 г [1]. При этом санитарно-гигиенические требования к качеству овощной продукции зачастую более строгие, чем в отношении пищевой продукции, которая получается при переработке других продуктов растениеводства, поскольку потребление овощей зачастую происходит после минимальной предварительной и кулинарной обработки, а также в сыром виде.

В списке приоритетных загрязняющих веществ, содержание которых в овощах и фруктах необходимо контролировать, находятся и радиоактивные элементы, в частности, ^{137}Cs, который является основным дозообразующим техногенным радионуклидом, получившим глобальное рассеяние в биосфере вследствие испытаний ядерного оружия в атмосфере в 60-х гг. XX столетия, а также в результате крупных аварий на объектах ядерной энергетики. В частности, после чернобыльской аварии 1986 г. на Европейской территории России ≈2,9 млн га земель сельскохозяйственного назначения было загрязнено радиоцезием на уровне более 37 кБк/м^2, причем более 1 млн га из них – на уровне свыше 185 кБк/м^2, что в 5 и более раз превышало нормативную предельно допустимую плотность поверхностного радиоактивного загрязнения почв [2]. Реабилитация пострадавших сельскохозяйственных угодий потребовала применения организационно-технических контрмер, одной из наиболее действенных среди которых оказалось использование «безопасных» культур-дискриминаторов с низкой интенсивностью корневого потребления ^{137}Cs из почвы [3, 4]. Подбор подобных культур для выращивания на радиоактивно загрязненных пахотных почвах может снизить интенсивность перехода ^{137}Cs в биомассу растений, по разным оценкам, от 12–61% [5] до 5–50 раз [3, 6] в зависимости от филогенетических особенностей культур.

При выращивании на пост-чернобыльских землях овощных корнеплодов достаточно непросто прогнозировать величины удельной активности ^{137}Cs в продукции растениеводства. Хотя в руководстве МАГАТЭ по параметрам перехода радионуклидов в сельскохозяйственные культуры областей умеренного климата коэффициенты накопления (*КН*) радиоцезия для объединенной группы корнеплодов оценены на основе ≈80 опробований, но они широко колеблются в зависимости от типа почв и вида культуры (от $1\cdot10^{-3}$ до $8{,}8\cdot10^{-1}$), и даже для сходных по условиям биологической доступности радионуклида глинистых минеральных почвах варьируют в пределах математического порядка (от $5{,}0\cdot10^{-3}$ до $6{,}0\cdot10^{-2}$) [7]. Вместе с тем, указано, что они являются достаточно активными потребителями ^{137}Cs в ряду понижающихся величин *КН*: листовые овощи > клубневые > корнеплоды > зернобобовые > кукуруза > злаковые > многолетние пастбищные травы > нелистовые овощи. Это актуализирует проблему установления фактических значений *КН* ^{137}Cs в продукции как отдельных культур овощных корнеплодов, так и для данной производственной группы растений в целом.

Объекты и методы исследования

Оценка интенсивности перехода ^{137}Cs из почв в овощные корнеплоды (морковь и свеклу) производилась в 2019 году в ореоле Плавского радиоактивного пятна – одного из наиболее выраженных районов «восточного следа» чернобыльских выпадений в пределах черноземной зоны (Плавский район Тульской области). В 1986 году плотность поверхностного радиоактивного загрязнения почв данной территории варьировала в пределах 185–555 кБк/м^2 (рисунок 1), что в 5–15 раз превышало допустимый уровень загрязнения наземных экосистем (=37 кБк/м^2) [8]. После проведения глубокой реабилитационной вспашки почв пахотных угодий Плавского радиоактивного пятна в 1986–1987 гг. ^{137}Cs повсеместно проник в профиль до глубины 30 см и сравнительно однородно распределился в пределах данной толщи [9]. В настоящее время запасы ^{137}Cs в пахотном/старопахотном горизонте черноземов обследованных сельскохозяйственных угодий Плавского радиоактивного пятна составляют 130–220 кБк/м^2 [9], что в 3,5–6,0 раз превышает норму радиационной безопасности.



а)

б)

Рисунок 1. Местоположение объектов исследования на картосхеме радиоактивного загрязнения почв Европейской территории России после чернобыльской аварии в 1986 г. [10] (а) и опорных площадок в агроценозах корнеплодов на территории Плавского радиоактивного пятна в 2019 г. на космоснимке Yandex (б)

Продукцию моркови (*Daucus carota* L., сорт «Норвегия») и свеклы (*Beta vulgaris* L., сорт «Водан») отбирали на опорных площадках, приуроченных к центральной части Плавского радиоактивного пятна и расположенных на расстоянии ≈1 км друг от друга, на площади 250 см^2 в 3-кратной повторности. Для снижения вероятности пространственной автокорреляции точки отбора размещались в виде треугольника со стороной около 15 м на площади 25×25 м. Помимо непосредственно употребляемых в пищу корнеплодов производился также отбор несъедобных частей культур: листьев и стеблей, боковых корней размерами ≥1 мм и тонких корней размерами <1 мм. Общая масса проб овощных культур составляла 10–15 кг для обеспечения достаточности массы счетных образцов для всех фракций биомассы.

В непосредственной близости от точек укоса надземной биомассы и отбора проб подземной биомассы растений происходил отбор проб пахотных почв с фиксацией объема образца цилиндрическим металлическим пробоотборником диаметром 8 см до глубины 30 см.

После тщательной отмывки надземных и – особенно – подземных частей биомассы моркови и свеклы от мелкозема почвы их подвергали традиционной пробоподготовке к гамма-спектрометрическим анализам (сушка при температуре 75–80 °С, измельчение). Пробы почв высушивали при комнатной температуре, измельчали и просеивали через сито с диаметром ячейки 1 мм.

Величины удельной активности ^{137}Cs в сухой массе растительности и почве определяли в геометрии пробы «дента» на полупроводниковом γ-спектрометре GR 3818 с высокочистым (HPGe) детектором фирмы «Canberra» (США). Аналитическая ошибка измерений не превышала 2%.

Оценку средней индивидуальной годовой эффективной дозы для взрослого человека при поедании корнеплодов моркови и свеклы, выращенных на территории Плавского радиоактивного пятна, проводили, исходя из аналитически определенных средних значений удельной активности ^{137}Cs в корнеплодах, ориентировочных норм потребления овощей и переводного дозового коэффициента, по формуле:

$$D_{\mathrm{eff}} = A^{\mathrm{Cs\text{-}137}} \times I \times D_{\mathrm{cf}} \times 10^{-3} \qquad (1),$$

где D_{eff} – индивидуальная годовая эффективная доза (мЗв/год); $A^{\mathrm{Cs\text{-}137}}$ – средняя удельная активность ^{137}Cs в сырой массе корнеплодов (поскольку потребление овощей происходит в этой форме или после незначительной кулинарной обработки, а также именно для нее производятся оценки годового потребления); I – рекомендованная Роспотребнадзором норма рационального потребления населением моркови или свеклы или статистические данные ВОЗ по соответствующему потреблению корнеплодов в Европе (кг/год); D_{cf} – переводной дозовый коэффициент для ^{137}Cs, равный $1{,}3 \cdot 10^{-8}$ Зв/Бк, который рекомендован Международной комиссией по радиологической защите (ICRP). Домножение итогового произведения величин на 10^{-3} необходимо для перевода значения эффективной дозы, измеренной в Зв, в размерность мЗв, которая используется для нормирования допустимых уровней воздействия ионизирующего излучения на население.

Значения *КН* ^{137}Cs в общей биомассе моркови и свеклы и в их корнеплодах рассчитывали по формуле:

$$КН = A^{Cs\text{-}137}\ в\ растениях\ /\ A^{Cs\text{-}137}\ в\ почве \quad (2),$$

где $A^{Cs\text{-}137}$ – средние значения удельной активности ^{137}Cs в сухой массе растений и почвы (Бк/кг), соответственно.

Результаты и обсуждение

Оценка текущих значений плотности поверхностного радиоактивного загрязнения пахотных почв Плавского радиоактивного пятна в агроценозах корнеплодов показала, что среднее содержание в них ^{137}Cs в 2,5–4,5 раза превышает нормативно допустимый уровень 37 кБк/м^2 (таблица 1).

Таблица 1. Средние величины удельной активности ^{137}Cs и плотность поверхностного радиоактивного загрязнения в пахотных почвах в агроценозах моркови и свеклы на территории Плавского радиоактивного пятна

Агроценоз	Удельная активность ^{137}Cs, Бк/кг	Плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs, кБк/м^2
морковь	420 ± 31	168 ± 22
свекла	244 ± 32	92 ± 11

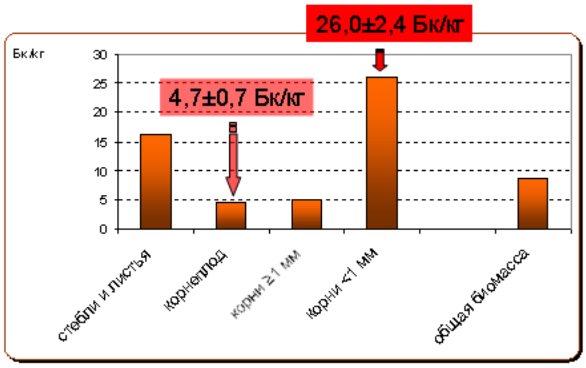
При этом, несмотря на долговременно сохраняющееся радиоактивное загрязнение пахотных почв района конденсационных чернобыльских выпадений ^{137}Cs, интенсивность его перехода в поедаемую часть моркови и свеклы относительно невысока (рисунок 2). Средние величины удельной активности радионуклида в корнеплодах не превышают 5 Бк/кг (а с учетом доверительного интервала варьирования показателя не превышают 5,4 Бк/кг для корнеплодов моркови и 6,4 Бк/кг для корнеплодов свеклы), что существенно меньше предельно допустимых санитарно-гигиеническими нормами уровней накопления ^{137}Cs в овощах, согласно требованиям российских (120 и 600 Бк/кг для сырой и сухой биомассы соответственно) [11], европейских и мировых требований ФАО/ЮНЕСКО (1 000 Бк/кг) [12–13].

Вместе с тем, в других органах корнеплодов фиксируются существенно более высокие значения величин удельной активности ^{137}Cs, убывающие в следующем ряду последовательностей:

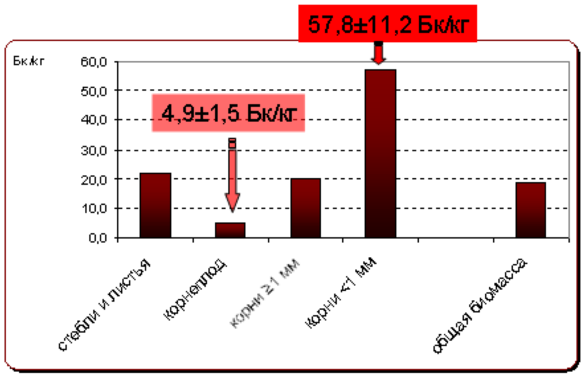
− Морковь – тонкие боковые корни (<1 мм) >> стебли и листья > боковые корни (≥1 мм) ≈ корнеплод;

− Свекла – тонкие боковые корни (<1 мм) >> стебли и листья ≈ боковые корни (≥1 мм) > корнеплод.

Таким образом, тонкие сосущие корни корнеплодов могут рассматриваться как биологический барьер на пути перехода ^{137}Cs в биомассу овощей, а величины удельной активности радионуклида в них в ≈3–5 раз больше, чем в более крупных боковых корнях, и в ≈5–11 раз больше, чем в корнеплодах. Перенос инкорпорированного в корневую массу ^{137}Cs по сосудам ксилемы в зеленые надземные части моркови и свеклы выражен также достаточно интенсивно, в этой связи листья и стебли культур являются той фракцией фитомассы, которая сосредотачивает 49% (свекла) – 82% (морковь) запасов радионуклида, перешедшего из почвы в растения.



а)



б)

Рисунок 2. Величины удельной активности ^{137}Cs во фракциях абсолютно сухой биомассы моркови (а) и свеклы (б), Бк/кг

В целом, корневое потребление ^{137}Cs свеклой несколько более выражено, чем для моркови, хотя и в том, и в другом случае культуры относятся к видам-дискриминаторам (таблица 2). Значения *КН* ^{137}Cs, которые рассчитываются как соотношение величин удельной активности элемента в растительности и в почве, в общей биомассе свеклы в ≈4, а в корнеплоде в ≈2 раза больше, чем соответствующие оценки *КН* для моркови.

Полученные значения *КН* для исследованных культур хорошо согласуются с обобщенной оценкой МАГАТЭ по интенсивности перехода ^{137}Cs в продукцию овощных корнеплодов из почв суглинистого и глинистого состава (в среднем 2,4–3,0·10^{-2}) [7], однако выше, чем величина *КН* для корнеплодов моркови, отобранных в окрестностях Семипалатинского испытательного полигона на участке «Опытное поле», которая была оценена как 6,7·10^{-3} [14].

Таблица 2. Средние величины коэффициентов накопления ^{137}Cs в продукции моркови и свеклы, выращиваемых на территории Плавского радиоактивного пятна

Культура	Фракция фитомассы	Настоящее исследование	IAEA (2010), глинистые почвы [7]
морковь	общая фитомасса	$2{,}0\cdot10^{-2}$	—
	корнеплод	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-3}$–$6\cdot10^{-2}$
свекла	общая фитомасса	$7{,}5\cdot10^{-2}$	—
	корнеплод	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-3}$–$6\cdot10^{-2}$

Тем не менее, оценивая годовую эффективную дозу облучения для взрослого человека, которая может обусловливаться поеданием ^{137}Cs-содержащей продукции моркови и свеклы, выращенных на территории Плавского радиоактивного пятна (таблица 3), можно констатировать, что, основываясь на нормах потребления корнеплодов в Европе [15], она составляет менее 0,01% от общей допустимой для населения величины облучения от техногенных источников в 1 мЗв в год [16]. Согласно рекомендациям национальной службы Роспотребнадзора, доля моркови и, особенно, свеклы в годовом рационе взрослого человека должна быть в разы выше [17]. Но и при этом индивидуальная эффективная годовая доза облучения, создаваемая ^{137}Cs при поедании этих овощей, будет составлять не более 0,1% от допустимого уровня облучения человека от техногенных источников.

Таблица 3. Оценка индивидуальной годовой эффективной дозы облучения (D_{eff}) для взрослого человека при поедании моркови и свеклы, выращенных на территории Плавского радиоактивного пятна, мЗв/год/чел

Культура	Норма потребления ВОЗ, кг/год/чел	D_{eff}	Российские рекомендации по потреблению, кг/год/чел	D_{eff}
морковь	8,0	$4{,}9\cdot10^{-4}$	17	$1{,}0\cdot10^{-3}$
свекла	0,7	$4{,}4\cdot10^{-5}$	18	$1{,}1\cdot10^{-3}$

Заключение

В начале второго периода полураспада ^{137}Cs после чернобыльской аварии плотность поверхностного радиоактивного загрязнения пахотных черноземов Плавского радиоактивного пятна в исследованных агроценозах корнеплодов в 2,5–4,5 раза превышает нормативно допустимый уровень. При этом процессы корневого потребления радионуклида корнеплодами моркови и свеклы существенно дискриминированы, что определяет низкие значения коэффициентов накопления ^{137}Cs в общей биомассе культур, а также незначительные величины удельной активности ^{137}Cs в поедаемых частях, которые полностью удовлетворяют требованиям радиационной безопасности человека по критериям предельно допустимого уровня накопления (в Бк/кг) и индивидуальной годовой эффективной дозы (в мЗв/год/чел). Таким образом, выращивание корнеплодов свеклы и моркови на территории Плавского радиоактивного пятна возможно без нарушения требований радиационно-гигиенической безопасности сельскохозяйственной продукции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90119.

Литература

1. Disaster risk management for health: radiation emergencies. [Электронный ресурс]/ WHO (World Health Organization). – Geneva, 2011. http://www.who.int/hac/events/drm_fact_sheet_radiation_emergencies.pdf (дата обращения 29.09.2021).
2. Алексахин, Р. М. Сельскохозяйственная радиоэкология: монография /Р. М. Алексахин, А. В. Васильев, В. Г. Корнеев [и др.]; под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. - М.: Экология, 1991. – 400 с.
3. Технологические приёмы, обеспечивающие повышение устойчивости агроценозов, восстановление нарушенных земель, оптимизацию ведения земледелия и получение соответствующей нормативам сельскохозяйственной продукции товаропроизводителями различной специализации: монография / под ред. Н.И. Санжаровой, А.Н. Ратникова, С.И. Спиридонова [и др.]. – Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. – 180 с. – ISBN 978-5-903386-18-5.
4. Howard, B.J The strategy project: Decision tools to aid sustainable restoration and long-term management of contaminated agricultural ecosystems / B.J. Howard, N.A. Beresford, A. Nisbet [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2005. – Vol. 83. – P. 275–295.
5. Bruk, G. Ya Dynamics of 137Cs content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident / G. Ya. Bruk, V.N. Shutov, M.I. Balonov [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. - 1998. – Vol. 76. – P. 169–178.
6. White, P.J. Selecting plants to minimise radiocaesium in the food chain / P.J. White, K. Swarup, A.J. Escobar-Gutiérrez [et al.] // Plant and Soil. – 2003. – Vol. 249. – P. 177–186.
7. Handbook Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Reports Series No. 472 [Электронный ресурс]./ IAEA (International Atomic Energy Agency), IAEA-TECDOC-472. Vienna, Austria, 2010. – 194 p. https://www.iaea.org/publications/8201/handbook-of-parameter-values-for-the-prediction-of-radionuclide-transfer-in-terrestrial-and-freshwater-environments (дата обращения 25.10.2021).
8. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. Утв. Мин-вом природных ресурсов РФ 30 ноября 1992 г.
9. Парамонова, Т.А. След Чернобыля в агроландшафтах Черноземья: независимая оценка 30 лет спустя / Т.А. Парамонова, О.Л. Комиссарова, Л.А. Турыкин [и др.] // Природа. – 2019. – № 7 (1247). – С. 40–51.
10. Атлас радиоактивного загрязнения европейской части России, Белоруссии и Украины / под ред. Ю.А. Израэля. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Роскартография, 1998. – 143 с.
11. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы Гигиенические требования безопасности и пищевой

ценности пищевых продуктов: СанПиН 2.3.2.1078-01: утв. Гл. госуд. сан. врачом РФ 6.11.2001: ввод в действие с 01.06.2002. – М., 2001. https://docs.cntd.ru/document/901806306/titles/LSES2M (дата обращения 25.10.2021).
12. Official Journal of the European Union [Электронный ресурс]/ C 188E, 28 June 2012. – Vol. 55. – ISSN 1977-091X. – 188 p. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:C:2012:188E:TOC (дата обращения 25.10.2021).
13. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed. CXS 193-1995 [Электронный ресурс] / Codex Alimentarius Commission: International food Standards. – 2006. – 66 p. http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/ sh-proxy/en/?lnk=1&url=https://workspace.fao.org/sites/codex/Standards/CXS+193-1995/CXS_193e.pdf (дата обращения 25.10.2021).
14. Kozhakhanov, T.E. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests/ T.E. Kozhakhanov., S.N. Lukashenko, N.V. Larionova // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 137. – P. 217–226.
15. Gems/food regional diets: regional per capita consumption of raw and semi-processed agricultural commodities [Электронный ресурс] / WHO (World Health Organization); prepared by the Global Environment Monitoring System/Food Contamination Monitoring and Assessment Programme (GEMS/Food). – Geneva, 2003. https://www.who.int/foodsafety/chem/gems_regional_diet.pdf (дата обращения 15.10.2021).
16. Harrison, J.D. Use of Dose Quantities in Radiological Protection. [Электронный ресурс]/ J.D. Harrison, M. Balonov, F. Bochud// International Commission on Radiological Protection. – 2021. – ICRP Publication 147, Ann. ICRP 50. https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20147 (дата обращения 21.10.2021).
17. Рекомендации по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания: Приказ Министерства здравоохранения РФ от 19 августа 2016 г. № 614. https://docs.cntd.ru/document/420374878 (дата обращения 15.10.2021).

REFERENCES

1. Disaster risk management for health: radiation emergencies. [Elektronnyy resurs]/ WHO (World Health Organization). – Geneva, 2011. http://www.who.int/hac/events/drm_fact_sheet_radiation_emergencies.pdf (data obrashcheniya 29.09.2021).
2. Aleksakhin, R. M. Sel'skokhozyaystvennaya radioekologiya: monografiya /R. M. Aleksakhin, A. V. Vasil'ev, V. G. Korneev [i dr.]; pod red. R.M. Aleksakhina, N.A. Korneeva. - M.: Ekologiya, 1991. – 400 p.
3. Tekhnologicheskie priemy, obespechivayushchie povyshenie ustoychivosti agrotsenozov, vosstanovlenie narushennykh zemel', optimizatsiyu vedeniya zemledeliya i poluchenie sootvetstvuyushchey normativam sel'skokhozyaystvennoy produktsii tovaroproizvoditelyami razlichnoy spetsializatsii: monografiya / pod red. N.I. Sanzharovoy, A.N. Ratnikova, S.I. Spiridonova [i dr.]. – Obninsk: VNIISKhRAE, 2010. – 180 p. – ISBN 978-5-903386-18-5.
4. Howard, B.J The strategy project: Decision tools to aid sustainable restoration and long-term management of contaminated agricultural ecosystems / B.J. Howard, N.A. Beresford, A. Nisbet [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2005. – Vol. 83. – P. 275–295.
5. Bruk, G. Ya Dynamics of 137Cs content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident / G. Ya. Bruk, V.N. Shutov, M.I. Balonov [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. - 1998. – Vol. 76. – P. 169–178.
6. White, P.J. Selecting plants to minimise radiocaesium in the food chain / P.J. White, K. Swarup, A.J. Escobar-Gutiérrez [et al.] // Plant and Soil. – 2003. – Vol. 249. – P. 177–186.
7. Handbook Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Reports Series No. 472 [Elektronnyy resurs]./ IAEA (International Atomic Energy Agency), IAEA-TECDOC-472. Vienna, Austria, 2010. – 194 p. https://www.iaea.org/publications/8201/handbook-of-parameter-values-for-the-prediction-of-radionuclide-transfer-in-terrestrial-and-freshwater-environments (data obrashcheniya 25.10.2021).
8. Kriterii otsenki ekologicheskoy obstanovki territoriy dlya vyyavleniya zon chrezvychaynoy ekologicheskoy situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya. Utv. Min-vom prirodnykh resursov RF 30 noyabrya 1992 g.
9. Paramonova, T.A. Sled Chernobylya v agrolandshaftakh Chernozem'ya: nezavisimaya otsenka 30 let spustya / T.A. Paramonova, O.L. Komissarova, L.A. Turykin [i dr.] // Priroda. – 2019. – No. 7 (1247). – P. 40–51.
10. Atlas radioaktivnogo zagryazneniya evropeyskoy chasti Rossii, Belorussii i Ukrainy / pod red. Yu.A. Izraelya. Moscow: IGKE Rosgidrometa i RAN, Roskartografiya, 1998. – 143 p.
11. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy) "Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoy tsennosti pishchevykh produktov: SanPiN 2.3.2.1078-01: utv. Gl. gosud. san. vrachom RF 6.11.2001: vvod v deystvie s 01.06.2002. – Moscow, 2001. https://docs.cntd.ru/document/901806306/titles/LSES2M (data obrashcheniya 25.10.2021).
12. Official Journal of the European Union [Elektronnyy resurs]/ C 188E, 28 June 2012. – Vol. 55. – ISSN 1977-091X. – 188 p. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:C:2012:188E:TOC (data obrashcheniya 25.10.2021).
13. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed. CXS 193-1995 [Elektronnyy resurs] / Codex Alimentarius Commission: International food Standards. – 2006. – 66 p. http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https://workspace.fao.org/sites/codex/Standards/CXS+193-1995/CXS_193e.pdf (data obrashcheniya 25.10.2021).
14. Kozhakhanov, T.E. Accumulation of artificial radionuclides in agricultural plants in the area used for surface nuclear tests/ T.E. Kozhakhanov., S.N. Lukashenko, N.V. Larionova // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – Vol. 137. – P. 217–226.
15. Gems/food regional diets: regional per capita consumption of raw and semi-processed agricultural commodities [Elektronnyy resurs] / WHO (World Health Organization); prepared by the Global Environment Monitoring System/ Food Contamination Monitoring and Assessment

Programme (GEMS/Food). – Geneva, 2003. https://www.who.int/foodsafety/chem/gems_regional_diet.pdf (data obrashcheniya 15.10.2021).
16. Harrison, J.D. Use of Dose Quantities in Radiological Protection. [Elektronnyy resurs]/ J.D. Harrison, M. Balonov, F. Bochud// International Commission on Radiological Protection. – 2021. – ICRP Publication 147, Ann. ICRP 50. https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20147 (data obrashcheniya 21.10.2021).
17. Rekomendatsii po ratsional'nym normam potrebleniya pishchevykh produktov, otvechayushchikh sovremennym trebovaniyam zdorovogo pitaniya: Prikaz Ministerstva zdravookhraneniya RF ot 19 avgusta 2016 g. No. 614. https://docs.cntd.ru/document/420374878 (data obrashcheniya 15.10.2021).

ШЫҒЫС ЧЕРНОБЫЛЫ ІЗІНДЕГІ РЕСЕЙДІҢ ҚАРА ЖЕР АЙМАҚЫНДА ӨСІРІЛГЕН СӘБІЗ ЖӘНЕ ҚЫЗЫЛША ӨНІМДЕРІНІҢ РАДИАЦИЯЛЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІН БАҒАЛАУ

[1] Т.А. Парамонова, [1] О.Л. Комиссарова, [2] Н.В. Кузьменкова, [3] Л.А. Турыкин, [1] О.Е. Денисова

[1] Топырақтану факультеті, [2] Химия факультеті және, [3] География факультеті Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, Мәскеу, Ресей

1986 жылы Чернобыль атом электр станциясындағы апат нәтижесінде пайда болған Ресейдің Тула облысының Плавское радиоактивті ошағы аумағында 2019 жылы өсетін сәбіз мен қызылшаның радиациялық қауіпсіздігі бағаланды. Қазіргі уақытта зерттелетін жерлердің егістік сілтісізденген қара топырақтарында ^{137}Cs мөлшері 90–170 кБк/м^2 құрайтыны анықталды, бұл топырақтың беткі радиоактивті ластануының рұқсат етілген тығыздық деңгейінен 2,5–4,5 есе жоғары. Дегенмен, сәбіз және қызылша дақылдарындағы радионуклидтің үлестік белсенділігі 5 Бк/кг аспайды, бұл көкөністерде ^{137}Cs жинақталуының ең жоғары рұқсат етілген деңгейінен айтарлықтай төмен (абсолютті құрғақ салмақ үшін 600 Бк/кг). Сәбіз мен қызылшаның жалпы биомассасында ^{137}Cs жинақталу коэффициенттері $2{,}0\cdot10^{-2}$ және $7{,}5\cdot10^{-2}$, ал жеген тамыржемістілерде – $1{,}1\cdot10^{-2}$ және $2{,}0\cdot10^{-2}$, бұл сәйкесінше жақсы. сазды және сазды топырақтан өсімдік тамырларын өндіруде ^{137}Cs өту қарқындылығы үшін МАГАТЭ бағалауымен келісім.
Түйін сөздер: *цезий-137 (^{137}Cs), радиоактивті ластану, чернобыль апаты, азық-түлік қауіпсіздігі.*

RADIATION SAFETY ASSESSMENT OF CARROT AND BEET PRODUCTS CULTIVATED IN THE BLACK EARTH ZONE OF RUSSIA IN THE OREOL OF THE EASTERN CHERNOBYL TRACE

[1] T.A. Paramonova, [1] O.L. Komissarova, [2] N.V. Kuzmenkova, [3] L.A. Turykin, [1] O.E. Denisova

[1] Faculty of Soil Science, [2] Faculty of Chemistry and [3] Faculty of Geography Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

On the territory of the Plavsky radioactive hotspot of the Tula region of Russia, formed as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in 1986, an assessment of the radiation safety of growing carrots and beets was carried out in 2019. It has been established that at present the content of ^{137}Cs in arable leached chernozems of the surveyed lands is 90–170 kBq/m^2, which is 2.5–4.5 times higher than the permissible level of density of surface radioactive contamination of soils. However, the specific activity of the radionuclide in carrot and beetroot crops does not exceed 5 Bq/kg, which is significantly less than the maximum permissible level of ^{137}Cs accumulation in vegetables (600 Bq/kg for absolutely dry weight). The accumulation coefficients of ^{137}Cs in the total biomass of carrots and beets are $2.0\cdot10^{-2}$ and $7.5\cdot10^{-2}$, and in eaten root crops – $1.1\cdot10^{-2}$ and $2.0\cdot10^{-2}$, respectively, which is in good agreement with the IAEA estimate for the intensity of the transition ^{137}Cs in the production of vegetable roots from loamy and clayey soils.
Keywords: *Cesium-137 (^{137}Cs), radioactive contamination, Chernobyl accident, food safety.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-21-28
УДК 621.039.009

KAZAKHSTAN'S NUCLEAR GOVERNANCE AS A FOREIGN POLICY ASSET

Kamen Velichkov

International Science and Technology Center (ISTC),
L.N. Gumilyov Eurasian National University

E-mail: kvelichkov@hotmail.com

Kazakhstan's nonproliferation initiatives are recognized worldwide. Kazakhstan is a party to almost all major nuclear treaties, a key driver in the creation of a Central Asian nuclear-weapon-free zone, initiated the Universal Declaration on Building a World Free of Nuclear Weapons, established a low-enriched uranium bank under the auspices of the IAEA in Ust-Kamenogorsk to be used for peaceful purposes in the event of a disruption in the supply of fuel for nuclear power plants.
While the foreign policy acts of Kazakhstan in non-proliferation are well known and internationally appreciated, the transfer of Kazakh experience in the governance of the nuclear sector is lesser known asset. For example, the experience of the Committee for Atomic and Energy Supervision and Control and KAZATOMPROM in uranium mining and transport was shared with countries from the Southern African Development Community, under an EU project, implemented by the International Science and Technology Center. This example reveals the great potential this themes have for the further input of Kazakhstan in international development cooperation.
Keywords: Kazakhstan, foreign policy, nonproliferation, international cooperation, constructivism.

INTRODUCTION

In the greater part of mainstream International Relations research, Foreign Policy Analysis (FPA) is mainly carried out based on neorealist assumptions or geopolitical explanations. Constructivism also manifests itself in the field, albeit more rarely. In the search for a possible constructivist analytical tool, Walter Carlsnaes suggested scrutinizing the *foreign policy act* as the building block of international relations. This method implies analyzing the preparatory intentional phase of the act, the identity pre-disposition of the actor, and the reaction of the structure (the international system) that reflects back onto the agency and influences it in turn [1].

In the same vein, Elisabetta Brighi and Christopher Hill argued that foreign policy decisions are best understood through the strategic-relational model [2]. This model traces the loops that connect and blur together ends and means in foreign policy. It allows us to examine Kazakhstan's foreign policy through surveying priorities and actions that mirror processes within the country. It overcomes the apparent black-and-white dilemma between interests-based and values-based policies, highlighting the in-betweens and the mixed results from foreign policy acts.

As far as the definition of national interests is concerned, Alexander Wendt, the father of constructivism, formulated a different viewpoint from that of neorealist theory. He expanded and qualified the assumption Kenneth Waltz made, that the only interest of states is survival [3]. Instead, Wendt proved that national interests include the four objective interests of survival, autonomy / independence, economic well-being, and collective self-esteem [4].

In the existing literature, constructivist approaches have been applied to the analyses of Kazakhstan's foreign policy primarily with regard to initiatives pertaining to "purely" external acts, with little attention paid to the interlink with internal or internalized norms and capacities. In terms of foreign policy promulgation, Kazakhstan's nonproliferation initiatives are well known and recognized worldwide. It suffices to mention by way of evidence the initiatives leading to the UN Universal Declaration on Building a World Free of Nuclear Weapons, or the UNGA declaration of 29 August as the International Day against Nuclear Tests.

However, when it comes to Kazakhstan's participation in scientific cooperation that can help improve international relations and ease tensions in situations of political strain, the record is less clear. In terms of development cooperation, the transfer of Kazakh experience in the governance of the nuclear sector is a lesser-known asset.

The experience of the Committee for Atomic and Energy Supervision and Control and of KAZATOMPROM in uranium mining and transport was shared with countries from the Southern African Development Community (SADC), under an EU-funded project, implemented by the International Science and Technology Center (ISTC), namely Project MC 5.01 15B *Support to Southern African States in Nuclear Safety and Security* [5]. This example reveals the considerable potential that nuclear governance has to substantiate the input of Kazakhstan in international development cooperation in general, and in the improvement of the security–development nexus within it.

Given its considerable economic and demographic potential, Kazakhstan is turning into an emerging middle size power that seeks to become a significant factor in international relations. Kazakhstan's ambitions on the international arena do not solely stem from its ideational aspirations to be a 'good' member of global society and increase its favorable image in the world, but also from an attempt to contribute to the establishment and codification of standards for international behavior. There exists a plethora of pragmatic reasons underpinning specific foreign policy decisions as well, related to the need for external investment and technological innovations. Besides, it provides an interesting perspective on the performance by Kazakhstan as an emerging donor of official development aid.

Kazakhstan constitutes a typical example of an emerging regional power. Kazakhstan's non-proliferation policy can help define the impact of this type of actors on the international system. The question is whether they tend to be drivers for change towards multipolarity or could equally be a stabilizing factor due to their preference for more normative elements in the IR anarchical environment. Moreover, the study of the Kazakhstan case proves that the natural inclination of middle-size actors in favour of enhanced regionalism does not preclude, but rather complements their evolution towards becoming pillars of international community.

Seen from this angle, it would be worthy to analyze aspects of the nuclear governance potential Kazakhstan disposes with and how it may support its regional policies and the intra-regional cooperation, in particular between Africa and Central Asia.

ACCUMULATED NORMATIVE EXPERIENCE AND EXPERTISE

In Kazakhstan the contemporary regulatory framework for atomic energy use and radiation safety came into existence in a specific historical context related to the break-up of the Soviet Union. Additional specificity arises from the characteristics of the state political system, particularly the preeminent role and function of the presidency. One observation Thomas Wright, a Brookings-based scholar, made about U.S. foreign policy may equally apply to Kazakhstan, namely that it is '*defined by the character and the opinions of its president'*, not anybody else [6].

The regulatory framework of Kazakhstan has four tiers: (1) Decrees by the President, promulgating Laws adopted by Parliament**;** (2) Decisions (Decrees) of the Council of Ministers; (3) Rules and Regulations defining radiation safety issues, prescribing permissible levels of radionuclides in the environment, etc., approved by the relevant empowered State Agencies; (4) Standards, Guidelines, and Standard Operational Procedures, adopted by industry and other actors.

The relevant pieces of legislation include: Law No. 442-V *"On the use of atomic energy"* dated 12 January 2016 [7]; Law No. 219 *"On radiation safety of the population"* dated 23 April 1998 [8]; Law No. 202-V *"On permits and notifications"* dated 16 May 2014 [9]; which replaced the Law *"On licensing"*; the *Environmental Code* of the Republic of Kazakhstan No. 212 dated 9 January 2007 [10].

The legal basis in Kazakhstan reflects and responds to national circumstances. It provides a lore of codified experience on topics related to nuclear and radiation safety and security; nuclear science, technology and applications; efficiency of the IAEA safeguards, verification and non-proliferation; and also encompasses a range of topics from licensing through export control and public awareness to training and certification of personnel employed at nuclear power facilities.

The African context differs considerably from the conditions and inherited legacies in Kazakhstan. However, many African countries seek to develop or improve regulatory frameworks and policies in their pursuit of uranium production, nuclear energy and other nuclear applications. Some Kazakh regulations of peaceful use of atomic energy provide an adequate example for benchmarks for them to follow.

For instance, in Kazakhstan the Law *"On the use of atomic energy"* defines the basic rights of authorized state bodies and officials. The Committee for Atomic and Energy Supervision and Control (CAESC), the nuclear regulator, is a department of the Ministry of Energy. In South Africa the situation is similar. In most of the Southern African countries, however, the regulator is placed under the Ministry of Health as is the case in Kenya and in Zambia, or the Ministry of Environment – as in Malawi and in Eswatini. In the Seychelles, on the other hand, the regulator is located in the Ministry of Labor and Employment, to be institutionally equally distanced from proponents and critics of atomic energy use.

CAESC provides an example of an independent and autonomous regulatory organ, regardless of its position in the specific institutional organizational chart. It also illustrates that the regulator should possess the necessary organizational, financial, material and technical resources and should have qualified personnel for the safe operation and maintenance of a nuclear installation throughout its entire life cycle.

In Kazakhstan the Law *"On radiation safety of the population"* establishes radiation safety standards, sanitary rules, hygienic standards, building codes and rules, labor protection rules, methodological, instructional, and other documents on radiation safety. In turn, the Law *"On permissions and notifications"* regulates the introduction and implementation of a permit or notification procedure for the implementation of certain types of activities. It is noteworthy that the legislative framework of the nuclear industry in Kazakhstan continues to develop dynamically. For instance, on 30 April 2020 the Senate adopted a draft bill on civil liability which domesticates the 1997 Vienna Convention, ratified by Kazakhstan, and protects potential victims of damage resulting from a nuclear incident. African countries similarly experience the dynamics of emerging nuclear governance.

Another example is the *Environmental Code*, which incorporates international experience in ensuring environmental safety and production in Kazakhstan. It pays special attention to the transboundary movement of radioactive waste and materials, to the radiation situation in settlements, to the radiation safety of building materials, mineral fertilizers, fuel, and energy raw materials. In Africa, among the SADC Member States, there is an acute need to ensure safe and secure transportation of nuclear material within and out of the region.

In addition to the level of statuary legislative acts, Kazakhstan has developed various normative and technical regulations, such as: technical regulations on nuclear and radiation safety [11], on the safety of nuclear power plants [12], and on nuclear research installations [13]; as well as sanitary standards and epidemiological requirements for ensuring radiation safety [14], and associated rules [15] and rules for radiation-hazardous objects [16]. The secondary legislation also includes: rules on the collection, storage, and disposal of radioactive waste and spent nuclear fuel [17]; on advanced training of personnel employed at nuclear power facilities [18]; on the certification of personnel [19]; and on qualification requirements for personnel employed at nuclear power facilities [20].

The above mentioned vast and expanding database of relevant documentation served as source of orientation and guidance during the implementation of the project *Support to Southern African States in Nuclear Safety and Security*. Under the supervision of a team of Kazakh experts led by Dr. Timur Zhantikin, Director of NPP, African participants prepared nine country specific reports on Eswatini, Madagascar, Malawi, Mozambique, Namibia, Tanzania, Zambia, Zimbabwe, and South Africa, respectively, thus covering more than half of the SADC Member States. In all these case studies, with the exception of the report on South Africa, the legislative framework on nuclear governance is in an emerging state, and the Kazakh experience was welcomed as a valuable model and example for various normative documents.

According to the Embassy of Kazakhstan in Pretoria, accredited to all countries south of the Sahel, the nuclear safety cooperation with African counterparts gave substance to the bilateral relations with some states, with which Kazakhstan has an otherwise insignificant trade exchange, or practically no collaboration at all. Science and technical cooperation boosted the entire complex of bilateral relations, raising the international esteem and trust towards Kazakhstan in individual countries and in the region. The episode therefore illustrates how an act of international cooperation, for which Kazakhstan has due pre-disposition, brings back a positive reaction from the system, and helps achieve part of the foreign policy objectives, at least as perceived from constructivist point of view.

DOMESTICATION OF INTERNATIONAL TREATIES AND CONVENTIONS ON NUCLEAR SAFETY AND SECURITY

In terms of the existing UN treaties relevant to nuclear safety and security, the attention of Kazakhstan was focused on the Treaty on the Non-proliferation of Nuclear Weapons (NPT), the cornerstone of the global nuclear order. Among the international commentators of NPT, Kazakhstani experts included, there is a broadly shared understanding that this order faces three possible options [21]: preservation of "*the same number of the nuclear states and nuclear weapons [in the hope] that nuclear weapons are not used by states or terrorists*"; a process whereby "*new states acquire nuclear weapons… or existing states abandon arms control and revert to Cold War postures*", or "*infused with a new collective sense of common danger and responsibility, it [the order] could transition to "zero", a world with few or no nuclear weapons*". The latter option, constructivist in nature, is the guideline for Kazakhstan. In practice the first and the second option seem to be unfolding simultaneously in recent years.

Within the NPT-specific topics, Kazakh diplomacy has developed a sensitivity towards the so-called "Article X problem", through which states could avail themselves of the right to peaceful use in order to develop secretly nuclear military applications, and then retreat from NPT with impunity (as done by the DPRK). Hence the proposal of Kazakhstan to make withdrawal from the NPT extremely difficult and costly, potentially through a special Security Council resolution that would have serious consequences for Treaty violators [22].

Kazakhstan's participation in the UN Group of Governmental Experts (GGE) on Nuclear Disarmament Verification [23] illustrates motivating aspects of the country's attitude towards the NPT implementation, and also some similarities with the approach of South Africa, standing in GGE for the African group. The Kazakh representative at GGE, Dr Erlan Batyrbekov, Director General of the National Nuclear Center, made various valuable contributions, including the proposal for involvement of the scientific community in the verification process. His supporting arguments referred to the social factors of nuclear disarmament, and the need to increase public trust in the monitoring process [24].

Kazakhstan signed and ratified practically all international conventions related to nuclear safety and security, introduced into the national legislation by the following laws: Law No. 243-IV *"On ratification of the Convention on early notification of a nuclear accident"*, dated 3 February 2010 [25]; Law No. 244-IV *"On ratification of the Convention on assistance in the event of a nuclear accident or radiological emergency"*, dated 3 February 2010 [26]; Law No. 416-IV *"On ratification of the amendment to the Convention on the physical protection of nuclear material"* (A/CPPNM), dated 19 March 2011 [27]; Law No. 245-IV *"On ratification of the Convention on nuclear safety"*, dated 3 February 2010 [28]; Law No. 405-IV *"On ratification of the Vienna Convention on civil liability for nuclear damage of 1997"*, dated 10 February 2011 [29]; Law No. 246-IV *"On ratification of the joint Convention on the safety of spent fuel management and the safety of radioactive waste management"*, dated 3 February 2010 [30]; and Law No. 92-II *"On ratification of the Convention on access to information, public participation in decision-*

making and access to justice in environmental matters" dated 23 October 2000 [31]. Out of these conventions A/CPPNM has particular importance universally, including for African states, being the only legally binding international instrument.

ACQUIRED INSTITUTIONAL FRAMEWORK

In Kazakhstan, apart from CAESC, several other government bodies have regulatory functions in the nuclear field: the Committee of Environmental Regulation and Control of the Ministry of Ecology, Geology, and Natural Resources [32]; Committee of Sanitary and Epidemiological Control of the Ministry of Healthcare; national security services of the Ministry of Internal Affairs (on security matters), Committee of Industrial Safety of the Ministry for Emergency Situations (on elimination of consequences of accidents); Industrial Development and Industrial Safety Committee and Transport Committee of the Ministry of Industry and Infrastructural Development.

Being at the heart of the regulatory system, CAESC has diverse competences in the conduct of national policies and international cooperation in the nuclear field, supervision and licensing of activities, elaboration of technical regulations, physical protection, accountancy and transport of nuclear materials, radiation sources and waste, rules for advanced training and certification of personnel, export control, etc.

Alongside with the attribution of functional competences, the Kazakh system provides good example for others to follow in the coordination and synchronization of the performance of various government agencies involved in nuclear control and supervision. The resolution of the Government No. 769 *"On the organization of state systems of accounting for and control of nuclear material and ionizing radiation sources"*, dated 22 July 2005, provides the normative framework for such coordination.

In terms of export control, Kazakhstan accepts and implements national procedures and rules that are in line with the international norms and practices. The country is a member of the Nuclear Suppliers Group (since 2002), the Zangger Committee (since 2008), as well as a candidate for accession to the Wassenaar Agreement, with strong credentials. It applies the EU List of Export Control on Dual-use Material and Technologies. To promote the latest achievements of the export control system in industrial enterprises, Kazakh Internal Control Programs are elaborated and adopted, serving also as guidelines and teaching material [33].

THE INTERMEDIARY FRAMEWORKS FOR KNOWLEDGE TRANSFER AND EXPERIENCE SHARING

Kazakhstan disposes with various mechanisms through which it can make its expertise in nuclear governance internationally known. The International Science and Technology Center (ISTC), headquartered in Nur-Sultan, is one of them. The Center has executed numerous projects, including in institution building, training, education and scientific research. Since 1995, ISTC has funded 67 projects of the National Nuclear Center worth a total of $25 million, based on project agreements and individual experts' assignments, approved by the government of Kazakhstan. Since 2016, ISTC has expanded the scope of its activities to cover African countries, and implements nuclear safety projects on the continent, making use of the available Kazakh expertise.

Kazakhstan disposes with state of the art internationally renowned technical support organization, the Nuclear Technology Safety Center (NTSC). It supports CAESC in relevant areas, such as: modelling and risk assessment, waste disposal, reactor engineering and NPP, nuclear safety and safeguarding, radioactive materials handling, internal compliance program for industry producing dual use materials and technologies. The Center cooperates with international partners in the field of nuclear and fusion energy, reactor physics and radiation material science, radioecology, new conversion and nuclear technologies, nonproliferation, including information and personnel exchange.

Under the EU-funded ISTC-implemented Project *Support to Southern African States in Nuclear Safety and Safeguards*, NTSC prepared working visit for representatives of sixteen African countries with the purpose of acquainting them with the experience of Kazakhstan in ensuring safety in the process of mining, milling and transport of uranium ores. An overview of the program provides a wide picture of the multifarious knowledge and practical experience Kazakhstan may offer to international counterparts. In Nur-Sultan the working visit comprised meetings at CAESC - on nuclear sector regulation and governance, and at the Nuclear Society of Kazakhstan – on awareness raising and demystifying of nuclear.

In Stepnogorsk, the *Kazatomprom* Joint Venture Sulfuric Acid Plant stood ready to share achievements in the "yellow cake" uranium production cycle, the underground leaching method, the safe and efficient transportation of uranium oxide, etc.

In Oskemen, the Ulba Metallurgical Plant would show its industrial safety and security system, and the unique IAEA Bank of Low Enriched Uranium, guaranteeing access to nuclear fuel for states that have renounced weapons-grade uranium enrichment.

In Taukent, the working visit would take participants to the Taukent Mining and Chemical Enterprise to witness safety measures in uranium mining.

In Almaty, they would visit various installations at the Institute of Nuclear Physics: a WWR-K research nuclear reactor, a U-150M isochronous cyclotron, a UKP-2-1 electrostatic accelerator, and an ELV-4 industrial electron accelerator. In turn, the Almaty Institute of Oncology and Radiology would demonstrate to the visitors safety and security systems at facilities using category 1 and 2 radioactive sources.

The Nuclear Society of Kazakhstan (NSK), the consolidated organizations of nuclear science and industry in Kazakhstan, was designed to enhance public awareness in the field of use of peaceful nuclear power and various nuclear applications, and it has fulfilled its mission very successfully thus far. In the context of contacts with African counterparts, during the 2017 EXPO, it hosted a visit of officials from eleven African countries that were impressed by the NSK activities geared towards the younger generations, and, in particular, by the Information Center "Energy of the Future". The objectives of the Center are very pertinent for many African countries that seek to enhance their science and technical education, improve the dissemination of basic knowledge about the nuclear industry, and ensure the transfer of knowledge and experience among communities of practitioners. Moreover, the NSK Youth section established contacts with the African Young Generation in Nuclear, a non-profit organization committed to ensuring the youth engagement and support within the nuclear industry.

As mentioned above, Kazakhstan established a low-enriched uranium bank under the auspices of the IAEA in Ust-Kamenogorsk to be used for peaceful purposes in the event of a disruption in the supply of fuel for nuclear power plants. This unique storage facility is of interest to potential buyers of nuclear fuel.

Another major facility is the Nuclear Security Training Center, under the Institute of Nuclear Physics, a first-class training facility with programs in physical protection, accounting and control, reduction of illegal traffic of nuclear materials, radiation safety and radiation control, and information security. The Center is a leading member of the IAEA International Network for Nuclear Security Training and Support.

At the Institute of Nuclear Physics in Astana, the Accelerator Complex DC-60 is also a convenient site for radiological security trainings. In 2017, it hosted the Regional Radiological Emergency Response Exercise "SUNKAR" to which several East and Central Africa (ECA) countries – Kenya, Burundi, the Democratic Republic of Congo, Ethiopia, Ghana, Malawi, Namibia, Rwanda, Tanzania, the Seychelles, Uganda and Zambia – sent observers. The exercise consisted of two parts: a hybrid Table-Top Exercise (TTX) that included simulation, on a compressed time scale, of a radiological incident with radioactive source and, going beyond a traditional TTX, Practical Demonstration of emergency response radiation measuring and identification techniques and on-site emergency response actions.

Another training site in Kazakhstan of interest to African counterparts is the Anti-Crisis Training Center in Ust-Kamenogorsk, a state-of-the-art facility equipped with shooting and automobile training systems, and transport simulators. The Center was set up under the joint Global Nuclear Security Program.

The Center for Emergency Situations and Disaster Risk Reduction (CESDRR) for Central Asia is additional institutional sediment from international cooperation in the region. The Center is a permanent intergovernmental body, an international organization established to ensure effective mechanisms to decrease the risk of emergencies, to mitigate the consequences, to organize a joint response through agreed measures of the Parties and to stimulate regional and international cooperation. African countries face similar challenge to interact in disaster risk reduction, prevention and elimination of emergency situations. They may benefit from the experience of Central Asian states to coordinate mutual efforts and strengthen preparedness for effective and timely response to emergencies, including the spread of dangerous radiation.

REGIONAL APPROACHES

Like other emerging regional powers, Kazakhstan has a natural inclination in favor of enhanced regionalism. This does not preclude, but rather complements its aspirations after an intermediary place, in-between the great powers and the small states on the international arena. Moreover, emerging regional powers show a tendency to link various adjacent regions of the world and contribute to the formation of a comprehensive international system. Some facets of Kazakhstan's non-proliferation policy acts follow such trajectory.

In Central Asia, integrational tendencies have appeared periodically on the regional arena, mainly due to external incentives and pressure. Kazakhstan worked consistently to construe the Central Asia Nuclear Weapons Free Zone (CANWFZ), thus introducing a new dimension to the regional cooperation. However, nuclear security and safety remain relatively low on the scale of shared priorities. Multilateral regional projects in that field are mostly proposed and funded by external actors. An example in that regard is the EU-sponsored Strategic Master Plan for Environmental Remediation of Uranium Legacy Sites in Central Asia.

In a sense, Kazakhstan uses the regional platform as a springboard to increase its involvement in the United Nations, as illustrated by its non-permanent membership in the UN Security Council in 2017–2018. The country ran for the Security Council seat as the first ever candidate from Central Asia, building on its positive record in disarmament and non-proliferation and opposition to arms race. The latter achievements can hardly be attributed to Central Asia as a whole. They belong to Kazakhstan itself.

Throughout Kazakhstan's campaign at the United Nations, nuclear security was a major topic among the four central pillars on which the bid was based. The main priorities of Kazakhstan's membership in the Security Council were laid down in special policy address to the Security Council, entitled "*Concept and vision for sustaining global partnerships for a secure, just and prosperous world*" [34]. Kazakhstan's prime goal was to help ensure humankind's survival through a world free of nuclear weapons. Kazakhstan called on all Member States, especially the Security Council's permanent members, to set a goal of ridding the world of nuclear weapons by the one hundredth anniversary of the United Nations in 2045.

Nealy all elected members at the Security Council, Kazakhstan included, feel they should mark their presidencies of the Council with thematic debates to fulfil campaign commitments and to provide platforms for their leaders. In January 2018, Kazakhstan opted for the theme of "*Non-proliferation of weapons of mass destruction: confidence-building measures*", two topics that form the core of the country's legacy and interests. Conflict management and resolution also came under scrutiny indirectly, in the sense that these processes urgently need confidence and trust as a pre-requisite for success.

Meanwhile, Kazakhstan participated actively in the elaboration and adoption of the Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons, which became the first legally binding document in the history of nuclear disarmament and signed it on 2 March 2018, the day of the anniversary of its accession to the United Nations.

In terms of regional non-proliferation policy, following the entry into force of CANFWZ on 21 March 2009, Kazakhstan needs to create a permanent mechanism to the Treaty of Semipalatinsk in the form of a Regional Consultative Process (RCP). The Semipalatinsk RCP is to be understood as one of the methods of governance in the field of nuclear disarmament and non-proliferation on a regional scale. A future Secretariat of the Semipalatinsk RCP will boost the capacity of CANWFZ to interact with other nuclear weapons free zones, Africa included, where the African Commission on Nuclear Energy performs similar functions.

GLOBAL AND INTER–REGIONAL DIMENSIONS

The overall state of the international system provides the context of the foreign policy behavior of individual states, including Kazakhstan. While scholarly opinions on the evolution of the IR system differ, at times dramatically, it would be fair to say that the system demonstrates a considerable degree of resilience. Academic explanations of the resilience of the international system include the observation that the United States successfully steers its foreign policy course from dominance to leadership. Jake Sullivan from the Carnegie Endowment believes that "*over the past decade, the U.S. diplomacy has facilitated a shift from formal, legal, top-down institutions to more practical, functional, and regional approaches to managing transnational issues – through "coalitions of the willing" … This shift…has also made the rule-based order less rigid, and therefore more lasting.*" [35]

A noteworthy example is the process of Nuclear Security Summits that the US initiated to draw attention, at the highest possible level, to the need to secure nuclear material and thus prevent nuclear terrorism. Forty-seven countries and three international organizations participated in the first summit. Kazakhstan was among the most active and enthusiastic participants.

Kazakhstan also participates in the Global Partnership (GP) Against the Spread of Weapons and Materials of Mass Destruction. The country is actively engaged in preparation of the gift basket initiatives. A telling example is the Japanese initiative for a Transport Security Gift Basket. The latter is realized through four working groups chaired, respectively, by Japan (for road transport), the UK (for maritime transport), Kazakhstan (for railway transport), and the US (for air transport). Gift basket diplomacy fundamentally is a collective action agreed by smaller groups of participants that goes beyond the lowest common denominator consensus that larger groups often reach in large multilateral fora. In the framework of the NSS and the Global Partnership, Kazakhstan demonstrates that is capable of contribution to the development of the normative base of the international system and the spread of best practices in its implementation.

Another example of leading position of Kazakhstan is pertinent in the field of verification. Since 2019, the Verification Research, Training and Information Centre (VERTIC) has been undertaking a project, with funding from the Norwegian government, in support of the development and strengthening of practical and effective nuclear disarmament verification measures for the achievement and maintenance of a world without nuclear weapons. The project aims to analyze the potential involvement of Argentina, Brazil, Kazakhstan and South Africa in nuclear disarmament verification activities.

The project investigates the feasibility of establishing national or regional nodes/hubs for nuclear disarmament verification in the Global South. It also seeks to initiate the identification of possible lessons that may be applicable for future nuclear disarmament initiatives from the experiences of the South African case of terminating and dismantling its nuclear explosive device program in a verifiable and irreversible manner; of Kazakhstan, in the decommissioning of nuclear test site infrastructure; and of Argentina and Brazil, in the verifiable disposal of weapons-usable fissile material. The perception is that the national or regional nodes/hubs – in Africa, Central Asia and Latin America – could constructively engage with each other and share their work to develop a cadre of verification experts and appropriate approaches, policies and programmes.

While disarmament is primarily a political matter, verification is a technical matter. Verification challenges are a mix of political and technical aspects. Nuclear disarmament verification research and innovation should also be at both the technical and conceptual levels, influenced by both technical and political considerations. Kazakhstan is therefore very well positioned to prove in action both its political will and technical expertise.

CONCLUSION

Kazakhstan, the country that voluntarily renounced the world's fourth largest nuclear arsenal, strives to remain a reliable partner of the international community in matters of non-proliferation, disarmament and the peaceful use of nuclear energy. The example set up by

Kazakhstan provides support and inspiration to various countries, African states included, regardless of their political, economic, and military potential, to address issues related to the renunciation of nuclear weapons and the peaceful use of atomic energy.

The implementation of Kazakhstan's policy in the field of non-proliferation, export control, use and control of nuclear technologies within the framework of international cooperation helps Kazakhstan to create an effective and efficient nuclear security infrastructure and, as a result, increase the effectiveness of the non-proliferation and export control regime in the world.

As an emerging regional middle power, the country has the vocation and capacity to act towards strengthening regionalism, but also towards dialogue and cooperation between different regional and sub-regional associations. Kazakhstan, the country in the heart of Eurasia with impressive initiatives in global non-proliferation, exults *intra muros* of the UN and other relevant formats not only its own voice, but that of an entire category of international actors – the emerging middle powers.

REFERENCES

1. W. Carlsnaes, "Actors, Structures, and Foreign Policy Analysis", [in:] Foreign Policy: Theories, Actors, Cases, eds. S. Smith, A. Hadfield, and T. Dunne, Oxford University Press, 2012, p. 127.
2. E. Brighi, C. Hill, "Implementation and Behaviour", [in:] Foreign Policy: Theories, Actors, Cases, eds. S. Smith, A. Hadfield, and T. Dunne, Oxford University Press, 2012.
3. Waltz, Kenneth, Theory of International Politics, First Edition. Boston: Addison-Wesley, 1979
4. Wendt, Alexander, Social Theory of International Politics, First Edition, Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 235–237.
5. http://www.sadcproject.istc.int
6. Wright Thomas J., All Measures Short of War: The Contest for the Twenty-First Century and the Future of American Power (2017) Yale University Press; p XIII.
7. http://adilet.zan.kz/eng/docs/Z1600000442
8. http://adilet.zan.kz/eng/docs/Z980000219
9. http://adilet.zan.kz/eng/docs/Z1400000202
10. http://adilet.zan.kz/eng/docs/K070000212
11. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1700015005
12. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1700015007
13. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1700015006
14. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010671
15. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1900018920
16. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011204
17. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600013537
18. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600013456
19. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600013468
20. http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600013466
21. Anthony Burk, Uranium (2017), Polity Press; p.145
22. Policy address to the Security Council by the President of the Republic of Kazakhstan, Nursultan Nazarbayev, entitled "Kazakhstan's concept and vision for sustaining global partnerships for a secure, just and prosperous world" on the occasion of the start of Kazakhstan's non-permanent membership of the Security Council for 2017–2018, S/2017/19.
23. A/RES/71/67 Nuclear disarmament verification. The GGE consisted of representatives from the following countries: Algeria, Argentina, Brazil, Chile, China, Finland, France, Germany, Hungary, India, Indonesia, Japan, Kazakhstan, Mexico, Morocco, Netherlands, Nigeria, Norway, Pakistan, Poland, Russia, South Africa, Switzerland, United Kingdom, USA.
24. Project paper: Kazakhstan as a member of the Group of Governmental Experts: how the country can best contribute to make this UN process successful?
25. http://adilet.zan.kz/rus/docs/Z100000243
26. http://adilet.zan.kz/rus/docs/Z100000244
27. http://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1100000416
28. http://adilet.zan.kz/rus/docs/Z100000245
29. http://adilet.zan.kz/rus/docs/Z1100000405
30. http://adilet.zan.kz/rus/docs/Z100000246
31. http://adilet.zan.kz/rus/docs/Z000000092
32. http://adilet.zan.kz/rus/docs/G1900000005
33. http://www.nuclear.kz/journal/vypusk-3-51-2019.html?lang=ru
34. Policy address to the Security Council by the President of the Republic of Kazakhstan, Nursultan Nazarbayev, entitled "Kazakhstan's concept and vision for sustaining global partnerships for a secure, just and prosperous world" on the occasion of the start of Kazakhstan's non-permanent membership of the Security Council for 2017–2018, S/2017/19.
35. Jake Sullivan, The World After Trump: How the System Can Endure? in Foreign Affairs, Volume 97, Number 2, March/April 2018, pp 10–20.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЯДРОЛЫҚ САЛАДАҒЫ ҚЫЗМЕТІН РЕТТЕУ ЖҮЙЕСІ СЫРТҚЫ САЯСИ АКТИВ СИЯҚТЫ

К.С. Величков

Халықаралық ғылыми-техникалық орталық (ХҒТО),
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Қазақстанның таратпау саласындағы бастамалары жаһандық деңгейде мойындалды. Қазақстан барлық дерлік негізгі ядролық шарттардың қатысушысы, Орталық Азиядағы ядролық қарудан азат аймақ құрудағы негізгі қозғаушы күш болып табылады, Ядролық қарудан азат әлем құру туралы жалпыға ортақ декларацияға бастамашылық жасады, атом электр станциялары үшін отын жеткізуде іркіліс болған жағдайда бейбіт мақсаттарда пайдалану үшін Өскеменде МАГАТЭ аясында төмен байытылған уран банкін құрды.

Қазақстанның таратпау саласындағы сыртқы саяси іс-қимылдары жақсы белгілі және халықаралық деңгейде бағаланғанымен, ядролық секторды басқарудағы қазақстандық тәжірибенің берілуі азырақ белгілі актив болып табылады. Мысалы, Халықаралық ғылыми-техникалық орталық жүзеге асыратын ЕО жобасы шеңберінде Атом энергиясы саласындағы қадағалау және бақылау комитеті және Қазатомөнеркәсіп компаниясы уранды өндіру мен тасымалдау саласында Оңтүстік Африка даму қоғамдастығымен тәжірибе алмасты. Аталған мысал Қазақстанның даму саласындағы халықаралық ынтымақтастыққа одан әрі үлес қосуы үшін осы тақырыптың үлкен әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: *Қазақстан, сыртқы саясат, таратпау, халықаралық ынтымақтастық, конструктивизм.*

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КАЗАХСТАНА В ЯДЕРНОЙ ОБЛАСТИ КАК ВНЕШНЕПОЛИТИЧЕСКИЙ АКТИВ

Величков К.С.

Международный научно-технический центр (МНТЦ),
Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

Инициативы Казахстана в области нераспространения признаны на глобальном уровне. Казахстан является участником почти всех основных ядерных договоров, ключевой движущей силой в создании Центрально-Азиатской зоны, свободной от ядерного оружия, инициировал Всеобщую декларацию о построении мира, свободного от ядерного оружия, учредил банк низкообогащенного урана под эгидой МАГАТЭ в Усть-Каменогорске для использования в мирных целях в случае перебоев поставок топлива для атомных электростанций.

В то время как внешнеполитические действия Казахстана в области нераспространения хорошо известны и оценены на международном уровне, передача Казахстанского опыта в управлении ядерным сектором является менее известным активом. Например, в рамках проекта ЕС, осуществляемого Международным научно-техническим центром, был проведен обмен опытом Комитета по надзору и контролю в области атомной энергии и компании КАЗАТОМПРОМ в области добычи и транспортировки урана с Сообществом развития Юга Африки. Данный пример показывает большой потенциал этой тематики для дальнейшего вклада Казахстана в международное сотрудничество в области развития.

Ключевые слова: *Казахстан, внешняя политика, нераспространение, международное сотрудничество, конструктивизм.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-29-36
УДК 621.039.51

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОТРАБОТКЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ПРИМЕСНЫХ ГАЗОВ В ЯДЕРНОМ ТОПЛИВЕ

[1] Витюк Г.А., [2] Витюк В.А., [1] Вурим А.Д., [1] Келсингазина Р.Е., [1] Бекмагамбетова Б.Е.

[1] Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2] РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: shmeleova@nnc.kz

Статья посвящена оценке количества примесных газов в ядерном топливе в аспекте разрушающего вклада выброса газов на общее давление внутри ампульного устройства при моделировании тяжелой аварии с плавлением активной зоны. В работе представлена методика расчета, основанная на измерении давления и температуры газа в замкнутом объеме твэла во время плавления топлива. Корректность разработанной методики подтверждена результатами проведенных экспериментов по плавлению топлива на импульсном графитовом реакторе ИГР при реализации регулируемого нейтронного импульса.

Ключевые слова: *импульсный графитовый реактор ИГР, внутриреакторный эксперимент, экспериментальная апробация, тяжелая авария, давление, примесные газы, плавление топлива.*

ВВЕДЕНИЕ

С 1983 года в реакторе ИГР проводятся исследования модельных твэлов и ТВС энергетических реакторов в аварийных и переходных режимах. Условиям исследований отдельных явлений и процессов сопровождающих разрушение тепловыделяющих элементов, в наибольшей мере отвечают ампульные испытания ввиду их исходной параметричности, т.е. возможности исследования влияния на термомеханическое поведение твэлов отдельных факторов или группы факторов в широком диапазоне испытаний. Отдельные режимы ампульных испытаний достаточно реалистично моделируют аварийные условия работы ядерных энергетических установок и, следовательно, позволяют получить интегральное представление о масштабах событий и явлений в активной зоне реактора.

При формировании методического подхода к испытаниям и разработке экспериментальных устройств значительное внимание уделяется вопросам безопасности.

Ампульные испытания характеризуются критическим уровнем нагрузок на тепловыделяющие элементы, приводящие к разгерметизации оболочек твэлов или к полному разрушению вплоть до плавления и испарения топлива. В случае реализации предельных по величине нагрузок ампульное устройство призвано полностью локализовать выделившиеся продукты деления и фрагменты элементов конструкции разрушенного твэла.

Таким образом, оценка безопасности проведения ампульных испытаний заключается в оценке устойчивости ампульного устройства к воздействию разрушающих факторов. К числу разрушающих факторов, воздействие которых на ампульное устройство оценивается при подготовке ампульных испытаний, относятся:

− механические нагрузки на стенки ампульного устройства, вызванные повышением давления при разогреве теплоносителя, заполняющего ампулы;

− механические нагрузки на стенки ампульного устройства, вызванные ударными воздействиями, формирующимися при обширном взаимодействии расплава материалов конструкции твэлов с теплоносителем;

− механические нагрузки на стенки ампульного устройства, вызванные выбросом газов, которыми заполнен модельный твэл.

Последний фактор зачастую не учитывался при проводимых испытаниях на ИГР, т.к., во-первых, анализ указанных механических нагрузок на основе ряда консервативных допущений позволяет определять максимально возможные статические давления и, как следствие, заведомо увеличивать толщину ампульного устройства в целях безопасности. Во-вторых, ампульные устройства с облученным топливом, эксперименты с которыми проводились на ИГР, размещали в себе не более двух твэлов, следовательно, вклад в общее давление, вызванный выбросом газов, заполняющих твэл, был минимален в сравнении с остальными механическими нагрузками.

Однако, в связи с тем, что на реакторе ИГР проводится все больше испытаний с большим количеством модельных твэлов, содержащих порядка 8 кг топлива (такое количество размещается в ограниченном ампульном пространстве, а размеры ампульного устройства ограничены конструкцией центрального экспериментального канала – ЦЭК), и с тем, что толщина стенок ампульного устройства влияет на количества «полезных» нейтронов для проведения эксперимента (стальная ампула способна поглощать большое количество нейтронов, а работа реактора ИГР ограничена температурным эффектом реактивности), появляется необходимость точного определения всех возможных разрушающих факторов, которые могут воздействовать на ампульное устройство, с целью точного определения необходимой толщины его стенок. Тем более, что количество газов, содержащихся под оболочкой твэлов у облученного топлива, достаточно велико, и может внести существенный вклад в общее давление в ампульном устройстве при проведении экспериментов с разрушением твэлов.

Таким образом, необходимо было разработать и экспериментально апробировать методику точного определения количества газов, находящихся под оболочкой твэлов, подготовленных для проведения экспериментов на ИГР.

1 Обзор методик определения параметров и состава газа под оболочкой твэла

Существует методика «Исследование выхода газообразных продуктов деления под оболочку опытных твэлов с компактной двуокисью урана» описанная авторами [1]. Методика основана на непрерывном измерении давления в твэлах в процессе их облучения в исследовательском реакторе СМ-2. После облучения проводится обработка полученных результатов, определение параметров облучения и газовыделения. Облучение твэлов проводится в петле исследовательского реактора, заполненной водой. Модельный твэл напрямую соединяется с измерителями давления. До подсоединения к модельному твэлу измерителей давления, в нем измеряется свободный объем и проводится измерение свободного объема и калибровка измерителей.

Количество газа определяется для системы «твэл-измерители давления» по средней температуре в твэле. Данная температура определяется в следствие теплогидравлического расчета с учетом изменения плотности нейтронного потока по радиусу топливной таблетки. Однако, общая погрешность определения количества газа, вышедшего из твэла в процессе его облучения, является функцией многих переменных. Авторы [1] утверждают, что она не превышает 10%.

Данный способ является достаточно точным, однако предлагаемая конструкция и выдвигаемые требования к герметичности модельного твэла с подсоединенными к нему измерителями давления довольно сложны. К тому же данная методика не учитывает то количество газов, которое может быть заключено в порах топливных таблеток, появившихся там в процессе его облучения.

Существует методика «Измерение объёма и давления газа в твэле и свободного объёма на установке лазерного прокола в защитной камере К-5», разработанная и аттестованная АО «ГНЦ НИИАР» [2]. Данная методика основана на масс-спектрометрическом методе определения количественного и качественного состава газа под оболочками облученных и необлученных твэлов, а также измерения давления и свободного объема под оболочкой. Масс-спектрометрический метод определения состава, выделившегося во время облучения газа, сформирован на эффекте деления ионов в поперечном магнитном поле. В свою очередь ионизация частиц рассматриваемого газа реализовывается путем бомбардировки их электронами. На установке с твэлом в специально защитной камере происходит прокол твэла лучом лазера. Из отверстия в прожженной оболочке газ, содержащийся в твэле, выходит в герметичную систему газосбора и измерения. Авторы утверждают, что «доверительные границы погрешности определения объема газа составляют ± (2,7–6,8) см^3 при его объеме в твэле 29–1150 см^3» [2].

Данный способ является достаточно точным в качестве определения состава газа, выходящего из твэла в процессе его облучения. Но, как и в предыдущей методике, не учитывает то количество газов, которое может быть заключено в порах топливных таблеток.

Существует методика «Определение параметров твэлов реактора БН-600 неразрушающими методами» предлагаемая авторами [3]. Методика основана на гамма-спектрометрических измерениях активности и дислокации газообразных продуктов деления в твэле без нарушения герметичности оболочки. Исследования проводятся в защитных камерах, а для регистрации гамма-излучения используется полупроводниковый детектор. В каждом твэле измеряется распределение радионуклидов как по высоте твэла, так и в газосборниках. Относительная погрешность измерений при определении активности изотопов составляет 3–6 %, а абсолютная величина погрешности около 10 %.

Данный способ применялся непосредственно в защитных камерах при реакторе БН-350 и направлен, в основном, на выявление дефектов в твэле и его активности. Данный способ дает информацию о наличии в газосборниках продуктов деления и определяет их качественный состав, но не дает информацию о количестве газов под оболочкой и давлении.

Большинство экспериментов с модельными ТВС, которые выполняются на реакторе ИГР, предполагают плавление ядерного топлива с целью имитации тяжелой аварии в твэлах и ТВС энергетических реакторов. Соответственно, при плавлении топлива кроме тех газов, которые находятся под оболочкой твэлов, высвобождаются и те, которые находятся в порах топливных таблеток. В необлученном топливе присутствие примесных газов в порах ядерного топлива обусловлено особенностями его производства с использованием технологии холодного прессования и спекания таблеток из порошка диоксида урана, а в облученных – продуктами деления при облучении ядерного топлива.

Все представленные выше методики, а также методика измерения содержания примесных газов при изготовлении топлива, условий расплавления топлива не предполагают и, как следствие, не учитывают полное количество газа под оболочкой и в топливных таблетках. В данной статье рассматриваются результаты экспериментальной отработки методики определения количества примесных газов для прогнозирования параметров испытаний с плавлением модельных ТВС, основанной на применении уравнения

Клапейрона-Менделеева, устанавливающего связь между объемом, давлением и абсолютной температурой идеального газа, находящегося в замкнутой герметичной капсуле [4].

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1 Реактор ИГР

Технические характеристики импульсного графитового реактора (ИГР) (рисунок 1) обеспечивают возможность моделирования тяжелых аварий в широком диапазоне основных определяющих величин, таких как флюенс тепловых нейтронов (до $3{,}7\cdot10^{16}$ н/см^2) и максимальная плотность потока тепловых нейтронов (до $7\cdot10^{16}$ н/(см$^2\cdot$с)) [5].

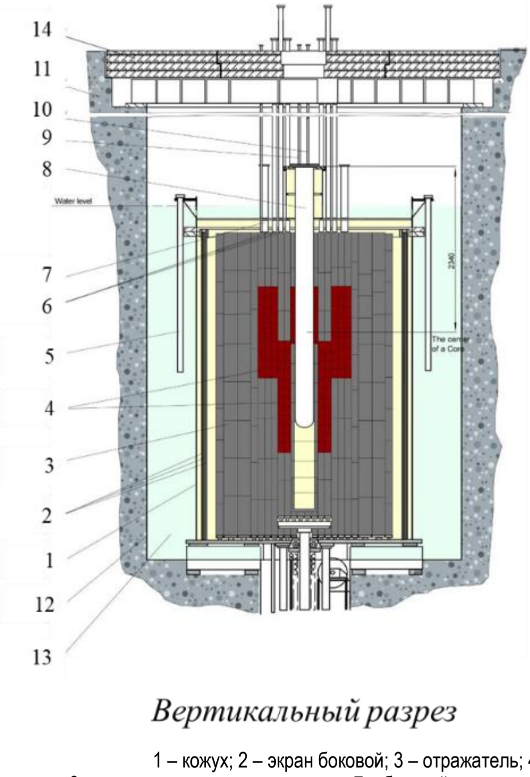
Экспериментальные исследования и испытания, которые проводятся на реакторе ИГР, практически всегда связаны с получением экспериментальной информации о быстропротекающих физических и тепловых процессах в ядерных реакторах, о работоспособности объектов испытаний в нормальных и аварийных условиях эксплуатации, о поведении топлива и конструкционных материалов для обоснования безопасности систем и элементов ядерных энергетических установок [6].

Основными режимами работы реактора являются нерегулируемый импульсный режим – режим самогасящейся нейтронной вспышки и регулируемый режим. Для осуществления режима самогасящейся вспышки реактору сообщается реактивность, превышающая долю запаздывающих нейтронов, величина которой определяет форму, амплитуду и полуширину вспышки; гашение вспышки происходит вследствие отрицательного температурного эффекта реактивности. Регулируемый режим осуществляется перемещением стержней регулирования, компенсирующих отрицательный температурный эффект реактивности по заданному закону. При любом режиме работы нейтронный поток в ИГР может на порядки превышать потоки в энергетических реакторах, что обеспечивает возможность проведения динамических испытаний элементов их конструкций в экспериментах.

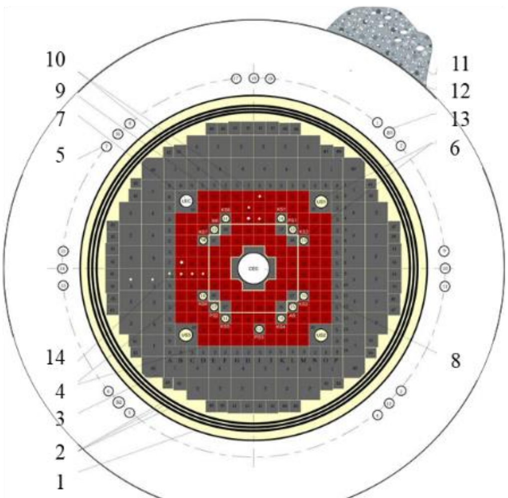
2.2 Экспериментальная ампула

Экспериментальная ампула (рисунок 2), представляет собой герметичный сосуд высотой 2930 мм, изготовленный из нержавеющей стали, в который установлена танталовая вставка. Топливные таблетки из диоксида урана обогащением 4,4% по U-235 типа ВВЭР-1000 размещались внутри танталовой вставки. Для предварительного разогрева топлива на наружной поверхности капсулы располагался нагреватель омического типа.

Ампула с топливом устанавливалась в ЦЭК реактора ИГР так, чтобы обеспечить совпадение центра топливного столба с центром активной зоны реактора ИГР.



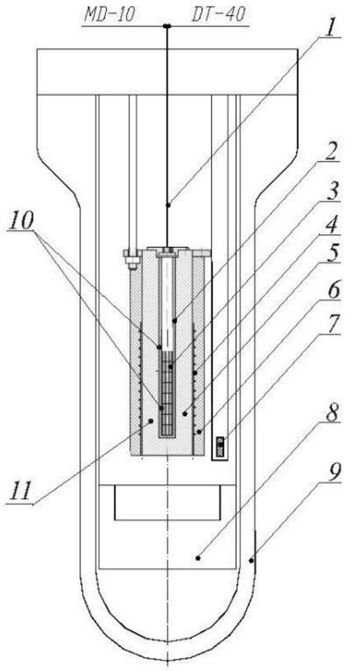
Вертикальный разрез



Горизонтальное сечение

1 – кожух; 2 – экран боковой; 3 – отражатель; 4 – активная зона; 5 – канал ионизационной камеры;
6 – канал стержня регулирования; 7 – боковой экспериментальный канал; 8 – центральный экспериментальный канал;
9 – канал физических изменений; 10 – канал термоэлектрического преобразования; 11 – биологическая защита;
12 – бак; 13 – полость охлаждающей воды; 14 – перекрытие верхнее

Рисунок 1. Реактор ИГР



1 – соединительная трубка (импульсная линия); 2 – танталовая вставка; 3 – топливные таблетки; 4 – электрический нагреватель; 5 – стальная капсула; 6 – теплоизоляция; 7 – монитор энерговыделения; 8 – ловушка аварийная; 9 – ампула экспериментального устройства; 10,11 – точки контроля температуры

Рисунок 2. Схема экспериментального устройства

Сначала осуществлялся предварительный разогрев топлива и стенок капсулы. В процессе разогрева капсулы с топливом осуществлялась сушка топлива. Для этой цели производился нагрев топлива до температуры 673 К с одновременным вакуумированием внутренней полости капсулы. Нагрев топлива и капсулы осуществлялся при мощности нагревателя ~1 кВт. Управление процессом разогрева осуществляется по измеренным значениям температуры стенки капсулы на границе с танталом. После достижения температуры 673 К мощность нагревателя снижалась до 10÷20 Вт и на этой мощности разогрев продолжался до начала реакторного пуска (при постоянном контроле температуры, которая поддерживалась на уровне 670±30 К).

После достижения заданной температуры и выдержки топлива в течение пяти минут при давлении 0,01 МПа (в это время из топлива удалялась влага и газы, содержащиеся в поверхностном слое таблеток) производилось заполнение капсулы аргоном до требуемого давления.

После завершения операций разогрева и задания начального давления аргона в капсуле проводился исследовательский пуск.

Диаграмма изменения мощности реактора и энерговыделения в топливе, которое требовалось реализовать в топливных таблетках, для двух экспериментов приведена на рисунке 3.

При реализации мощности реактора происходил разогрев топлива в ампуле. В процессе разогрева и плавления топлива примесные газы высвобождались из топливной матрицы. Газовая среда в ампуле разогревалась, что приводило к росту давления в газовой полости капсулы. Давление в газовой полости капсулы являлось основным определяемым параметром в эксперименте.

Для косвенного измерения выделения энергии в топливе рядом с капсулой в трубке устанавливался монитор энерговыделения, калиброванный по содержанию ^{235}U.

Датчики давления были размещены вне активной зоны и соединены с полостью капсулы импульсной линией, объем которой, как и объем полостей датчиков давления, был принят во внимание при определении размеров герметичной капсулы.

Для измерения температуры стенки капсулы и танталовой вставки использовались термопары.

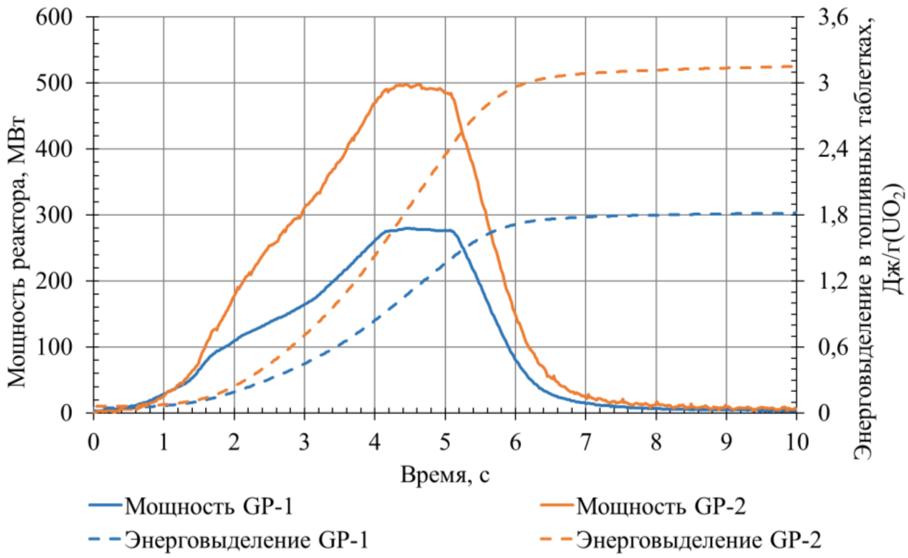


Рисунок 3. Диаграмма изменения мощности в реакторе и энерговыделения в топливе для двух экспериментов

3 Результаты экспериментов

Описываемый метод оценки количества примесных газов в топливе был применен к результатам двух внутриреакторных экспериментов GP (**G**as **P**ressure), которые были проведены на реакторе ИГР [7].

Результаты эксперимента GP-1

В эксперименте GP-1 среднее энерговыделение в топливных таблетках составило 1,87 кДж/г UO_2, при этом начальное давлении аргона в капсуле составляло 0,365 МПа при начальной температуре капсулы 720 К.

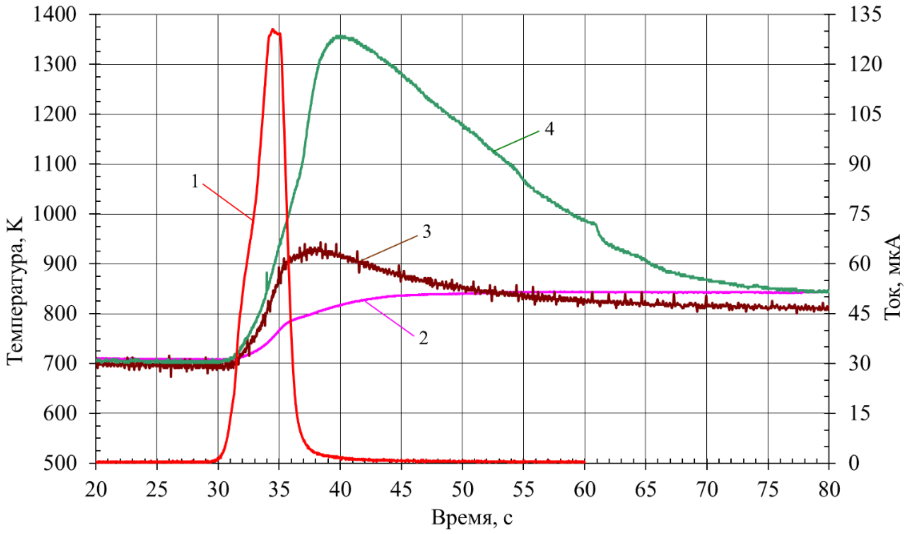
Измеренные в ходе эксперимента GP-1 температура и давление в экспериментальном устройстве представлены на рисунках 4 и 5.

В эксперименте GP-1 топливо было расплавлено частично и при расчете содержания примесных газов во внимание принималась масса только расплавленной части топливных таблеток.

Вес топлива, которое было расплавлено в ходе эксперимента, был определен по результатам взвешиваний до и после проведения эксперимента. Результаты взвешивания фрагментов двух верхних таблеток, оставшихся нерасплавленными, показали, что масса расплавленного топлива составляет:

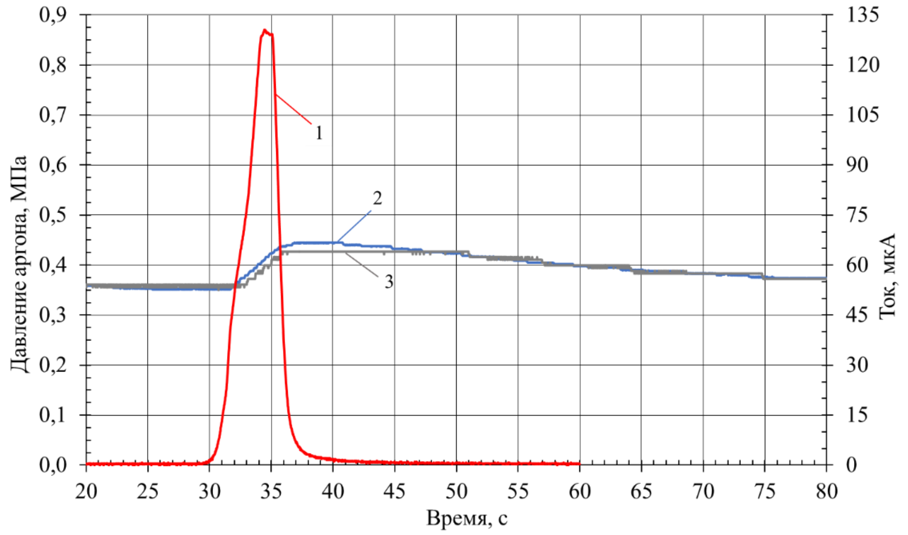
$$m_1 + m_2 - m_{остаток} = m_{расплава}$$

где m_1 – масса первой таблетки до проведения эксперимента, г; m_2 – масса второй таблетки до проведе-



1 – мощность (ток ионизационной камеры) реактора; 2 –температура стальной капсулы; 3 и 4 – температура танталовой вставки

Рисунок 4. Параметры эксперимента GP-1



1 – мощность (ток ионизационной камеры) реактора; 2 – давление (датчик давления MD-10); 3 – давление (датчик давления DT-40)

Рисунок 5. Изменение давления в эксперименте GP-1 ния эксперимента, г; $m_{остаток}$ – масса топлива, оставшегося нерасплавленным в ходе эксперимента в первой и второй таблетках, г; $m_{расплава}$ – масса топлива расплавившегося в первой и второй таблетках в ходе эксперимента, г.

Масса расплавленного топлива составила 4,79 г.

Рассчитанное количество примесных газов, вышедших из топлива в эксперименте GP-1, составляет ~$2{,}24 \cdot 10^{-5}$ моль. При этом удельное содержание примесных газов в топливе в расчете на 4,79 г расплавленного топлива (только для двух верхних таблеток) не превышает $0{,}47 \cdot 10^{-6}$ моль/г UO_2.

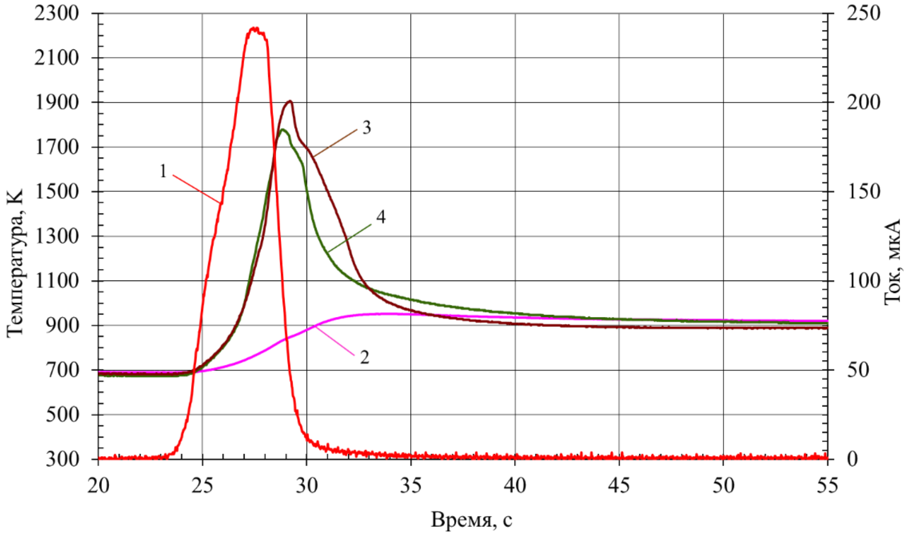
Результаты эксперимента GP-2

В эксперименте GP-2 среднее энерговыделение в топливных таблетках составило 3,26 кДж/г UO_2, при этом начальное давлении аргона в капсуле составляло 0,267 МПа при начальной температуре капсулы 685 К.

Измеренные в ходе эксперимента GP-2 температура и давление в экспериментальном устройстве представлены на рисунках 6 и 7.

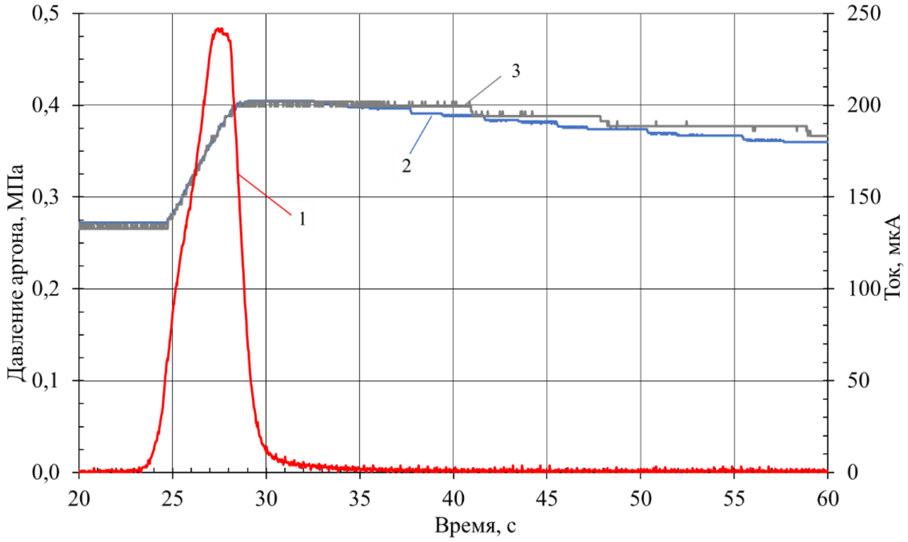
В процессе эксперимента GP-2 топливо было полностью расплавлено. Масса расплавленного топлива составила 35,89 г.

Количество примесных газов, вышедших из топлива, составило $3{,}99 \cdot 10^{-5}$ моль, что в расчете на массу расплавленного топлива (35,89 г) составило $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ моль/г UO_2. Это значение является более корректным, так как в эксперименте GP-2 было полностью расплавлено все топливо.



1 – мощность (ток ионизационной камеры) реактора; 2 –температура стальной капсулы;
3 и 4 – температура танталовой вставки

Рисунок 6. Параметры эксперимента GP-2



1 – мощность (ток ионизационной камеры) реактора; 2 – давление (датчик давления MD-10);
3 – давление (датчик давления DT-40)

Рисунок 7. Изменение давления в эксперименте GP-2

Выводы

Результаты исследований, направленных на определение количества примесных газов в топливных таблетках и влияния примесных газов на величину давления, формирующегося в замкнутом объеме при плавлении в нем топлива, показали, что:

− в случае плавления ядерного топлива в замкнутом объеме количество примесного газа, вышедшего из топлива в этот объем, может быть оценено, если к описанию поведения газа применить уравнение состояния идеального газа;

− основным условием, которое должно быть выполнено для получения корректных результатов оценки количества примесных газов, является использование совершенной системы прямых измерений температуры и давления газа;

− содержание примесных газов в топливе по результатам проведенных облучательных экспериментов определено на уровне 0,49…1,1 моль/г UO_2 при плавлении диоксида урана. Полученные данные хорошо согласуются с требованиями, регламентирующими максимальное содержание примесных газов для таблеток из порошка диоксида урана, которое составляет 0,9 моль/г UO_2 в технических условиях для российских производителей, 2 моль/г UO_2 – для производителей США, и $4{\cdot}10^{-6}$ моль/г UO_2 для производителей из Швеции [8]. Полученный в результате использования разработанной методики определения объема примесных газов в керамическом топливе диапазон для топлива типа ВВЭР хорошо согласуется с требованиями к топливу российского производства и подтверждает корректность разработанной методики.

Вклад от примесных газов в общее давление при плавлении небольшого объема топлива будет минимален, и рост давления будет вызван процессами, не связанными с выходом примесных газов. Однако, важно отметить, что при проведении внутриреакторных экспериментов с плавлением большого объема свежего, и, тем более, облучённого топлива, вклад от примесных газов в общее давление должен быть учтен при планировании и проведении анализа условий безопасного проведения испытаний.

Разработанная и экспериментально апробированная оригинальная методика оценки количества примесных газов в топливе может быть успешно реализована при условии использования развитой системы измерения температуры газа и давления, при этом наиболее важное значение имеют измерения температуры покрывающего газа, так как температура газа в области размещения топлива может быть принята равной температуре самого топлива, которая может быть довольно точно рассчитана по значениям выделившейся в нем энергии.

Данная работа выполнена в рамках научно-технической программы № BR09158470 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

Литература

1. Сулаберидзё В.Ш. Исследование выхода газообразных продуктов деления под оболочку опытных твэлов с компактной двуокисью урана/ В.Ш. Сулаберидзё, Б.В. Самсонов, А.П. Кириллович, А.В. Перпин, Ю.И. Лимонов, Н.Ф. Шипигин, В.М. Иванов, Н.И. Крошкин // НИИАР-26(541). – Препринт – Димитровград, 1982. – 28 с.
2. Марков Д. В. Основные закономерности изменения свойств и характеристик топлива ВВЭР и РБМК нового поколения в период эксплуатации по результатам комплексных послереакторных исследований: дисс. д.т.н.: 05.14.03/ Марков Д. В.; ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт». – Москва, 2017. – 397 с.
3. Жилкин А.С. Определение параметров твэлов реактора БН-600 нераэрушающими методами / А.С. Жилкин, О.С. Кпростин, А.Н. Огоролов, Е.С. Лисицын, А.Н. Бабуикин, П.И. Лебедев, В.В. Чуев, Е.В. Шестопалов, А.Г. Цикунов – Обнинск: Физико-энергетический институт, 1991. – 34 с.
4. Vityuk G. Methods and results of determining the impurity gas amount in ceramic fuel / G. Vityuk, A. Vurim, M. Skakov, A. Pakhnits // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 150. – Article 107843. Режим доступа: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107843.
5. Курчатов И.В. Импульсный графитовый реактор ИГР / И.В. Курчатов, С.М. Фейнберг, Н.А. Доллежаль // Атомная энергия. – Москва, 1964. – Т. 17, вып. 6. – С. 463–474
6. Витюк В.А. Подготовка реакторных экспериментов по изучению тяжелой аварии быстрого реактора с натриевым теплоносителем / В.А. Витюк, А.Д. Вурим, В.М. Котов, Г.А. Витюк, Д.С. Иданова // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. – Томск, ТПУ, 2016. – С. 29–30.
7. Вурим А.Д. Внутриреакторные эксперименты по проекту EAGLE / А.Д. Вурим, В.А. Гайдайчук, А.В. Пахниц, Н.А. Демко, А.Г. Трухачев, Е.В. Козловский, М.О. Токтаганов, И.В. Прозорова, И.Н. Богомолова, Ю.В. Алейников // Вестник НЯЦ РК. Атомная энергетика и безопасность. – 2002. – № 1. – С. 25–34.
8. Милованов О.В. Разработка технологии уран-гадолиниевого оксидного топлива для реакторов ВВЭР / О.В. Милованов, В.Н. Проселков, А.В. Кулешов и др. // ИАЭ-5744/4 Российский научный центр «Курчатовский институт». – Препринт – 1994. – С. 2–3.

References

1. Sulaberidze V.Sh. Issledovanie vykhoda gazoobraznykh produktov deleniya pod obolochku opytnykh tvelov s kompaktnoy dvuokis'yu urana/ V.Sh. Sulaberidze, B.V. Samsonov, A.P. Kirillovich, A.V. Perpin, Yu.I. Limonov, N.F. Shipigin, V.M. Ivanov, N.I. Kroshkin // NIIAR-26(541). – Preprint – Dimitrovgrad, 1982. – 28 p.
2. Markov D. V. Osnovnye zakonomernosti izmeneniya svoystv i kharakteristik topliva VVER i RBMK novogo pokoleniya v period ekspluatatsii po rezul'tatam kompleksnykh poslereaktornykh issledovaniy: diss. d.t.n.: 05.14.03/ Markov D. V.; FGBU NITs «Kurchatovskiy institut». – Moscow, 2017. – 397 p.
3. Zhilkin A.S. Opredelenie parametrov tvelov reaktora BN-600 neraerushayushimi metodami / A.S. Zhilkin, O.S.

Kprostin, A.N. Ogorolov, E.S. Lisitsyn, A.N. Babuikin, P.I. Lebedev, V.V. Chuev, E.V. Shestopalov, A.G. Tsikunov – Obninsk: Fiziko-energeticheskiy institut, 1991. – 34 p.
4. Vityuk G. Methods and results of determining the impurity gas amount in ceramic fuel / G. Vityuk, A. Vurim, M. Skakov, A. Pakhnits // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 150. – Article 107843. Rezhim dostupa: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107843.
5. Kurchatov I.V. Impul'snyy grafitovyy reaktor IGR / I.V. Kurchatov, S.M. Feynberg, N.A. Dollezhal' // Atomnaya energiya. – Moskva, 1964. – T. 17, Issue 6. – P. 463–474
6. Vityuk V.A. Podgotovka reaktornykh eksperimentov po izucheniyu tyazheloy avarii bystrogo reaktora s natrievym teplonositelem / V.A. Vityuk, A.D. Vurim, V.M. Kotov, G.A. Vityuk, D.S. Idanova // Trudy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fiziko-tekhnicheskie problemy v nauke, promyshlennosti i meditsine. – Tomsk, TPU, 2016. – P. 29–30.
7. Vurim A.D. Vnutrireaktornye eksperimenty po proektu EAGLE / A.D. Vurim, V.A. Gaydaychuk, A.V. Pakhnits, N.A. Demko, A.G. Trukhachev, E.V. Kozlovskiy, M.O. Toktaganov, I.V. Prozorova, I.N. Bogomolova, Yu.V. Aleynikov // Vestnik NYaTs RK. Atomnaya energetika i bezopasnost'. – 2002. – No. 1. – P. 25–34.
8. Milovanov O.B. Razrabotka tekhnologii uran-gadolinievogo oksidnogo topliva dlya reaktorov VVER / O.B. Milovanov, V.N. Proselkov, A.V. Kuleshov i dr. // IAE-5744/4 Rossiyskiy nauchnyy tsentr "Kurchatovskiy institut". – Preprint – 1994. – P. 2–3.

ЯДРОЛЫҚ ОТЫНДАҒЫ ҚОСПАЛЫҚ ГАЗДАРДЫҢ МӨЛШЕРІН АНЫҚТАУ ӘДІСІН ӨҢДЕУ БОЙЫНША ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУЛЕР

[1] Витюк Г.А., [2] Витюк В.А., [1] Вурим А.Д., [1] Келсингазина Р.Е., [1] Бекмагамбетова Б.Е.

[1] ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазахстан
[2] Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы РМК, Курчатов, Қазақстан

Мақала ампулалық құрылғының ішінде белсенді аймақтың балқуымен, ауыр апатты модельдеу кезінде ядролық отындағы қоспалық газдардың жалпы қысымға әсер ету мөлшерінің жойғыш үлесі тұрғысынан бағалауына арналған. Жұмыста отынды балқыту кезінде твелдің жабық көлеміндегі газдың қысымы мен температурасын өлшеуге негізделген есептеу әдісі ұсынылған. Әзірленген әдістеменің дұрыстығы реттелетін нейтрондық импульсті іске асыру кезінде импульсті графитті реакторда ИГР отынды балқыту бойынша жүргізілген эксперименттердің нәтижелерімен расталады.
Түйінді сөздер: *импульстік графит реакторы ИГР, реакторішілік тәжірибе, тәжірибелік сынау, ауыр апат, қысым, қоспалы газдар, отынның балқуы.*

EXPERIMENTAL STUDIES ON DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR DETERMINING THE AMOUNT OF IMPURITATED GASES IN NUCLEAR FUEL

[1] G.A. Vityuk, [2] V.A. Vityuk, [1] A.D. Vurim, [1] R.Ye. Kelcingazina, [1] B.Ye. Bekmagambetova

[1] Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2] RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan

The article is devoted to an issue of estimating the impurity gas amount in nuclear fuel in the aspect of the distracting contribution from released gases to the total pressure inside ampoule of the device in the simulating a severe accident with core melting. The paper presents a method based on measuring the pressure and temperature of gas in a closed values of the fuel elements during the fuel melting. The correctness of the developed methodology is confirmed by the results of experiments on the melting of fuel in a pulsed graphite reactor IGR with the implementation of a controlled neutron pulse.
Keywords: *pulsed graphite reactor IGR, in-reactor experiment, experimental testing, severe accident, pressure, impurity gases, fuel melting.*

https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-3-37-43
УДК 621.039.6; 533.9.08; 621.039.66

ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБИДИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Жанболатова Ғ.Қ., Миниязов А.Ж., Туленбергенов Т.Р., Соколов И.А., Букина О.С.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: kaiyrdy@nnc.kz

В данной работе представлены результаты исследования формирования карбидизированного слоя в различных экспериментальных условиях и выбора оптимальных параметров карбидизации поверхности вольфрама при плазменном облучении. Для исследования влияния температуры поверхности образца вольфрама и длительности плазменного облучения проводились эксперименты при температуре поверхности образца 1300 °С и 1700 °С при длительности облучения 300–2400 с. Анализ результатов исследований показал, что максимальное формирование W_2C на поверхности наблюдается при температуре испытаний 1700 °С. При температуре 1300 °С фазовый состав карбидизированного слоя зависит от длительности плазменного облучения. Согласно данным литературного анализа, образование WC происходит на поверхности вольфрама, из которого атомы углерода диффундируют внутрь, вследствие чего образуется нижележащий слой W_2C. С увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения и температуры поверхности образца диффузия C в W ускоряется, содержание WC уменьшается, и W_2C становится доминирующим карбидным соединением.

Ключевые слова: *метан, карбид вольфрама, покрытие, плазменное облучение, плазма, пучково-плазменный разряд.*

Введение

Как известно, вольфрам и углерод являются наиболее подходящими в качестве материалов, обращенных к плазме, для дивертора термоядерного реактора [1, 2]. В частности, в токамаке КТМ первая стенка будет выполнена из графита, а на подвижно-диверторном устройстве будут размещаться различные материалы, в том числе вольфрам [3]. Наличие различных материалов, а также примесей, в камере установки будет приводить к образованию смешанных слоев на обращенных к плазме поверхностях, которые могут повлиять на взаимодействие с изотопами водорода и гелия из пограничной плазмы. Для исследования диффузии изотопов водорода, гелия и их удержания в вольфраме со смешанными слоями на поверхности, в частности с карбидизированной поверхностью, имитируют процессы совместного осаждения W и C в диверторе токомака различными методами нанесения поверхностных покрытий.

Для получения тонких углеродных пленок на поверхности вольфрама используют различные методы, такие как магнетронное напыление, смешивание плазменных потоков W и C, химическое осаждение C из газовой фазы или испарение C при помощи электронно-лучевого испарителя [4–9].

В ряде работ немецкого профессора К. Линзмаейра [6–8] представлены исследования образования карбидов вольфрама после нанесения углеродных пленок на вольфрамовую подложку. Углеродные пленки наносились при комнатной температуре методом испарения с помощью электронно-лучевого испарителя. Зависимость карбидообразования от температуры исследовалась при дальнейшем отжиге вольфрамовой подложки с углеродной пленкой.

Основные результаты работы [6] показывают, что, начиная с температуры 500 °С, начинается образование W_2C. При температуре выше 600 °С эта фаза и весь остаточный углерод превращаются в WC. После нагрева до 1000 °С большая часть углерода прореагировала с вольфрамом с образованием WC. Во всех случаях нужная температура достигалась в течение 600 с и поддерживалась в течение 1800 с.

В работе [8] исследовано взаимодействие углеродных пленок с вольфрамовой подложкой при температуре отжига до 1430 °С. Сильная диффузия C устанавливалась при температурах выше 700 °С, что приводило к проникновению C в объем подложки и образованию карбидов. Первой образующейся карбидной фазой оставался W_2C, и при температурах выше 1200 °С доля WC увеличивалась.

На протяжении последних нескольких лет нами исследуется метод кабидизации поверхности вольфрама с применение плазмы пучково-плазменного разряда на плазменно-пучковой установке (ППУ). Для реализации данного метода в качестве плазмообразующего газа используется метан. Известно, что в системе W–C существуют два карбида: низший карбид вольфрама (W_2C) с гексагональной плотноупакованной решеткой, и высший карбид вольфрама (WC) с простой гексагональной решеткой [10]. На начальном этапе на ППУ были проведены эксперименты по карбидизации вольфрама при температуре поверхности образца 1000 °С с длительностью облучения плазмой 600 с. В этих условиях наблюдались пики невысокой интенсивности кристаллических фаз WC, W_2C [11]. В дальнейших работах были изменены параметры облучения, а именно температура поверхности образца и длительность облучения. Серия экспериментов на ППУ при постоянной температуре поверхности образца 1500 °C показала, что при данной температуре, в зависимости от времени облучения, процесс карбидизации может протекать с одновременным или последовательным образованием карбидных фаз W_2C и WC [12].

Карбидизация поверхности вольфрама на ППУ является относительно новым методом, имитирующим процессы осаждения C и образования карбидизированного слоя в диверторе токомака. Тем не менее, анализ литературы показал, что изменение температуры поверхности вольфрамового образца и времени экспозиции, вне зависимости от метода нанесения углеродных пленок, будет оказывать непосредственное влияние на поверхностную карбидизацию вольфрама. Однако вызывает интерес расширение диапазона условий карбидизации на ППУ. В связи с этим в данной работе представлены результаты экспериментальных работ, при которых температура поверхности образцов составляла 1300 °C и 1700 °C при длительности облучения 300–2400 с.

1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Описание установки

Эксперименты по получению карбидизированного слоя на поверхности W проводились на ППУ. ППУ была разработана в рамках создания и эксплуатации казахстанского материаловедческого токамака КТМ для испытаний малогабаритных образцов из конструкционных материалов и оборудования КТМ. Установка ориентирована на универсальность и возможность быстрой переналадки для решения различных специализированных задач

Основными узлами ППУ являются: электронная пушка, газоразрядная камера пучково-плазменного разряда (ППР), электромагнитная система для создания продольного магнитного поля, вакуумная камера взаимодействия ППР с материалом и диагностическая система плазмы. Общая схема установки приведена на рисунке 1. Подробное описание установки представлено в работах [11–14].

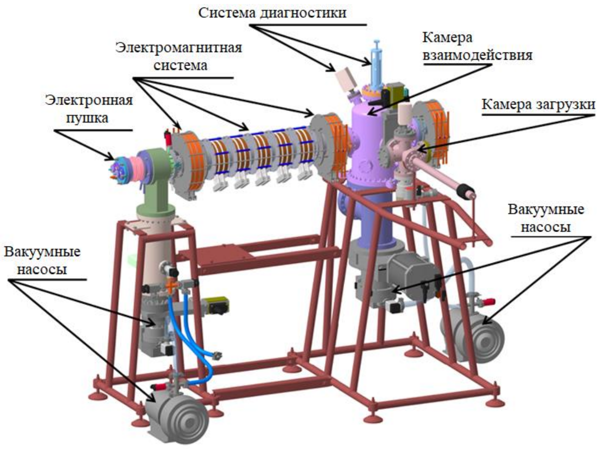


Рисунок 1. Принципиальная схема ППУ

1.2 Материалы и методы исследования

Для исследования влияния температуры и времени облучения на формирование карбидизированного слоя были подготовлены образцы из вольфрамового прутка ∅ 10 мм марки ВЧ в форме дисков толщиной 2±0,1 мм (S=0,75 см^2). Торцевая сторона (одна) всех заготовок подвергалась механической шлифовке и полировке до степени шероховатости Ra = 0,02 мкм. Образцы закреплялись в водоохлаждаемый коллектор при помощи молибденового держателя.

Перед проведением экспериментов по карбидизации образцы вольфрама отжигали на ППУ в режиме электронного пучка [14]. Температура образцов при отжиге составляла 1350±20 °C, длительность – 1 час.

Для карбидизации поверхности вольфрама на ППУ используется плазмообразующий газ в виде метана (CH_4 – 99,998 %). Давление рабочего газа составляло (1,3–1,4)·10^{-1} Па. Для изменения температуры образцов варьировалась мощность электронного пучка. Энергия ионов задавалась отрицательным потенциалом на мишенный узел и составляла 500 эВ. Условия проведения экспериментов представлены в таблице 1. Облучение проводилось при температуре поверхности образцов 1300 °C и 1700 °C с изменением длительности от 300 с до 2400 с.

Регистрация и контроль температуры на лицевой и тыльной поверхностях образцов осуществлялись с помощью пирометра марки IMPAC ISR 6 Advanced и вольфрам-рениевой термопары типа ВР-5/20 с подключением к одноканальному измерителю-регулятору ТРМ-201, соответственно.

Анализ остаточных газов в камере взаимодействия установки осуществлялся с помощью квадрупольного масспектрометра CIS-100. График парциальных давлений во время проведения экспериментов показан на рисунке 2.

Анализ состава плазмы в камере взаимодействия установки вблизи плоскости образца осуществлялся с помощью оптического спектрометр HR2000+ с регистрацией значений посредством программного обеспечения OceanView при времени интеграции 100 мс. Графики оптических спектров для двух выделенных температур поверхности образца показаны на рисунке 3.

Можно наблюдать линии при 655,9 нм и 485,6 нм, которые близки к первым двум линиям серии Бальмера для водорода H_α, H_β при 656,3 и 486,1 нм. Также присутствует линия 433,5 нм, близкая к третьей линии водорода Hγ (434,0 нм), хотя интенсивность линии меньше, чем у первых двух линий водорода. Наблюдается излучение возбужденных молекул CH около 430 нм. Линии, соответствующие углероду C, находятся в диапазоне длин волн 516–600 нм. Линии двухатомного водорода H_2 наблюдаются в диапазоне 600–640 нм наиболее интенсивно в этой области. Зафиксирован рост интенсивности пиков в зависимости от повышения температуры исследуемых образцов.

Таблица 1. Условия проведения экспериментов на ППУ

Образец	Мощность электронного пучка, Вт	Давление рабочего газа (метан), Па	Ионный ток, мА	Температура поверхности, °С	Длительность облучения, с
1	616	$1{,}01\cdot10^{-1}$	105	1300±10	300
2	1093	$1{,}02\cdot10^{-1}$	153	1700±10	300
3	499	$1{,}05\cdot10^{-1}$	103	1300±10	1200
4	958	$1{,}03\cdot10^{-1}$	142	1700±10	1200
5	530	$1{,}05\cdot10^{-1}$	106	1300±10	1800
6	1086	$1{,}01\cdot10^{-1}$	152	1700±10	1800
7	460	$1{,}01\cdot10^{-1}$	94	1300±10	2400
8	845	$1{,}10\cdot10^{-1}$	136	1700±10	2400

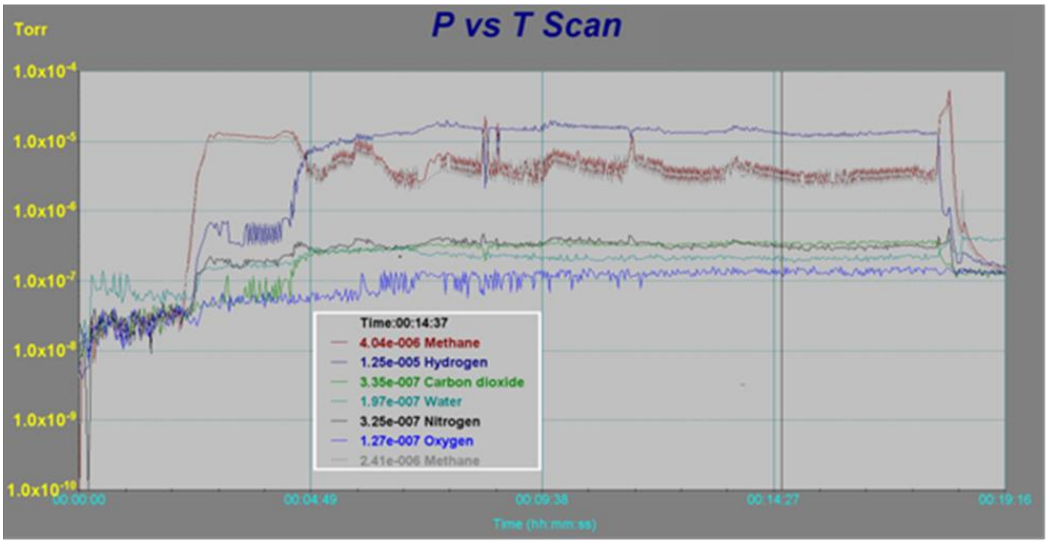


Рисунок 2. График парциальных давлений во время проведения экспериментов при температуре 1300 °С

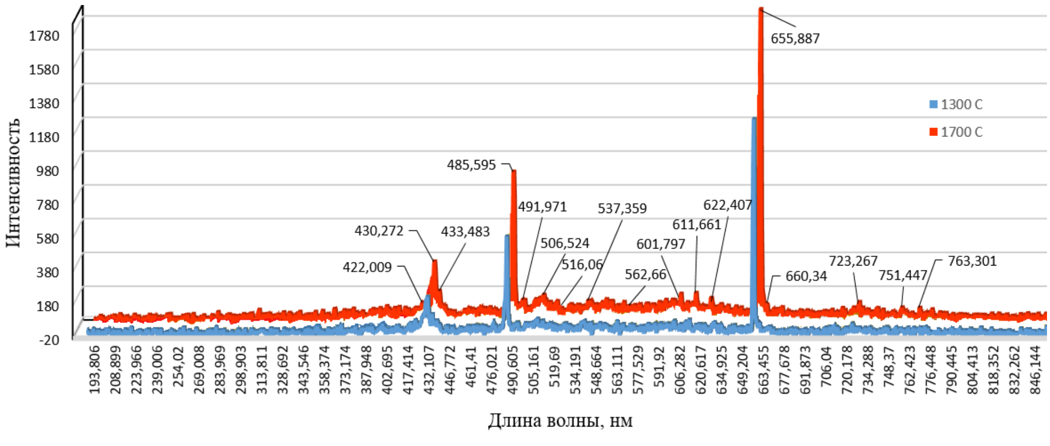


Рисунок 3. Сводный график спектров оптического излучения метановой плазмы (10^{-1} Па) в зависимости от условий проведения экспериментов

Для измерения локальных параметров плазмы использовался цилиндрический зонд Ленгмюра. По формуле Бома, сделана оценка плотности плазмы $n_e \sim 10^{19}$ м$^{-3}$. Оценка температуры теплового электронного компонента плазмы $\tau_e \sim 6{,}7$ эВ.

Съемка рентгеновских дифрактограмм образцов производилась на дифрактометре Empyrean в Cu Kα-излучении, со сканирующим линейным детектором PIXcel1D. Время экспозиции (время на шаг) при съемках составляло 30,6 с, размер шага сканирования для дифрактограмм 0,026º2θ, исследуемый угловой диапазон 5–153º2θ. Использовалась фиксированная щель расхождения с угловым расхождением 1°, антирассеивающая щель 2°, маска падающего пучка с маркировкой 20, обеспечивающая ширину падающего пучка 19,9 мм. Для чистого вольфрама толщина слоя проникновения составляет от 1,6 мкм (при угле 2θ ~40°) до 4,2 мкм (при угле 2θ ~135°). При условии содержания в составе образца карбидов вольфрама в диапазоне составов WC–W_2C, дифрактограммы несут информацию о структурном состоянии материала толщиной от 1,5–1,4 мкм (при угле 2θ ~30°) до 5,5–4,9 мкм (при угле 2θ ~135°).

Обработка дифрактограмм проводилась посредством программы для обработки и поиска “HighScore”. Процедуры обработки исходных дифрактограмм включали в себя отделение и удаление линий, соответствующих излучению $K\alpha_2$; определение фона; поиск пиков; поиск соответствия пиков по доступным базам данных без ограничений по известным параметрам; автоматическую идентификацию из списка кандидатов с высшими оценками; подгонку расчетного профиля по всему диапазону углов дифрактограммы с шагом ~40°2θ, при ограничении диапазона интенсивностей от 0 до 10% максимальной интенсивности (подгонка профиля приводит к формированию уточненных числовых значений параметров пиков, необходимых для определения фазового состава, анализа структурного состояния); пересмотр принятых эталонных карточек и поиск карточек в соответствии с известными данными (о химическом составе, пространственной группе и пр.).

Процедуры выполняются с помощью автоматизированной процедуры (“batch operation”) “IdeAll” ПО “HighScore”. Это обеспечивает одинаковость процедур поиска пиков и соответствия им эталонных карточек.

Для идентификации фазового состава использовалась база данных Crystallography Open Database [15] и база данных PDF-2 ICDD Release 2004.

2 Результаты и обсуждение

В процессе анализа фазового состава образцов замечено, что при наложении на дифрактограмму карточек дифрактометрических данных, соответствующих фазе вольфрама, экспериментальные интенсивности пиков не полностью совпадают с штрих-диаграммой применяемой карточки, несмотря на полное соответствие угловых положений. В связи с этим, для идентификации фазового состава, были применены карточки дифрактометрических данных металлического вольфрама № 00-004-0806, W_2C № 03-065-3896 и WC № 00-051-0939 [15]. На полученных дифрактограммах образцов, как видно из рисунка 4, наблюдаются дифракционные пики WC и W_2C.

В образце 1 основной фазой является фаза гексагонального W_2C. Пики низкой интенсивности идентифицируются как пики, принадлежащие WC и металлической фазе W. В фазовом составе образца 2 содержание фазы W_2C и фазы металлического W практически одинаково. Фаза WC отсутствует. В составе образца 3 основной фазой также является фаза W_2C гексагональной сингонии. Пики малой интенсивности идентифицируются как пики, принадлежащие фазе металлического W и фазе W_2C. Наивысшее содержание W_2C (более 95%) получено в фазовом составе поверхности образцов 4, 6, 8. Пики очень малой интенсивности, едва различимые над уровнем фона, идентифицируются как пики, принадлежащие фазе металлического W. В фазовом составе образца 5 основной фазой является W_2C, пики WC имеют меньшую интенсивность, а фаза металлического W исчезает. В составе образца 7 основной фазой является фаза WC гексагональной сингонии. Пики малой интенсивности идентифицируются как пики, принадлежащие фазе W_2C.

Результаты полуколичественного содержания рентгенофазового анализа образцов представлены в таблице 2.

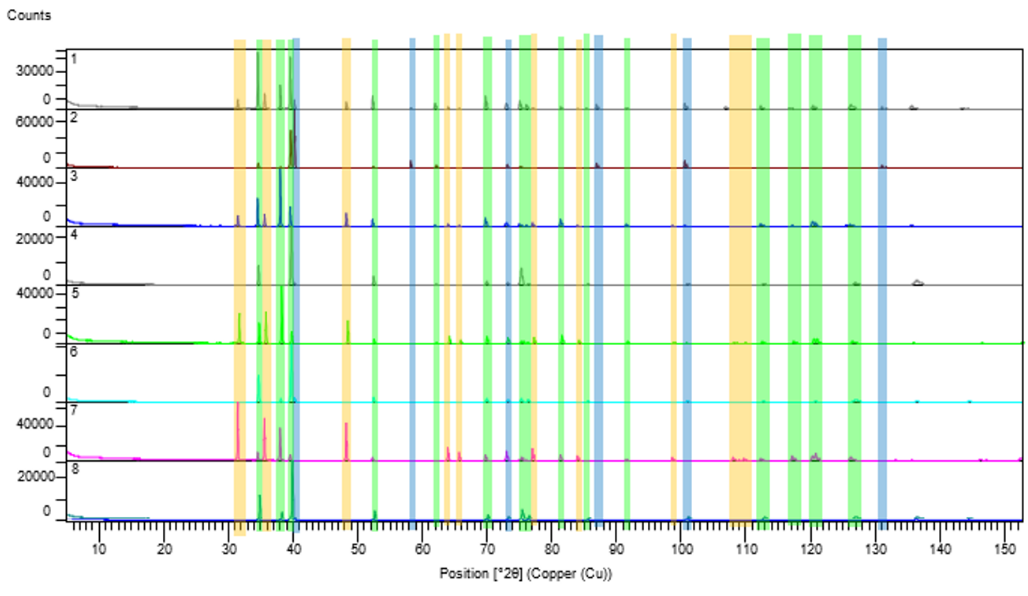


Рисунок 4. Дифрактограммы исследованных образцов (оранжевым цветом отмечены места локализации пиков фазы WC, зеленым – фазы W_2C, голубым – пики W)

Таблица 2. Результаты полуколичественного фазового анализа образцов

Образец	W (куб.)	WC (гекс., P-6m2)	W_2C (гекс., P-31m)
1	7,9	15,2	77,0
2	52,8	–	47,2
3	–	16,5	83,5
4	1,4	–	98,6
5	–	28,2	71,8
6	4,5	–	95,5
7	–	86,1	13,9
8	0,4	–	99,6

Согласно результатам рентгенофазового анализа диффузия углерода в вольфрам с одновременным образованием двух фаз карбидов вольфрама происходит после облучения уже при температуре 1300 °С. Однако, при данной температуре фазовое содержание отличается в зависимости от длительности облучения. Так при длительности облучения 2400 с основной фазой является фаза WC гексагональной сингонии, что объясняется увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения.

Из таблицы 2 видно, что после облучения образцов при температуре 1700 °С содержание фазы вольфрама на поверхности образца близко к нулю, указывая на то, что металлический вольфрам в приповерхностной области полностью прореагировал. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [6–9]. Наивысшее содержание фазы W_2C после облучения при температуре 1700 °С вне зависимости от длительности облучения объясняется ускорением диффузии С в W при высокой температуре.

Представленные результаты экспериментальных работ подтверждают предположение о влиянии температуры поверхности вольфрамового образца и времени его нахождения в среде CH_4 при плазменном облучении на формирование карбидизированного слоя на поверхности вольфрама.

Заключение

В данной работе были проведены исследования по формированию карбидизированного слоя на поверхности вольфрама в различных экспериментальных условиях с изменением температуры поверхности образца и длительности облучения в среде метана. Преимущества такого метода, реализованного на ППУ, заключается в создании условий для химических реакций и физических процессов, приближенных к возможным в термоядерных установках.

Анализ результатов исследований показал, что максимальное формирование W_2C на поверхности наблюдается при температуре 1700 °С. При температуре 1300 °С фазовый состав карбидизированного слоя зависит от длительности плазменного облучения. Согласно данным литературного анализа, образование WC происходит на поверхности вольфрама, из которого внутрь частицы диффундирует С и образует нижележащий слой W_2C. С увеличением флюенса ионов в зависимости от времени облучения и температуры поверхности образца диффузия С в W ускоряется, содержание WC уменьшается, и W_2C становится доминирующим карбидным соединением.

Можно сделать вывод о том, что при плазменном облучении на ППУ температура поверхности образца и длительность облучения оказывают существенное влияние на карбидизацию поверхности вольфрама.

Данная работа выполнена в рамках научно-технической программы № BR09158585 «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на казахстанском материаловедческом токамаке КТМ».

Литература

1. M. Merola, F. Escourbiac, R. Raffray, P. Chappuis, T. Hirai, A. Martin. Overview and status of ITER internal components // Fusion Eng. Des. – 2014. – V. 89. – P. 890–895.
2. S.E. Lee, Y. Hatano, M. Tokitani et al. Global distribution of tritium in JET with the ITER-like wall // Nuclear Materials and Energy. – 2021. – Vol. 26. – P. 100930
3. Tazhibayeva I.L. [et al.] KTM Experimental Complex Project Status // Fusion Science and Technology. – Vol. 47. – 2005. – P. 746–750.
4. Michael B.Z., Jingguang G.C. Synthesis, characterization and surface reactivity of tungsten carbide (WC) PVD films // Surface Science. – 2014. – Vol. 569. – P. 89–98.
5. Romanusa H., Cimallaa V., Schaefera J.A., Spieûb L., Eckec G., Pezoldtc J. Preparation of single phase tungsten carbide by annealing of sputtered tungsten-carbon layers // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 359. – P. 146–149.
6. J. Luthin, Ch. Linsmeier. Carbon films and carbide formation on tungsten // Surface Science. – 2000.– Vol. 454–456. – P. 78–82.
7. Ch. Linsmeier, J. Luthin, K. U. Klages, A. Wiltner and P. Goldstraß. Formation and Erosion of Carbon-Containing Mixed Materials on Metals // Physica Scripta. – 2004. – Vol. T111. – P. 86–91.
8. Ch. Linsmeier, M. Reinelt, K. Schmid. Surface chemistry of first wall materials – From fundamental data to modeling // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 415. – P. S212–S218.
9. P. Wang, W. Jacob. Deuterium diffusion and retention in a tungsten–carbon multilayer system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2014. – Vol. 329.– P. 6–13
10. Павлов Б.А., Терентьев А.П. Курс органической химии. – Издание шестое, стереотипное. – М.: Изд-во Химия, 1967. – С. 58.
11. Соколов И.А., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Туленбергенов Т.Р. Изучение процессов образования карбидов на поверхности дивертора термоядерного реактора. – Вестник КазНАЕН. – 2019. – Вып. 1.– С. 44–49.
12. Жанболатова Г.Қ., Бакланов В.В., Туленбергенов Т.Р., Миниязов А.Ж., Соколов И.А. Карбидизация поверхности вольфрама в пучково-плазменном разряде. – Вестник НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 4. – С. 77–81.

13. Патент РК № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленбергенов Т.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель РГП НЯЦ РК. – № 2016/0108.2; заявл. 29.02.2016; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5. – 3 с.
14. Kurnaev V., Vizgalov I., Gutorov K., Tulenbergenov T., Sokolov I., Kolodeshnikov A., Ignashev V., Zuev V., Bogomolova I., Klimov N. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463.–P. 228–232. – http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076.
15. Gražulis S., Chateigner D., Downs R.T., Yokochi A.F.T., Quirós M., Lutterotti L., Manakova E., Butkus J., Moeck P. and Le Bail A. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures // J. Appl. Cryst. – 2009. – Vol. 42. – P. 726–729.

REFERENCES

1. M. Merola, F. Escourbiac, R. Raffray, P. Chappuis, T. Hirai, A. Martin. Overview and status of ITER internal components // Fusion Eng. Des. – 2014. – V. 89. – P. 890–895.
2. S.E. Lee, Y. Hatano, M. Tokitani et al. Global distribution of tritium in JET with the ITER-like wall // Nuclear Materials and Energy. – 2021. – Vol. 26. – P. 100930
3. Tazhibayeva I.L. [et al.] KTM Experimental Complex Project Status // Fusion Science and Technology. – Vol. 47. – 2005. – P. 746–750.
4. Michael B.Z., Jingguang G.C. Synthesis, characterization and surface reactivity of tungsten carbide (WC) PVD films // Surface Science. – Vol. 569. – P. 89–98.
5. Romanusa H., Cimallaa V., Schaefera J.A., Spieûb L., Eckec G., Pezoldtc J. Preparation of single phase tungsten carbide by annealing of sputtered tungsten-carbon layers // Thin Solid Films. – 2000. – Vol. 359. – P. 146–149.
6. J. Luthin, Ch. Linsmeier. Carbon films and carbide formation on tungsten // Surface Science. – 2000.– Vol. 454–456. – P. 78–82.
7. Ch. Linsmeier, J. Luthin, K. U. Klages, A. Wiltner and P. Goldstraß. Formation and Erosion of Carbon-Containing Mixed Materials on Metals // Physica Scripta. – 2004. – Vol. T111. – P. 86–91.
8. Ch. Linsmeier, M. Reinelt, K. Schmid. Surface chemistry of first wall materials – From fundamental data to modeling // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 415. – P. S212–S218.
9. P. Wang, W. Jacob. Deuterium diffusion and retention in a tungsten–carbon multilayer system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2014. – Vol. 329.– P. 6–13
10. Pavlov B.A., Terent'ev A.P. Kurs organicheskoy khimii. – Izdanie shestoe, stereotipnoe. – Moscow.: Izd-vo Khimiya, 1967. – P. 58.
11. Sokolov I.A., Skakov M.K., Miniyazov A.Zh., Tulenbergenov T.R. Izuchenie protsessov obrazovaniya karbidov na poverkhnosti divertora termoyadernogo reaktora. – Vestnik KazNAEN. – 2019. – Issue 1.– P. 44–49.
12. Zhanbolatova Ғ.Қ., Baklanov V.V., Tulenbergenov T.R., Miniyazov A.Zh., Sokolov I.A. Karbidizatsiya poverkhnosti vol'frama v puchkovo-plazmennom razryade. – Vestnik NYaTs RK. – 2020. – Issue 4. – P. 77–81.
13. Patent RK № 2080. Imitatsionnyy stend s plazmenno-puchkovoy ustanovkoy / Kolodeshnikov A.A., Zuev V.A., Ganovichev D.A., Tulenbergenov T.R. [i dr.]; zayavitel' i patentoobladatel' RGP NYaTs RK. – No. 2016/0108.2; zayavl. 29.02.2016; opubl. 15.03.2017, Byul. No. 5. – 3 p.
14. Kurnaev V., Vizgalov I., Gutorov K., Tulenbergenov T., Sokolov I., Kolodeshnikov A., Ignashev V., Zuev V., Bogomolova I., Klimov N. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities // Journal of Nuclear Materials. – 2015. – Vol. 463.–P. 228–232. – http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076.
15. Gražulis S., Chateigner D., Downs R.T., Yokochi A.F.T., Quirós M., Lutterotti L., Manakova E., Butkus J., Moeck P. and Le Bail A. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures // J. Appl. Cryst. – 2009. – Vol. 42. – P. 726–729.

ПЛАЗМАЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНУ КЕЗІНДЕГІ ВОЛЬФРАМ БЕТІНІҢ КАРБИДИЗАЦИЯЛАНУЫН ЗЕРТТЕУ

Ғ.Қ. Жанболатова, А.Ж. Миниязов, Т.Р. Туленбергенов, И.А. Соколов, О.С. Букина

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазахстан

Бұл жұмыста әртүрлі тәжірибелік жағдайларда карбидтелген қабаттың түзілуін зерттеу нәтижелері және плазмалық сәулелену кезінде вольфрам бетін карбидизациялаудың оңтайлы параметрлерін таңдау берілген. Вольфрам үлгісінің бетінің температурасының әсерін және плазмалық сәулелену ұзақтығын зерттеу үшін 300–2400 с сәулелену ұзақтығымен 1300 °C және 1700 °C үлгі бетінің температурасында эксперименттер жүргізілді. Зерттеу нәтижелерін талдау бетінде W_2C максималды түзілуі 1700 °C сынақ температурасында байқалатынын көрсетті. 1300 °C температурада карбидтелген қабаттың фазалық құрамы плазмалық сәулелену ұзақтығына байланысты. Әдебиеттік талдауға сәйкес WC түзілуі вольфрам бетінде жүреді, одан C бөлшекке диффузияланып, W_2C астындағы қабатын құрайды. Сәулелену уақытына және үлгі бетінің температурасына байланысты иондар ағынының жоғарылауымен C-тың W-ға диффузиясы жылдамдайды, WC құрамы төмендейді, ал W_2C басым карбид қосылысына айналады.

Түйін сөздер: *метан, вольфрам карбиді, жабын, плазмалы сәулелену, плазма, шоқтық-плазмалық разряды.*

INVESTIGATION OF TUNGSTEN SURFACE CARBIDIZATION UNDER PLASMA IRRADIATION

G.K. Zhanbolatova, A.Zh. Miniyazov, T.R. Tulenbergenov, I.A. Sokolov, O.S. Bukina

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper presents the results of a study of the formation of a carbidized layer under various experimental conditions and the choice of optimal parameters for carbidization of a tungsten surface under plasma irradiation. To study the effect of the surface temperature of a tungsten sample and the duration of plasma irradiation, experiments were carried out at a sample surface temperature of 1300 °C and 1700 °C with an irradiation duration of 300–2400 s. Analysis of the research results showed that the maximum formation of W_2C on the surface is observed at a test temperature of 1700 °C. At a temperature of 1300 °C, the phase composition of the carbidized layer depends on the duration of plasma irradiation. According to the literature analysis, the formation of WC occurs on the surface of tungsten, from which C diffuses into the particle and forms the underlying layer of W_2C. With an increase in the ion fluence, depending on the irradiation time and the temperature of the sample surface, the diffusion of C into W accelerates, the WC content decreases, and W_2C becomes the dominant carbide compound.

***Keywords**: methane, tungsten carbide, coating, plasma irradiation, plasma, beam-plasma discharge.*

СПИСОК АВТОРОВ

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи для публикации в журнале отправляются авторами после регистрации на веб-сайте журнала в электронном виде в формате MS WORD (.docx), а после принятия решения о публикации статьи редакцией (по окончании процесса проверки и рецензирования) – и в виде печатной копии окончательной редакции статьи с согласием авторов на публикацию и их подписями (по почте, курьером и пр. в адрес редакции).

Текст печатается на листах формата А4 (210× 297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (600–2400 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используйте шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов. Пожалуйста, используйте встроенные стили заголовков (Заголовок 1, 2…) только для названия статьи и заголовков подразделов, и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисуночных подписей.

В левом верхнем углу первой страницы должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами, в одном абзаце. После этого печатается текст краткой аннотации на языке статьи (100–3000 символов), и отдельной строкой (после фразы Ключевые слова:) – ключевые слова (5–10). Далее, со следующего абзаца – основной текст, содержащий разделы: Введение, Основную часть и Результаты (возможно, с подразделами), Заключение. После текста статьи приводится список литературы (на языках оригиналов) и блоки «название статьи, аннотация, ключевые слова) на двух оставшихся языках.

Обратите внимание, что ФИО авторов и представляемые организации в статье указывать не нужно, т.к. статьи проходят двойное «слепое» рецензирование. Эту информацию необходимо будет заполнить на трех языках (русском, казахском, английском) в форме на веб-сайте при подаче статьи. Рекомендуем заранее подготовить ее в виде отдельного документа с таблицами по образцу (см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице) и приложить к статье.

Для текста статьи используйте одинарный межстрочный интервал, между абзацами не нужно вставлять пустые абзацы и строки.

Не используйте таблицы для расположения иллюстраций и подрисуночных подписей, а также средства рисования MS Word поверх иллюстраций.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Окончательная редакция статьи, прошедшая рецензирование и допущенная к публикации, должна содержать блоки на трех языках – казахском, английском и русском, с указанием названия статьи, фамилий, имен, отчеств авторов, полного названия организаций, городов и стран местонахождения, которые они представляют, аннотации объемом 100–250 слов (600 печатных знаков), и ключевых слов (5–10).
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных […] скобках по мере упоминания. Список литературы приводится по ГОСТ 7.1-2003.
- Пожалуйста, не используйте механизм автоматической нумерации (поля) MS Word для нумерации ссылок на литературу, списков, рисунков и таблиц – используйте обычный текст;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см). Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. Файлы рисунков должны быть представлены отдельно в одном из растровых – .tif, .png (для схем и рисунков с надписями), .jpg (для фото) с разрешением 300 dpi (~1000 px для рисунков шириной 8 см и ~1800 px для рисунков шириной 14 см) или векторных – .svg, .wmf, .emf форматах. Названия файлов должны соответствовать положению в статье (напр. Рисунок 1-a.tiff). Для надписей на рисунках предпочтительно использовать шрифт Arial Narrow или аналогичный (узкий шрифт без засечек).
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как уравнения MS Word или формулы MathType. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.
- Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. Бумажная версии статья должна быть в конце подписана авторами.

К статье прилагаются следующие документы:

1) *Сопроводительное письмо от авторов*, в котором должны содержаться сведения о том, что статья может быть опубликована в открытой печати, ранее не была опубликована, не находится на рассмотрении на предмет публикации в других изданиях, статья не содержит информации, способной привести к конфликту интересов.
2) *Файлы рисунков.*

Название статьи, аннотация, ключевые слова, а также сведения обо всех авторах статьи заполняются на 3-х языках (русском, казахском, английском) в форме на сайте при подаче статьи (эту информацию также желательно приложить к статье в виде отдельного файла – см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице).

Дополнительную актуальную информацию по оформлению, подготовке статей, авторским правам, регистрации можно получить на веб-сайте журнала в разделе **Правила для авторов** (https://journals.nnc.kz/jour/about/submissions).

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

ОБРАЗЕЦ

Название статьи (на русском языке)

Таблица 1. Авторы (на русском языке)

Порядковый номер автора статьи	Фамилия	Имя полностью	Отчество полностью (если имеется)	Должность	Ученая степень	Телефон (без скобок, пробелов и дефисов)	Электронная почта	Номера организаций, которые представляет автор (из таблицы 2)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зав. лаб.	к.ф.-м.н.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на русском языке)

Порядковый номер организации	Наименование	Полный почтовый адрес (индекс, страна, город, улица, дом)	Официальный веб-сайт (если имеется)
1	Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2	www.enu.kz
2	Астанинский филиал Института ядерной физики МЭ РК	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, пр. Абылай хана, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на казахском языке)

Таблица 1. Авторы (на казахском языке)

Мақала авторының реттік нөмірі	Тегі	Толық аты	Әкесінің толық аты (болса)	Лауазымы	Ғылыми дәрежесі	Телефоны (жақшасыз, бос орынсыз және дефиссіз)	Электрондық поштасы	Автор ұйымдарының нөмірлері (2-кестеден)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зертхана меңгерушісі	ф.-м.ғ.к.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на казахском языке)

Ұйымның реттік нөмірі	Атауы	Толық пошталық мекенжайы (индекс, ел, қала, көше, үй)	Ресми веб-сайт (болса)
1	Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Сәтпаев көшесі, 2	www.enu.kz
2	ҚР ЭМ Ядролық физика институтының Астана филиалы	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Абылай хан даңғылы, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на английском языке)

Таблица 1. Авторы (на английском языке)

Order number of author's article	Surname	Full Name	Full Middle Name (if any)	Position	Academic degree	Telephone (free of brackets, gaps and hyphens)	E-mail	Numbers of organizations representing by author (from Table 2)
1	Ivanov	Ivan	Ivanovich	Associate professor	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Petrov	Peter	Petrovich	Chief of laboratory	Cand. of Phys. and Math. Sc.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на английском языке)

Order number of organization	Title	Full post address (zip code, country, city, street, house)	Official web-site (if any)
1	L.N. Eurasian National University	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, Satpayev st. 2	www.enu.kz
2	Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics ME RK	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, ave. Abylai Khan, 2/1	www.inp.kz

Примечание: если информация отсутствует – оставляйте соответствующие ячейки таблицы пустыми.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк
тел. +7 (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. +7 (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
https://journals.nnc.kz/jour

Свидетельство о постановке на учет №17039-Ж от 13.04.2018 г.
Выдано Комитетом информации Министерства информации и коммуникаций Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б