

МРНТИ 58.34.09; 58.34.33

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v84.i1.08>Д.С. Сайранбаев<sup>1</sup> , А.А. Шаймерденов<sup>1</sup> , А.М. Аханов<sup>1\*</sup> , П.П. Сильнягин<sup>1</sup> ,Ш.Х. Гизатулин<sup>1</sup> , Б.Б. Шакиров<sup>1</sup> , С.В. Ударцев<sup>2</sup> <sup>1</sup>Институт ядерной физики, Казахстан, г.Алматы<sup>2</sup>Ульбинский металлургический завод, Казахстан, г.Усть-Каменогорск\*e-mail: [aakhanov@inp.kz](mailto:aakhanov@inp.kz)

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ОБРАЗЦОВ БЕРИЛЛИДА ТИТАНА В РЕАКТОРЕ ВВР-К

В термоядерном реакторе для поддержания нейтронного баланса планировалось использовать металлический бериллий как материал размножитель нейтронов. Однако, металлический бериллий имеет ряд недостатков, связанных с его поведением при взаимодействии с нейтронами. Исходя из этого, в настоящее время в качестве материала-кандидата для размножения нейтронов в термоядерном реакторе рассматривается бериллид титана, имеющий ряд преимуществ по сравнению с металлическим бериллием. Экспериментальных данных о поведении бериллида титана в условиях нейтронного облучения недостаточно и, в основном, все имеющиеся данные относятся к бериллиду титана, изготовленному не в промышленных масштабах. А на Ульбинском металлургическом заводе (Казахстан) разработана и отработана технология производства бериллида титана в промышленных масштабах. Это нас мотивировало начать исследования поведения бериллида титана, изготовленного на Ульбинском металлургическом заводе, в условиях длительного нейтронного облучения на реакторе ВВР-К.

Целью данной работы является прогнозирование температурных режимов при облучении бериллида титана в центральном канале реактора ВВР-К. Для этого применялся комплекс COMSOL Multiphysics в котором реализован метод конечно-элементного анализа. Теплофизический анализ облучательного эксперимента на реакторе ВВР-К показал, что температура образцов бериллида титана не превысит 83°C при облучении в рассмотренной позиции. Ожидаемый градиент температур по капсуле составит не более 20 °C, при этом ожидаемый градиент температур по подкапсулам будет менее 7 °C. Таким образом рассчитанные температурные параметры полностью соответствуют задачам реакторного эксперимента, а именно длительному облучению образцов бериллида титана при температурах ~ 80±15°C.

**Ключевые слова:** температурное поле, бериллид титана, реактор ВВР-К, анализ, радиационный разогрев.

Д.С. Сайранбаев<sup>1</sup>, А.А. Шаймерденов<sup>1</sup>, А.М. Аханов<sup>1</sup>, П.П. Сильнягин<sup>1</sup>,Ш.Х. Гизатулин<sup>1</sup>, Б.Б. Шакиров<sup>1</sup>, С.В. Ударцев<sup>2</sup><sup>1</sup>Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.<sup>2</sup>Үлбі металлургиялық зауыты, Қазақстан, Өскемен қ.\*e-mail: [aakhanov@inp.kz](mailto:aakhanov@inp.kz)

## ССР-Қ реакторындағы титан бериллид үлгілерінің сәулелену тәжірибесін термофизикалық талдау

Термоядролық реакторда нейтрондық тепе-теңдікті сақтау үшін нейтрондарды көбейткіш материал ретінде металл бериллийді пайдалану жоспарланды. Дегенмен, металл бериллийдің нейтрондармен әрекеттесу кезіндегі іс-әрекетіне байланысты бірқатар кемшіліктері бар. Осыған сүйене отырып, металдық бериллийге қарағанда бірқатар артықшылықтары бар титан бериллиді қазіргі уақытта термоядролық реакторда нейтрондарды көбейтуге үміткер материал ретінде қарастырылуда. Титан бериллидінің нейтрондық сәулелену кезіндегі әрекеті туралы тәжірибелік деректер аз және тұтастай алғанда барлық қолда бар деректер өнеркәсіптік ауқымға сәйкес емес өндірілген титан бериллидіне жатады. Ал Үлбі металлургиялық зауытында (Қазақстан) өнеркәсіптік ауқымда титан бериллиді өндіру

технологиясы әзірленіп, сынақтан өтті. Бұл бізге Үлбі металлургиялық зауытында өндірілетін титан бериллидінің ССР-Қ реакторында ұзақ мерзімді нейтронды сәулелену жағдайында әрекетін зерттеуді бастауға түрткі болды.

Бұл жұмыстың мақсаты - ССР-Қ реакторының орталық каналында титан бериллидінің сәулеленуі кезіндегі температуралық режимдерді болжау. Ол үшін соңғы элементтерді талдау әдісін жүзеге асыратын COMSOL Multiphysics кешені пайдаланылды. ССР-Қ реакторындағы сәулелендіру тәжірибесінің термофизикалық талдауы титан бериллиді үлгілерінің температурасы қарастырылған позицияда сәулелендіру кезінде 83°C аспайтынын көрсетті. Капсуладағы күтілетін температура градиенті 20°C аспайды, ал субкапсулалар бойынша күтілетін температура градиенті 7°C-ден аз болады. Осылайша есептелген температура параметрлері реактор тәжірибесінің міндеттеріне толығымен сәйкес келеді, атап айтқанда, титан бериллид үлгілерін  $\sim 80 \pm 15$  °C температурада ұзақ уақыт сәулелендіру.

**Түйін сөздер:** температуралық өріс, титан бериллиді, ССР-Қ реакторы, талдау, радиациялық қыздыру.

D.S. Sairanbayev<sup>1</sup>, A.A. Shaimerdenov<sup>1</sup>, A.M. Akhanov<sup>1</sup>, P.P. Silnyagin<sup>1</sup>,  
Sh.Kh. Gizatulin<sup>1</sup>, B.B. Shakirov<sup>1</sup>, S.B. Udartsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Ulba Metallurgical Plant, Oskemen, Kazakhstan

\*e-mail: [aakhanov@inp.kz](mailto:aakhanov@inp.kz)

### Thermophysical analysis of the irradiation experiment of titanium beryllide samples in the WWR-K reactor

In a fusion reactor, it was planned to use metallic beryllium as a neutron multiplier material to maintain neutron balance. However, metallic beryllium has a few disadvantages associated with its behavior when interacting with neutrons. On this basis, titanium beryllide, which has several advantages over metallic beryllium, is currently considered as a candidate material for neutron multiplication in a fusion reactor. Experimental data on the behavior of titanium beryllide under conditions of neutron irradiation are insufficient and, in general, all available data refer to titanium beryllide produced not on an industrial scale. The Ulba Metallurgical Plant (Kazakhstan) has developed and tested a technology for producing titanium beryllide on an industrial scale. This motivated us to begin studying the behavior of titanium beryllide produced at the Ulba Metallurgical Plant under conditions of long-time neutron irradiation in the WWR-K reactor.

The purpose of this work is to predict the temperature conditions during irradiation of titanium beryllide in the central channel of the WWR-K reactor. For this purpose, the COMSOL Multiphysics package was used, in which the finite-element analysis method was implemented. Thermophysical analysis of the irradiation experiment on the WWR-K reactor showed that the temperature of titanium beryllide samples will not exceed 83°C during irradiation in the considered position. The expected temperature gradient along the capsule will be no more than 20 °C, while the expected temperature gradient along the subcapsules will be less than 7 °C. Thus, the calculated temperature parameters fully correspond to the objectives of the reactor experiment, namely, long-time irradiation of titanium beryllide samples at temperatures  $\sim 80 \pm 15$ °C.

**Key words:** temperature field, titanium beryllide, WWR-K reactor, analysis, radiation heating.

#### Введение

В настоящее время бериллид титана рассматривается как материал-кандидат размножителя нейтронов для концепции твердотельного, охлаждаемого гелием, бланкета термоядерного реактора DEMO [1]. Нейтронный размножитель планируется изготовить из монолитного бериллида титана призматической формы. Основными преимуществами бериллида титана по сравнению с металлическим бериллием

являются более высокая температура плавления, слабое взаимодействие с водой и меньшее радиационное распухание [2-5]. Однако, перед окончательным выбором материала необходимо его охарактеризовать так как такой материал должен выдерживать тяжелые условия эксплуатации в термоядерном реакторе, в том числе и при облучении нейтронами. Взаимодействие нейтронов с атомами материала порождает каскады атомных смещений, в которых могут образовываться отдельные

точечные дефекты (вакансии и междоузлия). Также в материале происходит трансмутация индуцированная нейтронами, в частности, облучение нейтронами бериллида титана приводит к накоплению таких газов как гелий-4, гелий-3 и тритий. При высоких температурах эти газы высвобождаются в массив материала, что приводит к его набуханию и охрупчиванию [6]. Следовательно, актуальными и важными являются работы, направленные на изучение поведения бериллида титана в условиях нейтронного облучения.

Свойства материала также зависят от технологии изготовления. Известны следующие основные технологии изготовления бериллида титана: метод искро-плазменного спекания [7,8], метод горячего выдавливания в виде стержней [9,10], методы дуговой плавки и горячего изостатического прессования [11-14]. Однако, все эти методы имеют ограничения, связанные с невозможностью производить бериллид титана в промышленных масштабах. В связи с этим, на Ульбинском металлургическом заводе (Казахстан) была разработана и отработана технология промышленного производства бериллида титана, в основе которой лежит метод порошковой металлургии [15].

В 2022 году, на базе реактора ВВР-К, были начаты научно-исследовательские работы, направленные на характеризацию образцов бериллида титана, изготовленных на Ульбинском металлургическом заводе [16, 17]. В настоящей работе приведены результаты теплофизического анализа облучения образцов бериллида титана в реакторе ВВР-К, в специальной конструкции капсулы, обеспечивающей относительно низкие температуры облучаемых материалов.

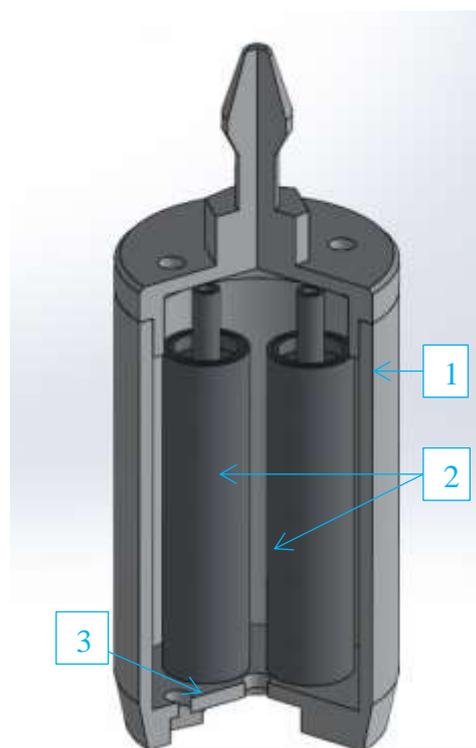
### Материалы и методы

В облучательном эксперименте на реакторе ВВР-К будут исследоваться образцы интерметаллического соединения бериллия и титана – бериллид титана ( $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ ), изготовленные промышленным методом на Ульбинском металлургическом заводе. Образцы представляют собой пластины с размерами  $8 \times 8,5 \times 1,5$  мм. Масса одного образца составляет 0,24 г. Плотность бериллида титана составляет  $2,24 \text{ г/см}^3$ .

Облучение образцов будет проводиться в штатной капсуле реактора ВВР-К, но образцы будут размещаться в специально разработанных подкапсулах. В капсуле могут быть размещены до трех подкапсул с образцами. Подкапсулы заполняются инертным газом (аргоном) под атмосферным давлением после установки в них

образцов. Снаружи подкапсулы охлаждаются водой первого контура реактора ВВР-К. Внутренний диаметр подкапсулы составляет 14 мм, а высота 61 мм. Капсула и подкапсулы изготавливаются из алюминиевого сплава САВ-1. Для сохранения фиксированного зазора между подкапсулами и подкапсулами с внутренней стенкой капсулы используются специальные дистанционаторы. Трехмерное изображение капсулы с подкапсулами в разрезе показано на рисунке 1. В дальнейшем верхняя крышка капсулы откручивается, а верхняя часть подкапсул разрезается в горячей камере для извлечения образцов.

Облучение образцов рассмотрено для центрального канала активной зоны реактора ВВР-К, при этом капсула расположена в самой нижней облучательной позиции. Подробная информация о реакторе ВВР-К приведена в [18,19].



**Рисунок 1** – 3D вид штатной облучательной капсулы: 1 – капсула; 2 – подкапсулы; 3 – отверстие для протока теплоносителя

Теплофизические расчеты проведены комплексом COMSOL Multiphysics [20], предназначенного для моделирования комплексных физических задач. Для расчета применялась трехмерная геометрия, физически реально, отображающая строение и размеры капсулы с образцами бериллида титана, а также

окружающую его часть облучательного канала (области воды сверху и снизу капсулы, стенку облучательного канала из алюминиевого сплава и 1-мм водяной зазор между стенкой канала и капсулой). Для описания теплофизических свойств материалов использовалась стандартная библиотека материалов COMSOL. Это означает, что все необходимые для теплового расчета параметры (теплопроводность  $k$ , теплоемкость при постоянном давлении  $C_p$  и плотность  $\rho$ ) и их температурные зависимости взяты из апробированного источника.

Исходными условиями для задачи считалось температура всех материалов модели равная  $40^\circ\text{C}$ . Давление воды равно атмосферному с учетом гидростатической добавки на высоту водяного столба, абсолютное давление аргона в капсулах считается равным 100 кПа. Тепловые контакты идеальны и не нарушаются в ходе нагрева. Фазовые изменения свойств воды других материалов в ходе нагрева не учитываются.

Поскольку нецелесообразно включать в модель весь объем воды в канале (примерно 2 метра водяного столба над пеналом и 1 метр - под ним), то на верхней и нижней границах водяного домена указаны граничные условия конвекционного теплообмена с основной массой воды канала по закону

$$Q_0 = h \cdot (T_{ext} - T) \quad (1)$$

где  $Q_0$  – удельный поток конвективного тепла на единицу площади;  $T$  – температура воды в окрестности пенала (расчетное значение),  $T_{ext}$  – внешняя температура воды в системе охлаждения реактора;  $h = 0.3 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$  – коэффициент конвекции для нагретой воды.

В настройках модели было присвоено тепловыделение материалам, выделяющим тепло под воздействием нейтронного и фотонного излучений (сплав САВ и бериллид титана). В модели учитывается излучательный теплообмен между капсулой и стенкой канала (через воду) по закону Стефана Больцмана. Эмиссионные свойства поверхностей равны  $\varepsilon=0.3$ .

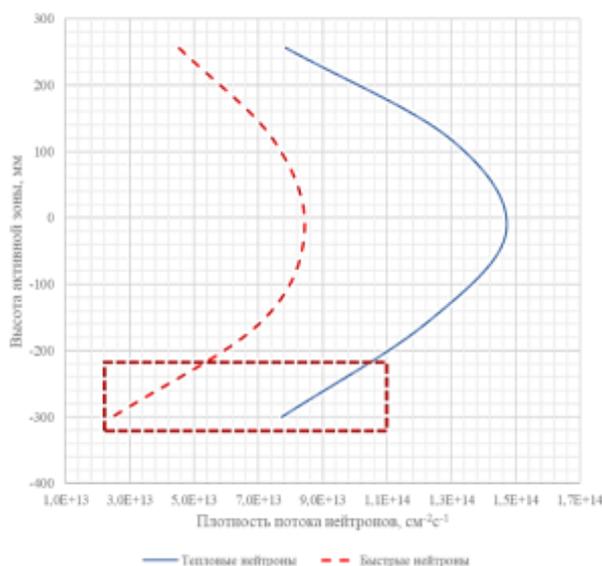
Для описания ламинарных потоков воды и аргона при их свободной конвекции вода задается в модели как слабосжимаемая жидкость, а аргон как несжимаемый газ. Все поверхности, омываемые водой и аргоном, указаны как поверхности трения (No Slip) при всех скоростях течения. На воду действует направленная вниз сила тяжести, обеспечивающая, при наличии перепада температур, условие возникновения тепловой конвекции воды.

## Результаты и обсуждение

Нейтронно-физические условия в облучательной позиции, где будет размещена капсула с образцами бериллида титана приведены в таблице 1. Высотное распределение плотности потока тепловых и быстрых нейтронов в облучательной позиции показано на рисунке 2. Значение «0» на рисунке 2 соответствует центральной плоскости активной зоны, а выделенная прямоугольная область показывает место расположения облучательной капсулы.

**Таблица 1.** Нейтронно-физические условия в невозмущенной облучательной позиции

Параметр	Значение
Плотность потока тепловых нейтронов ( $<0,625 \text{ эВ}$ ), $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$7,7 \cdot 10^{13}$
Плотность потока быстрых нейтронов ( $>0,1 \text{ МэВ}$ ), $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$2,4 \cdot 10^{13}$
Интегральная плотность потока гамма-квантов, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{14}$

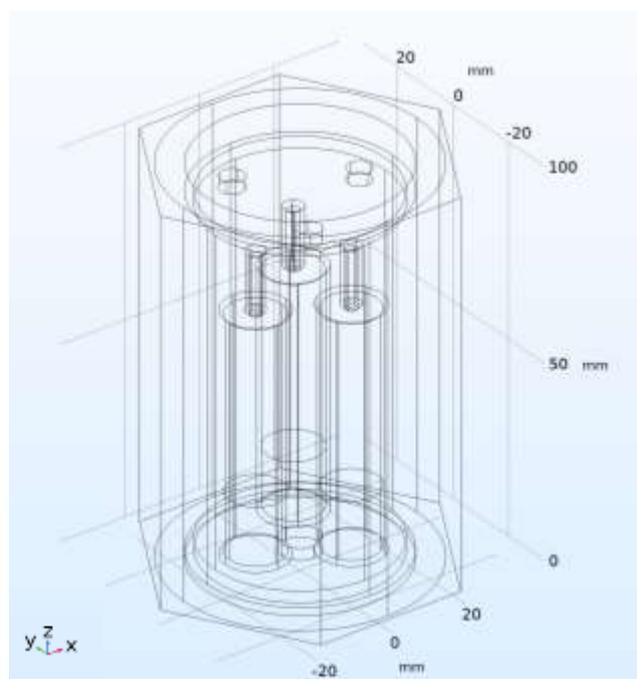


**Рисунок 2** – Высотное распределение плотности потока нейтронов

В каждой подкапсуле размещаются по десять образцов, установленные друг на друга. Радиационный разогрев образцов и конструкционных материалов капсулы приведены в таблице 2. В теплофизических расчетах радиационный разогрев во всех образцах был принят одинаковым. Геометрия расчетной модели показана на рисунке 3.

**Таблица 2.** Радиационный разогрев в конструкционных материалах и образцах бериллида титана

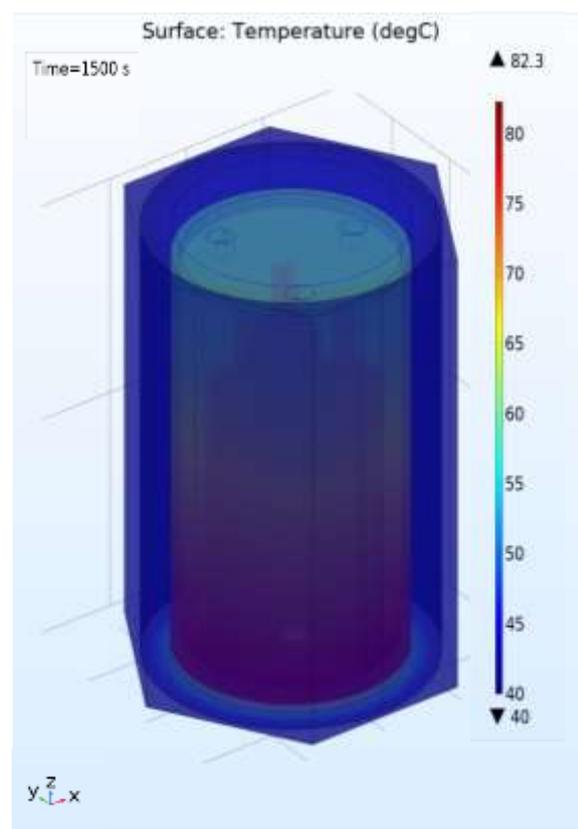
Наименование	Материал	Энерговыделение, Вт	Удельное энерговыделение, Вт/г
Капсула	Al	118,8	1,65
Подкапсула	Al	15,4	1,58
Образцы	Be <sub>12</sub> Ti	3,0	1,28



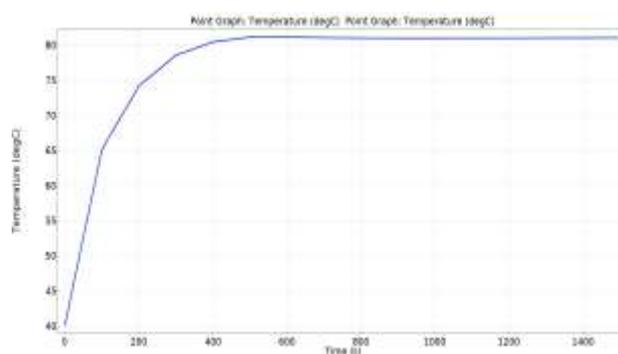
**Рисунок 3** – Геометрия расчетной модели

Алюминиевая капсула имеет три верхних входных отверстия для циркуляции воды и одно нижнее. Энерговыделение капсулы составляет практически 120 Вт при облучении в рассмотренной позиции. В подкапсулах образцы уложены друг на друга, и общая высота составляет 15 мм. При этом энерговыделение от образцов бериллида титана составляет 3 Вт.

Теплогидравлический расчет производился в режиме Time Dependent для времени 1500 секунд. На рисунке 4 ниже показан общий трехмерный вид распределения температуры по облучательной капсуле (модели) на момент времени 1500 секунд. Как показано на рисунке 5, стационарное распределение температур по капсуле и образцам достигается уже к моменту времени 600-700 секунд от начала нагрева. При этом разогрев образцов во всех подкапсулах примерно одинаковый.

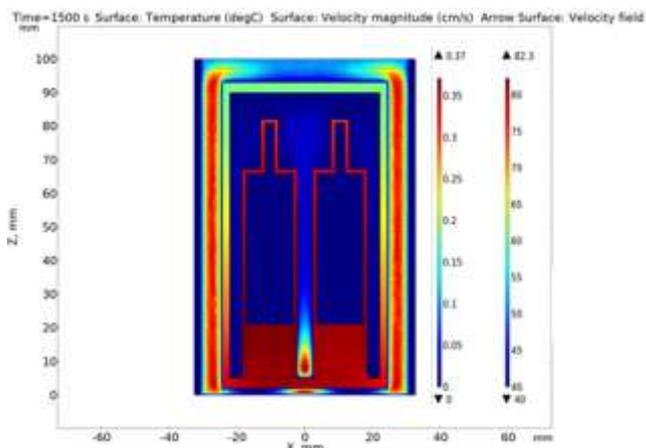


**Рисунок 4** – Трехмерное распределение температуры по капсуле

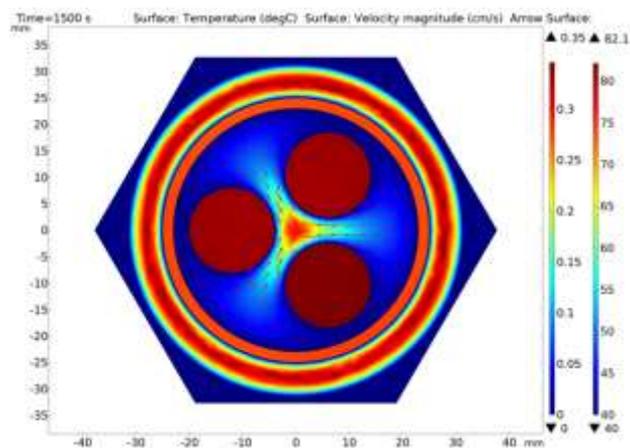


**Рисунок 5** – Динамика разогрева образцов

На рисунках 6 и 7 показаны вертикальный и горизонтальный разрезы капсулы с двумерным распределением температуры и скорости движения воды. На рисунке 7 показано поперечное распределение температур и скоростей на уровне высоты образцов  $h=10$  мм (по аксиальному центру).



**Рисунок 6** – Распределение температуры и скорости течения воды в вертикальной плоскости YZ (X=6 mm)



**Рисунок 7** – Распределение температуры и скорости течения воды по горизонтальной плоскости

### Вывод

Теплофизический анализ облучательного эксперимента на реакторе ВВР-К показал, что температура образцов бериллида титана не превысит 83°C при облучении в рассмотренной позиции. Стационарное распределение максимальных температур по капсуле установится примерно через 10-12 минут после начала разогрева. Ожидаемый градиент температур по капсуле составит не более 20 °C (температура элементов капсулы будет в интервале от 60 до 80°C), ожидаемый градиент температур по подкапсулам будет менее 7 °C (температура элементов подкапсулы будет в интервале от 75 до 82°C).

Максимальная скорость движения воды не превысит 10 мм/сек, средняя скорость воды в зазоре канал-капсула составит 3 мм/сек.

Таким образом рассчитанные температурные параметры полностью соответствуют задачам реакторного эксперимента, а именно длительному облучению образцов бериллида титана при температурах  $\sim 80 \pm 15^\circ\text{C}$ .

### Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант №AP14871445).

### Литература

- 1 Hernández F.A., Pereslavitsev P., Zhou G., Kang Q., D'Amico S., Neuberger H., Boccaccini L.V., Kiss B., Nádas G., Maqueda L., Cristescu I., Moscato I., Ricapito I., Cismondi F., Consolidated design of the HCPB Breeding Blanket for the pre-Conceptual Design Phase of the EU DEMO and harmonization with the ITER HCPB TBM program // Fusion Engineering and Design. – 2020. – Vol. 157. – Art.No 111614.
- 2 Munakata K., Kawamura H., Uchida M. Stability of titanium beryllide under water vapor // Journal of Nuclear Materials. – 2004. – Vol. 329-333. – P. 1357-1360.
- 3 Munakata K., Kawamura H., Uchida M. Reaction of titanium beryllide with water vapor // Fusion Engineering and Design. – 2005. – Vol.75-79. – P. 997-1002.
- 4 Munakata K., Kawamura H., Uchida M. Surface reaction of titanium beryllide with water vapor // Fusion Engineering and Design. – 2006. – Vol. 81. – P. 993-998.
- 5 Mishima Y., et al. Present status of beryllides for fusion and industrial applications in Japan // Fusion Engineering and Design. – 2007. – Vol. 82. – P. 91-97.
- 6 Bachurin D.V., & Vladimirov P.V. Ab initio study of Be and Be 12 Ti for fusion applications // Intermetallics. – 2018. – Vol.100. – P.163–170.
- 7 Wada K., et al. Oxidation resistance of Be12Ti fabricated by plasma-sintering method // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 442. – P.494-496.
- 8 Kim Jae-Hwan, Nakamichi M. Oxidation behavior of plasma sintered beryllium-titanium intermetallic compounds as an advanced neutron multiplier // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 438. – P. 218-223.
- 9 Kurinskiy P., et al. Production of Be-Ti and Be-Zr rods by extrusion and their characterization // Fusion Engineering and Design. – 2018. – Vol. 136. – P.49-52.

- 10 Gaisin R., et al. Effect of HIP at 800 and 900 °C on microstructure and properties of extruded Be-Ti composites // Nuclear Materials and Energy. – 2020. – Vol. 24. – Art.No 100771.
- 11 Gaisin R., et al. Synthesis of Be<sub>12</sub>Ti compound via arc melting or hot isostatic pressing // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 818. – Art.No 152919.
- 12 Kurinskiy P., et al. Characterisation of titanium beryllides with different microstructure // Fusion Engineering and Design. –2009. – Vol. 84. –P. 1136-1139.
- 13 Kurinskiy P., et al. Hot extrusion of Be-Ti powder // Fusion Engineering and Design. –2015. – Vol. 98-99. – P.1817-1820.
- 14 Gaisin R., et al. Effect of HIP at 1000-1200 °C on microstructure and properties of extruded Be-Ti composites // Nuclear Materials and Energy. – 2022. – Vol. 30. – Art.No 101128.
- 15 Gaisin R., Chakin V., Vladimirov P., Hernández F.A., Udartsev S., Vechkutov A., Kolmakov M. Industrial-scale manufacturing experience of titanium beryllide block for DEMO blanket application // Fusion Engineering and Design. – 2020. – Vol.161. – Art.No 111862.
- 16 Shaimerdenov A., Sairanbayev D., Kulsartov T., Gizatulin Sh., Silnyagin P., Akhanov A., Udartsev S. Neutronic analysis of the irradiation test of the titanium beryllide samples //Proceedings of the International Scientific Forum “Nuclear Science and Technology”, 26-30 September, 2022, Almaty, Kazakhstan, p.152
- 17 Shaimerdenov A., Kulsartov T., Kenzhina I., Zaurbekova Zh., Kenzhin Y., Udartsev S. Overview of activities in Kazakhstan related to study of beryllium and beryllium compounds. //Proceedings of the International Workshop “Beryllium Technology”, 14-16 September, 2022, Karlsruhe, Germany, p.21
- 18 Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Chakrov P.V., Kenzhin Ye A. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei. – 2018. – Vol.81. – P.1408–1411.
- 19 Shaimerdenov A., Gizatulin S., Dyussambayev D., Askerbekov S., Kenzhina I. The WWR-K reactor experimental base for studies of the tritium release from materials under irradiation // Fusion Science and Technology. – 2020. – Vol.76. – P.304-313.
- 20 COMSOL Multiphysics, 2022. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed 25 April 2022).

### References

- 1 A. Francisco Hernández, et al., Fusion Eng. Des., 157, 111614 (2020).
- 2 K. Munakata, H. Kawamura, M. Uchida., J.Nucl. Mater., 329-333, 1357-1360 (2004).
- 3 K. Munakata, H. Kawamura, M. Uchida., Fusion Eng. Des., 75-79, 997-1002 (2004).
- 4 K. Munakata, H. Kawamura, M. Uchida., Fusion Eng. Des., 81, 993-998 (2006).
- 5 Yoshinao Mishima, et al., Fusion Eng. Des., 82.– P. 91-97 (2007).
- 6 Bachurin, D. V., Vladimirov P. V., j. Intermet, 100, 163–170 (2018).
- 7 K. Wada, et al., J. of Nucl. Mater., 442, 494-496 (2013).
- 8 J.-H. Kim, M. Nakamichi, J. of Nucl. Mater., 438, 218-223 (2013).
- 9 P. Kurinskiy, et al., Fusion Eng. Des., 136, 49-52 (2018).
- 10 R. Gaisin, et al., J. of Nucl. Mater. Energy, 24, 100771 (2020).
- 11 R. Gaisin, et al., J. of Alloys and Compounds, 818, 152919 (2020).
- 12 P. Kurinskiy, et al., Fusion Eng. Des., 84, 1136-1139 (2009).
- 13 P. Kurinskiy, et al., Fusion Eng. Des., 98-99, 1817-1820 (2015).
- 14 R. Gaisin, et al., J. of Nucl. Mater. Energy, 30, 101128 (2022).
- 15 R. Gaisin, et al., Fusion Eng. Des., 161, 111862 (2020).
- 16 A. Shaimerdenov, et al., Proceedings of the International Scientific Forum “Nuclear Science and Technology” (26-30 September, 2022, Almaty, Kazakhstan, p.152).
- 17 A. Shaimerdenov, et al., Proceedings of the International Workshop “Beryllium Technology” (14-16 September, 2022, Karlsruhe, Germany, p.X).
- 18 A. Shaimerdenov, et al., Physics of Atomic Nuclei., 81, 1408–1411 (2018).
- 19 A. Shaimerdenov, et al., Fusion Science and Technology. 76, 304-313 (2020).
- 20 COMSOL Multiphysics, 2022. <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (accessed 25 April 2022).