ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.553

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

© 2023 В.С. Моисеев^{1,*}, Н.К. Калинина¹, М.С. Каплина¹, Н.Ю. Марихин¹, Д.С. Моисеев¹ ¹Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград, 433510, Россия *e-mail : vitaliv.moiseev.2016@mail.ru

> Поступила в редакцию: 02.06.2023 После доработки: 02.06.2023 Принята к публикации: 08.06.2023

В АО «ГНЦ НИИАР» проводится разработка конструкции облучательного устройства (ОУ) для проведения внутриреакторных испытаний поглощающих материалов органов регулирования ядерных реакторов. В качестве поглощающих материалов были выбран титанат диспрозия, так как это соединение обладает высокой химической и термической стабильностью, повышенной коррозионной и радиационной стойкостью. Конструкция ОУ состоит из подвески с фланцем, рабочего участка, в котором размещается образец с поглощающим материалом, разделителя потока и поглощающего экрана. Разделитель потока выполнен из стали 12X18H10T. Поглощающий экран, предназначенный для уменьшения доли тепловых нейтронов в спектре, состоит из двух цилиндров, выполненных из бористой стали и алюминия, очехлованных сталью 12X18H10T. В ходе работы были проведены нейтронно-физические расчеты, полученные с помощью кода MCU-FR, и теплогидравлические расчеты конструкции ОУ, полученные с помощью ПК SolidWorks. Нейтронно-физические расчеты показали, что использование экрана из бористой стали и алюминия позволяют корректировать соотношение потока быстрых и тепловых нейтронов при проведении внутриреакторных испытаний поглощающих материалов.

Результаты теплогидравлических расчетов показали, что при использовании высокотемпературной петлевой установки ВП-3 реактора СМ-3 в условиях принудительной циркуляции обеспечивается требуемый температурный режим облучения образца с поглощающим материалом из титаната диспрозия в третьем ряду отражателя РУ СМ-3.

Ключевые слова: облучательное устройство, внутриреакторные испытания, поглощающий материал, теплогидравлические расчеты, титанат диспрозия.

DOI: 10.26583/vestnik.2023.253

Для проведения внутриреакторных испытаний органов регулирования ядерных реакторов в качестве поглощающего материала был выбран титанат диспрозия. В разное время при разработках новых конструкций органов регулирования проводились испытания различных образцов с титанатом диспрозия. Была подтверждена их высокая коррозионная стойкость в контакте с водным теплоносителем. После 20000 автоклавных испытаний при давлении 15 МПа и температуре 350 °С максимальная скорость коррозии не превышала 0.0003 г/м²·ч, а изменение диаметров образцов не превышало 0.02 % [1-2]. Высокая радиационная стойкость титаната диспрозия была подтверждена при проведении испытаний ампул с таблетками ти-

таната диспрозия в исследовательском реакторе OSIRIS (Франция) [3]. После облучения (5370 ч) при максимальных температурах более 700 °С ампулы не имели каких-либо повреждений: они сохранили форму, целостность, геометрические размеры; а таблетки титаната диспрозия сохранили форму и целостность, легко извлекались из ампулы при ее разделке, трещин по сечению таблеток не было обнаружено, пористость не изменилась [3]. Подобные внутриреакторные испытания проводились в Корее и России [4-6]. Авторы работ отмечают, что данные по облучению титаната диспрозия свидетельствуют о его перспективности для использования в качестве поглотителя в органах регулирования ядерных реакторов.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Конструкция образца состоит из цилиндрической оболочки, заполненной порошком титаната диспрозия. Материал оболочки и концевых деталей – сталь 08X18H10T. Во внутренней полости образца над столбом поглощающего материала предусмотрен компенсационный объем, предназначенный для сбора гелия. Схема образца представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема образца: 1 – хвостовик; 2 – газовый зазор; 3 – пробка никелевая; 4 – титанат диспрозия; 5 – наконечник

В работе [7] проводились теплогидравлические расчеты облучательного устройства для проведения испытаний поглощающего материала (карбида бора) в третьем ряду отражателя РУ СМ-3. Авторы работы отмечают, что для организации процесса циркуляции теплоносителя в ОУ предпочтительнее использовать высокотемпературную петлевую установку ВП-3.

Условия проведения внутриреакторных испытаний образца с титанатом диспрозия:

давление теплоносителя – 15 МПа;

температура теплоносителя – 300 °С;

объемный расход теплоносителя на входе – 3 м³/ч;

температура на поверхности образца – 300–350 °C;

давление в межкорпусном пространстве – 0.5 МПа;

температура теплоносителя в РУ СМ-3 – 60 °С;

коэффициент теплоотдачи на внешней стенке наружного корпуса ОУ – 10000 Вт/(м² · K).

Для соблюдения требуемых температурных условий моделирование внутриреакторных испытаний образца с титанатом диспрозия в высокотемпературной петлевой установке ВП-3 проводилось в ПК SolidWorks.

На рис. 2 представлена картограмма активной зоны реактора СМ-3. К ВП-3 могут быть подключены экспериментальные ячейки №№ 4, 9 и 19.



Рис. 2. Картограмма активной зоны РУ СМ-3

В процессе моделирования в ячейку № 19 отражателя РУ СМ-3 устанавливается стальной двухкорпусный канал. В канал загружается ОУ с одним образцом. Наружный корпус канала омывается водой первого контура реактора.

Конструкция ОУ (рис. 3) состоит из подвески с фланцем, рабочего участка, в котором размещается образец с поглощающим материалом, разделителя потока и поглощающего экрана. Подвеска с рабочим участком размещается внутри разделителя потока теплоносителя, выполненного из нержавеющей стали 12X18H10T, на уровне активной зоны. К нижней части разделителя потока крепится экран. Экран комбинированный и состоит из бористой стали и алюминия, очехлованных сталью 12X18H10T. Экран предназначен для уменьшения доли тепловых нейтронов в спектре.

выполнения нейтронно-физического Для расчета условий облучения образца с поглощающим материалом использовался комплекс программных средств – имитатор активной зоны реактора CM-3 IMCOR SM [8], созданный на базе прецизионной программы МСИ [9], в которой реализован алгоритм решения уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло. В расчете использовалось усредненное распределение выгорания топлива в тепловыделяющих сборках (ТВС) в активной зоне в конце кампании, полученное исходя из реальных картограмм кампаний ректора СМ-3. В качестве загрузки центральной замедляющей полости (ЦЗП) активной зоны реактора и ячеек отражателя в расчете использовалась типовая загрузка реактора СМ-3. Мощность реактора в расчете полагалась равной 90 МВт.

В целях определения регистрационных зон наружный и внутренний корпуса ВП-3, облучательное устройство, разделитель потока, экран и образец разбиваются на шесть расчетных секторов (рис. 4).







Рис. 3. Схема рабочего участка ОУ МСКГ: 1 – подвеска; 2 – экран; 3 – наружный корпус канала; 4 – внутренний корпус канала; 5 – пробка никелевая; 6 – бористая сталь; 7 – титанат диспрозия; 8 – алюминий; 9 – СПАЗ; 10 – разделитель потока; 11 – наконечник

В результате проведенных расчетов было получено распределение плотности потока и энерговыделение в материалах ОУ. В табл. 1 приведены значения плотности потока нейтронов в образце, конструкционных элементов ОУ.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Номер компонента	Компонент	Плотность потока нейтронов, ×10 ¹² с ⁻¹ см ⁻²			
		Свыше 0.1 МэВ	От 0.1 МэВ до 1 кэВ	От 1 кэВ до 0.49 кэВ	Меньше 0.49 эВ
1	Разделитель потока и другие элементы ОУ	8.82	6.07	9.30	4.18
2	Наружный слой экрана	9.46	6.74	9.78	7.19
3	Внутренний слой экрана	9.11	6.27	9.01	3.77
4	Оболочка образца	7.65	5.72	8.62	3.99
5	Образец из титаната диспрозия	7.04	5.02	3.52	0.17

Таблица 1. Плотность потока нейтронов в ячейке № 19 РУ СМ-3 для компонентов ОУ

Из табл. 1 следует, что использование экрана из бористой стали и алюминия позволяет получить необходимое соотношение тепловых и быстрых нейтронов на образце.

Теплофизические расчеты ОУ с образцом с поглощающим материалом из титаната диспрозия проводились с целью определения температурного поля в облучательном устройстве и его распределения по образцу при проведении реакторных испытаний в ячейке № 19 отражателя РУ СМ-3. Также целью теплофизических расчетов ОУ был подбор условий проведения испытаний, при котором температура образца на протяжении всего периода испытаний будет составлять 300 °С.

В данном расчете использованы результаты проведенных ранее нейтронно-физических расчетов. Значения энерговыделения в образце конструкционных материалов и элементах ОУ задавались с учетом неравномерности как радиально-азимутального распределения энерговыделения, так и высотного.

Построение расчетной модели выполнено в CAD-системе SolidWorks. Расчет проводился во встроенном в SolidWorks программном обеспечении Flow Simulation [10] с учетом аксиальных потоков тепла и теплообмена излучением между элементами конструкции ОУ.

Тепло, генерируемое в образце и элементах конструкции облучательного устройства, снимается за счет охлаждения наружного корпуса ампулы водой первого контура реактора CM-3 и за счет расхода теплоносителя через ВП-3.

На рис. 5 представлены результаты теплогидравлического расчета конструкции ОУ для проведения внутриреакторных испытаний образца с поглощающим материалом из титаната диспрозия в ячейке № 19 РУ СМ-3. Указанные на рис. 5 температуры на образце ожидаются после выхода реактора СМ-3 на номинальную мощность 90 МВт. Стрелочками показано движение теплоносителя.



Рис. 5. Результаты теплогидравического расчета конструкции ОУ

Из результатов расчета видно, что использование высокотемпературной петлевой установки ВП-3 позволяет обеспечить требуемый температурный режим при проведении внутриреакторных испытаний образца с титанатом диспрозия. Максимальная температура наблюдается в образце из титаната диспрозия – 408 °C. Температура на оболочке образца не превышает 300 °C, так как все тепло, образовавшееся в образце, отводится теплоносителем, принудительно подаваемым во внутреннюю полость ОУ. Скорость теплоносителя в рабочей части ОУ составляет 3.8 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были проведены нейтроннофизические и теплогидравлические расчеты конструкции ОУ. Нейтронно-физические расчеты показали, что использование экрана из бористой стали и алюминия позволяет корректировать соотношение потока быстрых и тепловых нейтронов при проведении внутриреакторных испытаний поглощающих материалов. Результаты теплогидравлических расчетов показали, что при использовании высокотемпературной петлевой установки ВП-3 РУ СМ-3 в условиях принудительной циркуляции теплоносителя обеспечивается требуемый температурный режим облучения образца с поглощающим материалом из титаната диспрозия в третьем ряду отражателя РУ СМ-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Пономаренко В.Б, Ключков Е.П., Муралева Е.М. Диспрозия в ядерной технике. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. 224 с. 2. *Герасимов В.В.* Коррозия реакторных материалов. М.: Атомиздат, 1980.

3. *Risovany V., Zacharov A., Fridmann S.* The results of tests an absorbing material specimens manufactured in Russia and France carried out in the SM and Oseris reactors // Pros. Int. symposium «Contribution of Materials Inverstigation to the Resolution of Probkems Encountered in Pressurized Water reactors», Fontevraund, 23-27 September 2002. Paris: SFEN, 2002. V. 1. P. 529–545.

4. Lee B.-H., Kim H.-S., Park G.-M., Cheon G.-S. Irradiation test in HANARO for neutron absorbing and burnable poison materials. // Pros. Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Yongpyong, 01.10.2003. Korea, 2003.

5. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Муралева Е.М., Варлашова Е.Е., Косенков В.М. Материаловедческие исследования таблеток титаната диспрозия после облучения в реакторе БОР-60 // Сборник трудов НИИАР. 2005. Вып. 3. С. 62–69.

6. Косенков В.М., Гсева Т.М., Алексеева С.А., Неворотин В.К. Структурные превращения в титанате диспрозия под облучением //Атомная энергия, 1976. Т. 40. Вып. 5. С. 428–431.

7. Моисеев В.С., Калинина Н.К., Каплина М.С. Предварительные теплогидравлические расчеты облучательного устройства для испытаний макета стержня аварийной защиты в РУ СМ-3. // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2022 г.) / Под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Калыгина. Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2023.

8. Марихин Н.Ю. Модернизированный комплекс программных средств – имитатор активной зоны реактора СМ (IMCOR_SM). Описание и инструкция пользователя // Отчет ОАО «ГНЦ НИИАР». Рег. № О-6264. 2014.

9. Гомин Е.А. Статус МСU-4 // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов». 2006. Вып.1. С. 6–32.

10. 3D CAD Design Software SolidWorks [Электронный ресурс]. URL: <u>https://www.solidworks.com/</u> (дата обращения: 20.05.2023).

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI», 2023, vol. 12, no. 2, pp. 77-82

DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF THE IRRADIATION DEVICE FOR CARRYING OUT IN-REAKER TESTS OF ABSORBING MATERIALS OF THE CONTROL BODIES OF NUCLEAR REACTORS

V.S. Moiseev^{1*}, N.K. Kalinina¹, M.S. Kaplina¹, N.Yu. Marihin¹, D.S. Moiseev¹ Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad, 433510 Russia *e-mail : vitaliy.moiseev.2016@mail.ru

Received June 2, 2023; revised June 2, 2023; accepted June 8, 2023

JSC «SSC RIAR» is developing a design of an irradiation device (ED) for in-reactor tests of absorbing materials of nuclear reactor control bodies. Dysprosium titanate was chosen as the absorbing material because this compound has high

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

chemical and thermal stability, increased corrosion and radiation resistance. The structure of the DT consists of a suspension with a flange, a working section, in which the sample with the absorbing material is placed, a flow splitter and an absorbing screen. The flow divider is made of 12X18H10T steel. The absorbing screen, designed to reduce the fraction of thermal neutrons in the spectrum, consists of two cylinders made of boron steel and aluminum, goggled by 12X18H10T steel. In the course of the work, neutron-physical calculations obtained with the MCU-FR code and thermal hydraulic calculations of the SE structure obtained with the SolidWorks PC were performed. Neutron-physical calculations showed that the use of boron steel and aluminum shields allows correcting the ratio of fast and thermal neutron flux during in-reactor tests of absorbing materials.

The results of thermal-hydraulic calculations have shown that the required temperature regime of irradiation of the sample with absorbing material made of dysprosium titanate in the third row of the SM-3 reactor reflector is provided under the conditions of forced circulation.

Keywords: irradiation device, in-reactor tests, absorbing material, thermal-hydraulic calculations, dysprosium titanate.

REFERENCES

1. Risovanyj V.D., Zaharov A.V., Ponomarenko V.B, Klyuchkov E.P., Muraleva E.M. Disproziya v yadernoj tekhnike [Dissolution in Nuclear Engineering]. Dimitrovgrad: OAO «GNC NIIAR» Publ. 2011. 224 p.

2. *Gerasimov V.V.* Korroziya reaktornyh materialov [Corrosion of Reactor Materials]. M.: Atomizdat Publ., 1980.

3. *Risovany V., Zacharov A., Fridmann S.* The results of tests an absorbing material specimens manufactured in Russia and France carried out in the SM and Oseris reactors. Pros. Int. symposium «Contribution of Materials Inverstigation to the Resolution of Probkems Encountered in Pressurized Water reactors», Fontevraund, 23–27 September 2002. Paris: SFEN. 2002. Vol. 1, Pp. 529–545.

4. Lee B.-H., Kim H.-S., Park G.-M., Cheon G.-S. Irradiation test in HANARO for neutron absorbing and burnable poison materials. Pros. Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Yongpyong, 01.10.2003. Korea. 2003.

5. Risovanyj V.D., Zaharov A.V., Muraleva E.M., Varlashova E.E., Kosenkov V.M. Materialovedcheskie issledovaniya tabletok titanata disproziya posle oblucheniya v reaktore BOR-60 [Materials science studies of dysprosium titanate tablets after irradiation in the BOR-60 reactor]. Sbornik trudov NIIARa [Proceedings of RIAR], 2005. Iss. 3. Pp. 62–69.

6. Kosenkov V.M., Gseva T.M., Alekseeva S.A., Nevorotin V.K. Strukturnye prevrashcheniya v titanate disproziya pod oblucheniem [Structural transformations in dysprosium titanate under irradiation]. Atomnaya energiya [Atomic energy]. 1976. Vol. 40, iss. 5. Pp. 428– 431.

7. Moiseev V.S., Kalinina N.K., Kaplina M.S. Predvaritel'nye teplogidravlicheskie raschety obluchatel'nogo ustrojstva dlya ispytanij maketa sterzhnya avarijnoj zashchity v RU SM-3. – Nauchnyj godovoj otchet AO «GNC NIIAR» (otchet ob osnovnyh issledovatel'skih rabotah, vypolnennyh v 2022 g.) / Pod obshchej red. d-ra tekhn. nauk, prof. V.V. Kalygina [Preliminary thermalhydraulic calculations of the irradiation device for testing the layout of the emergency protection rod in the SM-3 reactor plant – Scientific annual report of JSC «SSC RIAR» (report on the main research work performed in 2022) / under the general editorship. Dr. tech. sciences, prof. V.V. Kalygina]. Dimitrovgrad, AO «GNC NIIAR» Publ., 2023.

8. Marihin N.Yu. Modernizirovannyj kompleks programmyh sredstv – imitator aktivnoj zony reaktora SM (IMCOR_SM). Opisanie i instrukciya pol'zovatelya // Otchyot OAO «GNC NIIAR» [Upgraded software package – SM reactor core simulator (IMCOR_SM). Description and user manual // Report of JSC «SSC RIAR»]. Reg. № O-6264. 2014.

9. *Gomin E.A.* Status MCU-4 [MCU-4 status]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya «Fizika yadernyh reaktorov», 2006. Iss.1. Pp. 6–32.

10. 3D CAD Design Software SolidWorks. Available at: <u>https://www.solidworks.com/</u> (accessed: 20.05.2023).