

УДК 621.039.553

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3 ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

М.С. Каплина^{1,2}*, Н.К. Калинина², Н.Ю. Марихин², В.С. Моисеев^{1,2}, О.И. Дреганов²

¹Дмитровградский инженерно-технологический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Дмитровград, 433511, Россия,

²АО «ГНЦ НИИАР» (Государственный научный центр – научно-исследовательский институт атомных реакторов), Дмитровград, Ульяновская область, 433510, Россия

*e-mail: marabond21@mail.ru

Поступила в редакцию: 04.03.2024

После доработки: 03.05.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

Одним из инновационных проектов реакторов IV поколения является высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, который способен вырабатывать тепло с температурой теплоносителя до 950–1000 °С, что позволяет получать водород и другие полезные продукты без выбросов CO₂. Отличительная особенность таких реакторов – использование микротвэлов, диспергированных в графитовой матрице – топливном компакте. Для промышленного внедрения высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов необходимо провести исследование надежности и работоспособности их компонентов. Поэтому одной из задач является исследование топливных компактов (ТК) с микросферическим топливом. Для решения этой задачи необходимо провести реакторные испытания и послереакторные исследования топливных компактов с микротвэлами. Для проведения реакторных испытаний ТК в среде гелия требуется разработать ампульное облучательное устройство, которое позволит производить отборы проб газовой среды из полостей с ТК для проведения анализа динамики выхода продуктов деления из микротвэлов. В работе представлено обоснование конструкции облучательного устройства для проведения реакторных испытаний топливных компактов с микросферическим топливом с возможностью оперативного анализа радиоизотопного состава газовой среды, в которой размещены топливные компакты, с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров.

Ключевые слова: микротвэл, топливный компакт, матричный графит, средняя плоскость активной зоны, микротвэлы, реактор СМ-3, сосуд Маринелли, продукты деления, реакторы IV поколения, атомная энерго-технологическая станция, облучательное устройство.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.329

NTOWNG

ВВЕДЕНИЕ

Одним из инновационных проектов реакторов IV поколения является высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР), который способен вырабатывать тепло с температурой теплоносителя до 950–1000 °С, что позволяет получать водород и другие полезные продукты без выбросов CO₂. Отличительная особенность таких реакторов – использование микротвэлов (МТ), диспергированных в графитовой матрице – топливном компакте (ТК). ВТГР планируются к промышленному внедрению в 2030-х гг. [1]. Для этого необходимо провести исследование надежности и работоспо-

собности их компонентов¹. Поэтому одной из актуальных задач является исследование ТК с микросферическим топливом.

Для решения поставленной задачи необходимо проведение в исследовательском реакторе СМ-3 высокотемпературных испытаний ТК с микротвэлами, изготовленных по лабораторной

¹ Научный портал «Атомная энергия 2.0» (2008–2023) [Электронный ресурс]. Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77-72853. Публикация № 11054 от 22 марта 2017 г. «Перспективы развития высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов» в рубрике «Технологии». – Режим доступа: в открытом доступе. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/technology/73919> (дата обращения: 16.01.2023).

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3 ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

технологии, в составе ампульных облучательных устройствах (ОУ) в среде гелия при температуре до 1300 °С для последующих материаловедческих исследований. Цель эксперимента – получение экспериментальных данных по радиационной стойкости ТК, подтверждающих принятые конструктивные и технологические решения и необходимых для обоснования работоспособности при эксплуатации в проектируемой атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с ВТГР. Задачей эксперимента также являлось определение длительности облучения в условиях, характерных для ВТГР, при которых будет обнаружено ускорение накопления дефектов в защитных слоях микротвэлов.

Для достижения поставленной цели были проведены нейтронно-физические, теплофизические и прочностные расчеты ОУ, разработана рабочая конструкторская документация на него.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОУ

Для получения экспериментальных данных по радиационной стойкости ТК, подтверждающих принятые конструктивные и технологические решения и необходимых для обоснования работоспособности ТК при эксплуатации в проектируемой атомной энерготехнологической станции, необходимо иметь возможность оперативного анализа радиоизотопного состава газовой среды, в которой размещены ТК (рис. 1). Поэтому необходимо, чтобы конструкция ОУ позволяла регулярно отбирать газовые пробы из полости ОУ, в которой размещены ТК, во время облучения и анализировать их состав с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров². Реактор СМ-3 – исследовательский, мощность ТК и температура незначительно зависят от заранее неизвестной на длительный период фактической загрузки экспериментальных каналов РУ СМ-3. Так как максимальная температура ТК не должна превышать 1300 °С, необходима возможность регулирования температуры облучения ТК. Для изготовления ОУ были выбраны материалы, способные не терять

прочность при заданных температурах. Выполнены предварительный нейтронно-физический и одномерный теплофизический расчеты для определения максимальных температур элементов ОУ, подобраны размеры элементов ОУ, произведен прочностной расчет согласно Норм³ и определена конструкция ОУ [1].

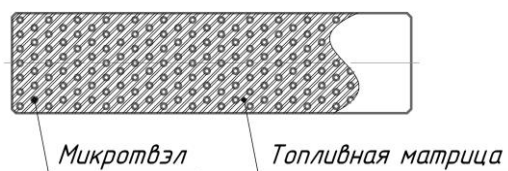


Рис. 1. Схема ТК

В ОУ, на уровне активной зоны (рабочий участок – рис. 2), размещаются три ампулы, в каждой из которых размещается по одной негерметичной капсуле с ТК (рис. 3).

В каждой капсуле размещены:

- три исследуемых ТК;
- один вспомогательный ТК – с центральным отверстием для ТЭП;
- графитовый фильтр.

К каждой капсуле с обеих сторон герметично приварены стальные трубки для продувки полости с ТК гелием марки 6.0.

Каждая капсула помещена в ампулу из нержавеющей стали. В ОУ установлены три ампулы, расположенные симметрично относительно центральной оси ОУ. Толщина корпуса ампулы – 1 мм, материал – сталь 12Х18Н10Т. Все ампулы имеют по одной трубке для контроля газовой среды в полости. Трубка для вакуумирования и заполнения ампулы гелием с внутренним диаметром 6 мм вварена в нижний фланец ампулы, внутри нее проходит трубка для подачи газа в полость капсулы. Полости ампул и капсул между собой не сообщаются. ОУ сконструировано таким образом, что трубки, соединяющие полости капсул с газовакуумным стендом, находятся либо внутри полости ампулы, либо внутри полости подвески. Таким образом, исключается контакт этих трубок с водой, т.е. при нарушении герметичности трубки в ОУ исключается попадание воды на топливные компакты.

² Атомная энергетика и состояние работ в области реакторных материалов ядерных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://showslide.ru/atomnaya-ehnergetika-i-sostoyanie-rabot-v-oblasti-reaktornikh-materialov-yadernikh-65356> (дата обращения: 29.08.2023).

³ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Пин АЭ Г-7-002-86.

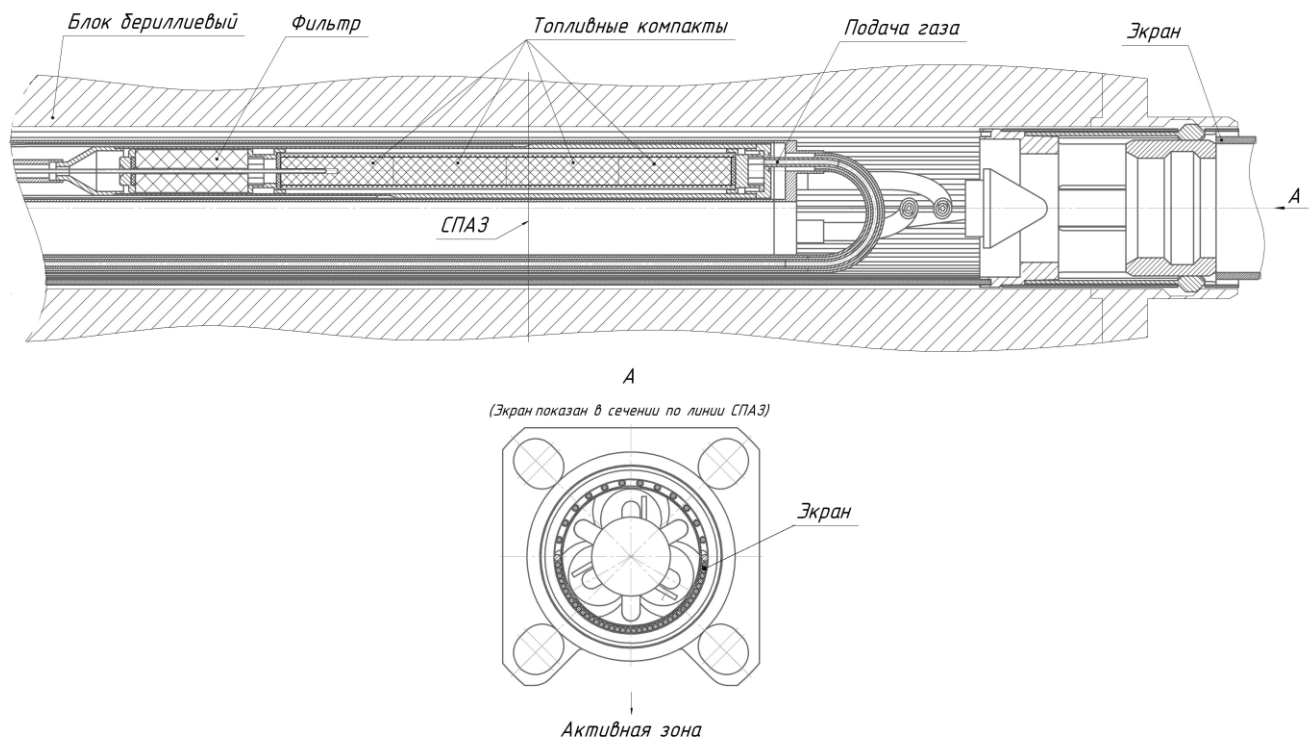


Рис. 2. Схема рабочего участка ОУ с исследуемыми ТК

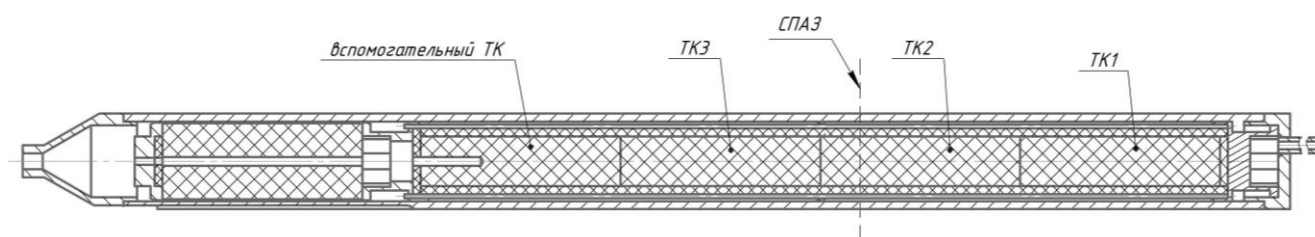


Рис. 3. Схема капсулы с ТК

В каждой ампуле (рис. 4) размещено три термоэлектрических преобразователя (ТЭП): один ТЭП градуировки ВР устанавливается в верхнем ТК, и два ТЭП градуировки ХА устанавливаются в наружных проточках корпуса капсулы.

В каждой капсуле размещены исследуемые ТК и графитовый фильтр из материала МПГ-6. ТК размещены друг над другом внутри графитовой обоймы из МПГ-6 цилиндрической формы. Для снижения потерь тепла графитовая обойма обернута танталовой фольгой. Обойма с ТК сверху и снизу дистанционируется от корпуса капсулы молибденовыми втулками.

Эксплуатационные характеристики ОУ:

– температура ТК при облучении – до 1300 °С;

– плотность потока быстрых ($E \geq 0.1$ МэВ) нейтронов – до $9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

– среда в ампулах – гелий при давлении до 0.5 МПа;

– среда в капсулах – гелий при давлении 0.12 ± 0.02 МПа;

– среда в полости подвески – гелий при давлении до 0.5 МПа;

– максимальная мощность топливного компакта – до 0.43 кВт;

– длительность облучения – до 400 эффективных суток.

Снаружи ОУ, на уровне активной зоны, размещается экран из гафниевого проволоки, предназначенный для формирования потока нейтронов, обеспечивающего условия облучения ТК (см. рис. 2).

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3 ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

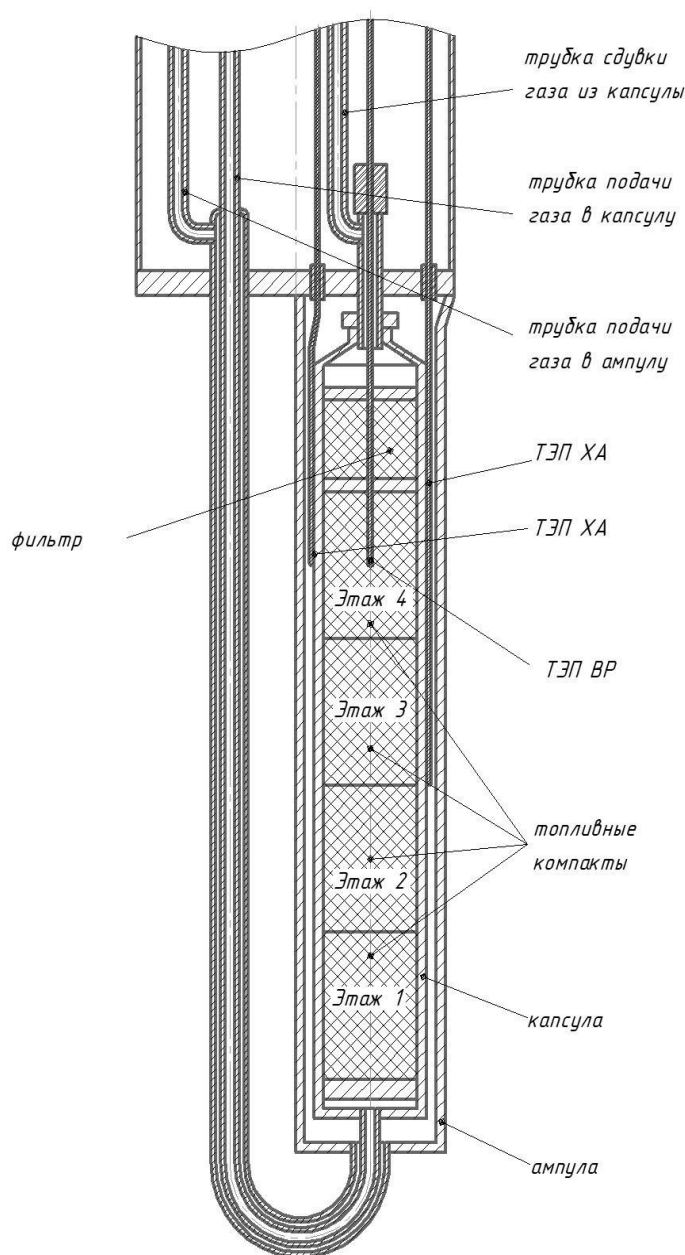


Рис. 4. Схема ампулы ОУ

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОУ

Для обоснования конструкции облучательного устройства были получены энерговыделения в образцах и элементах ОУ по результатам нейтронно-физических расчетов с учетом радиально-азимутального и высотного неравномерностей распределения энерговыделения. На рис. 5 показана картограмма активной зоны реактора СМ-3. Для расчета использовался имитатор IMCOR_SM [2], созданный на базе прецизионной программы MCU-RR [3], реализующий

алгоритм решения уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло. За основу брались средние выгорания топлива в ТВС в кампаниях реактора СМ-3 в 2020 г. Результаты нейтронно-физических расчетов представлены на рис. 6.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОУ

Построение расчетной модели выполнено в системе автоматизированного проектирования SolidWorks. Расчет проводился во встроенном в SolidWorks программном обеспечении Flow Simulation⁴, с учетом аксиальных потоков тепла и теплообмена излучением между элементами конструкции ОУ. В процессе оценки распределения температуры учитывалась зависимость свойств материалов от температуры. Такой подход позволил корректно смоделировать конструкцию ОУ и обеспечить требуемые условия облучения ТК.

Тепло, генерируемое в образцах и элементах конструкции облучательного устройства, снимается за счет охлаждения внешней стенки ампулы водой первого контура реактора.

Исходные данные и граничные условия:

- коэффициенты теплопроводности молибдена, тантала и стали 12Х18Н10Т взяты из [4];
 - коэффициент теплопроводности графита принят 30 Вт/(м·К);
 - теплофизические свойства газообразного гелия взяты из [5];
 - коэффициент теплоотдачи на поверхности канала – 10 кВт/(м²·К);
 - температура воды реактора – 50 °С;
- объемное энерговыделение в элементах конструкции и топливных компактах задано по результатам нейтронно-физического расчета.

Так как при высоких температурах имеет место теплообмен излучением, а у графита высокая степень черноты [4], максимальная температура ТК, согласно расчету, не превышала ~ 1010 °С. Наличие танталовой фольги с низкой степенью черноты позволяет получить нужную максимальную температуру ТК.

Толщина танталовой фольги была принята 50 мкм, так как она была в наличии.

⁴ 3D CAD Design Software| SolidWorks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата обращения: 20.05.2023).

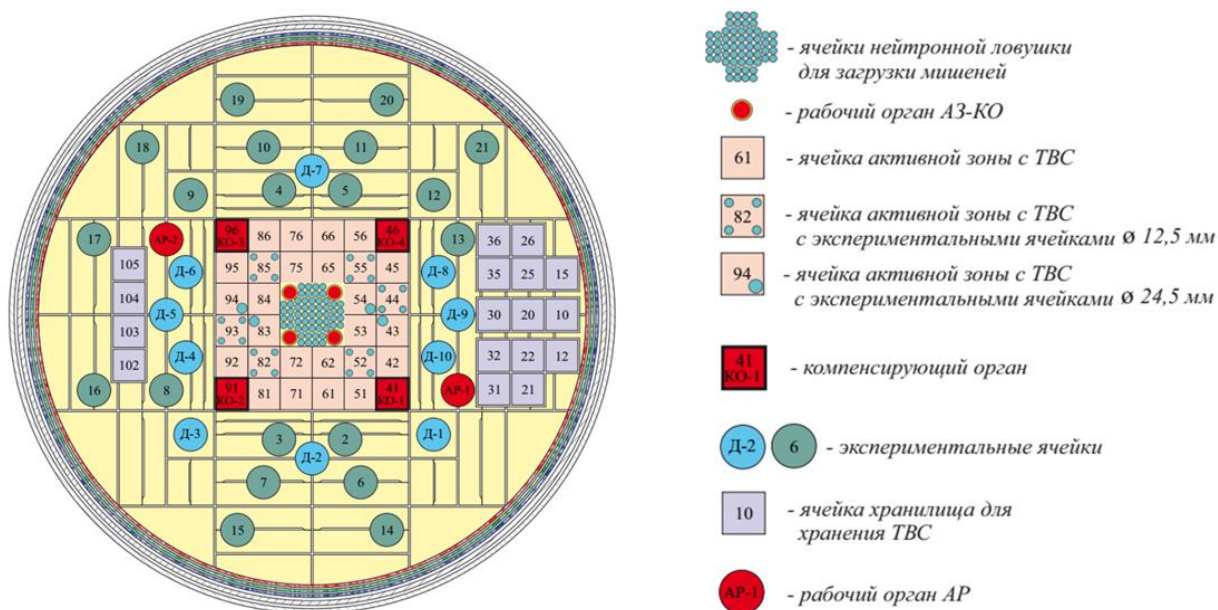


Рис. 5. Картограмма активной зоны реактора СМ-3

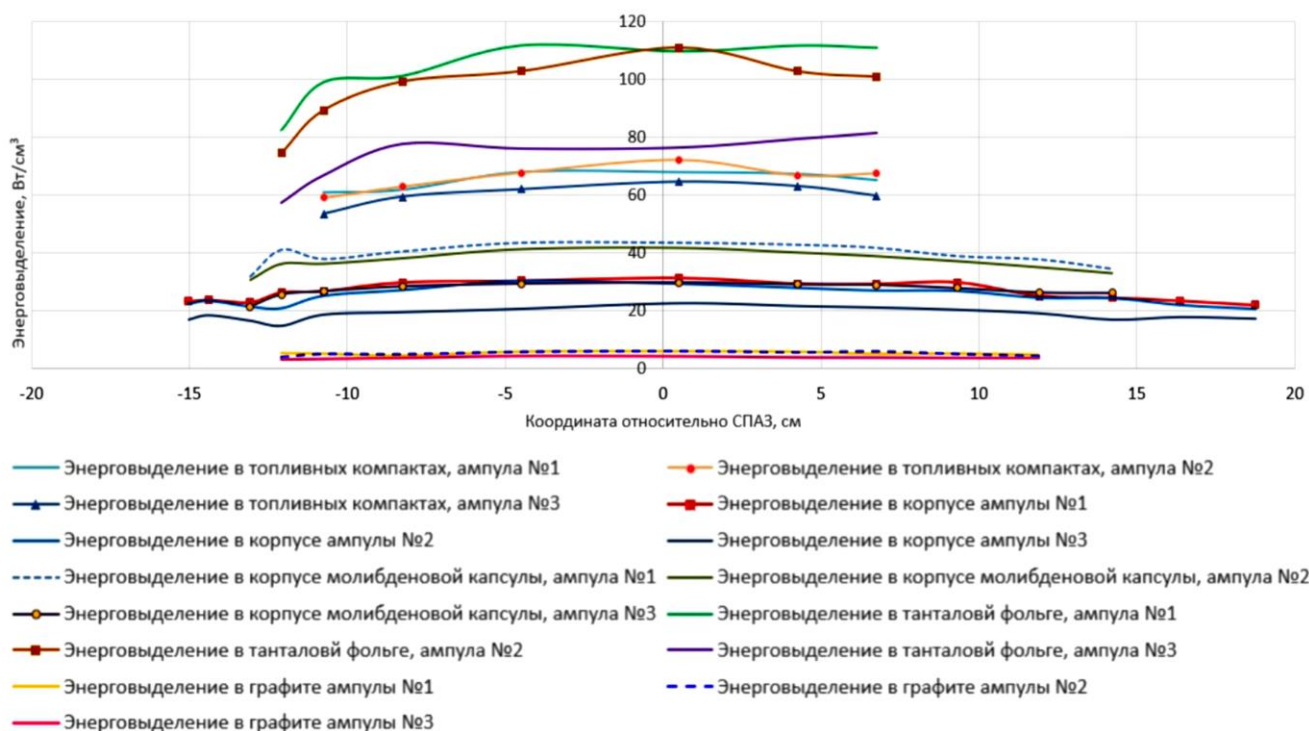


Рис. 6. Распределение энерговыделения в ТК и элементах конструкции по высоте

Размеры корпуса ампулы и корпуса капсулы были приняты $\varnothing 27 \times 1$ мм и $\varnothing 24 \times 2$ мм, соответственно, исходя из предварительных одномерных теплофизических расчетов, и на их основе прочностных расчетов согласно Норм⁵. Данные расчеты показали, что при максимальных расчетных температурах корпуса сохраняют проч-

⁵ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Пин АЭ Г-7-002-86.

ность и жесткость в заданных условиях облучения.

В результате проведенных расчетов определены диаметр и толщина графитовой обоймы $\varnothing 16 \times 1.75$ мм и величины зазоров: между корпусами ампулы и капсулы – 0.5 мм, между корпусом из жаропрочной стали и фольгой из тантала – 1.95 мм.

Радиальное распределение температуры внутри ампулы на уровне средней плоскости активной зоны (СПАЗ) представлено на рис. 7 и

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

9 [1]. Перепад температуры на уровне СПАЗ в гелиевом зазоре между корпусами стальной ампулы и капсулы величиной 0.5 мм составляет 357 °С, а перепад температуры в гелиевом зазоре между корпусом молибденовой капсулы и

фольгой из тантала величиной 1.95 мм составляет 671 °С. Распределение температуры по высоте капсулы, относительно уровня СПАЗ, представлено на рис. 8 и 10.

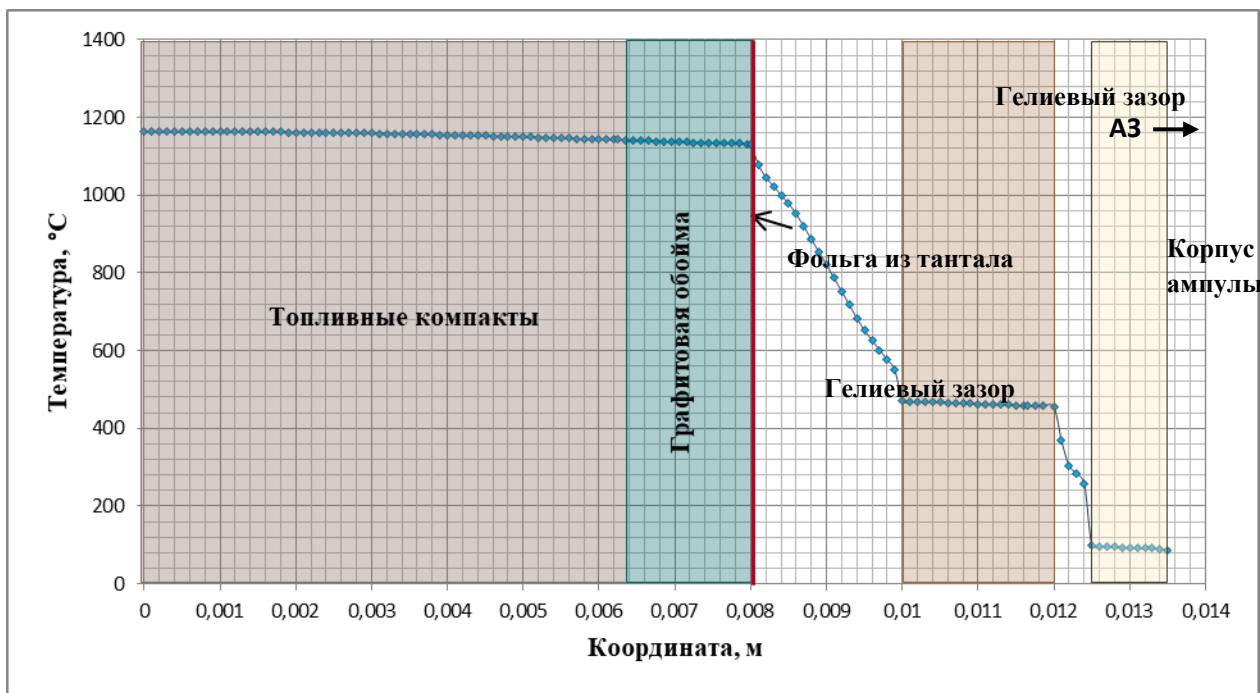


Рис. 7. Радиальный профиль температуры на уровне СПАЗ

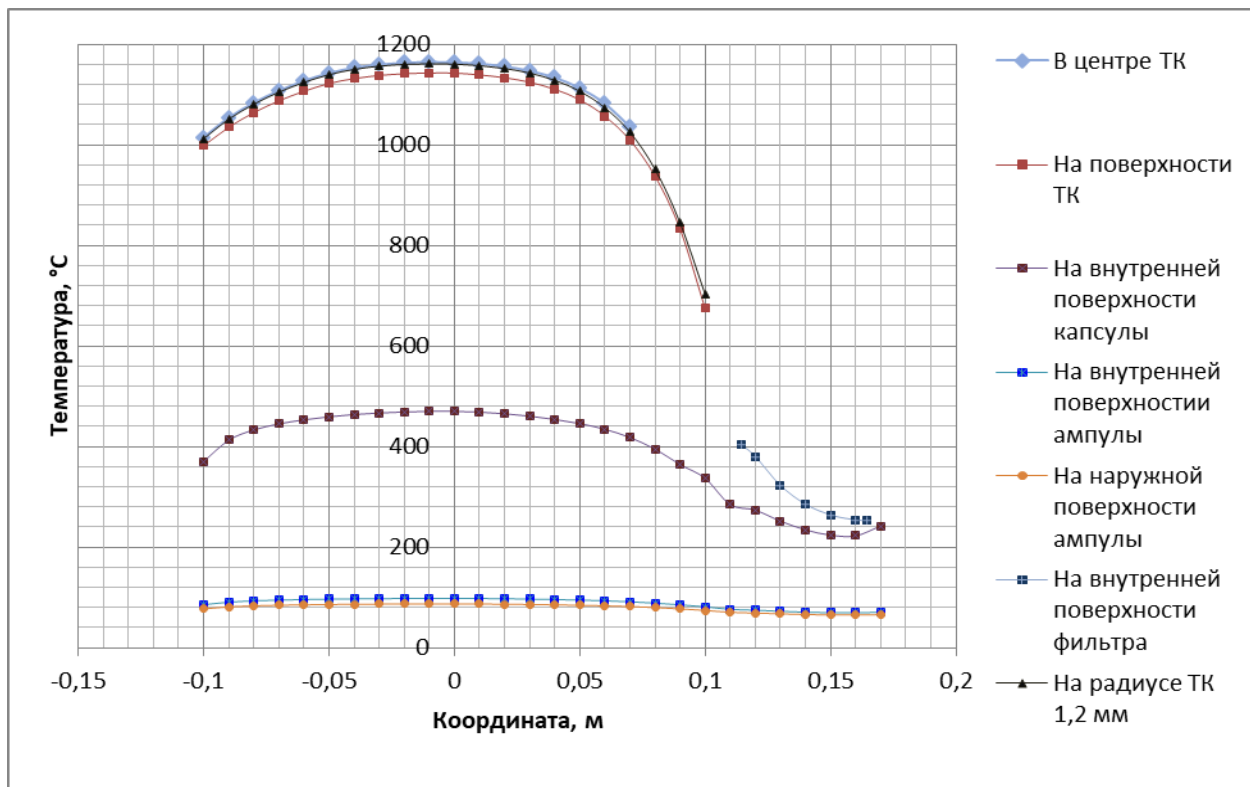


Рис. 8. Распределение температуры по высоте в элементах ОУ на конец кампании реактора

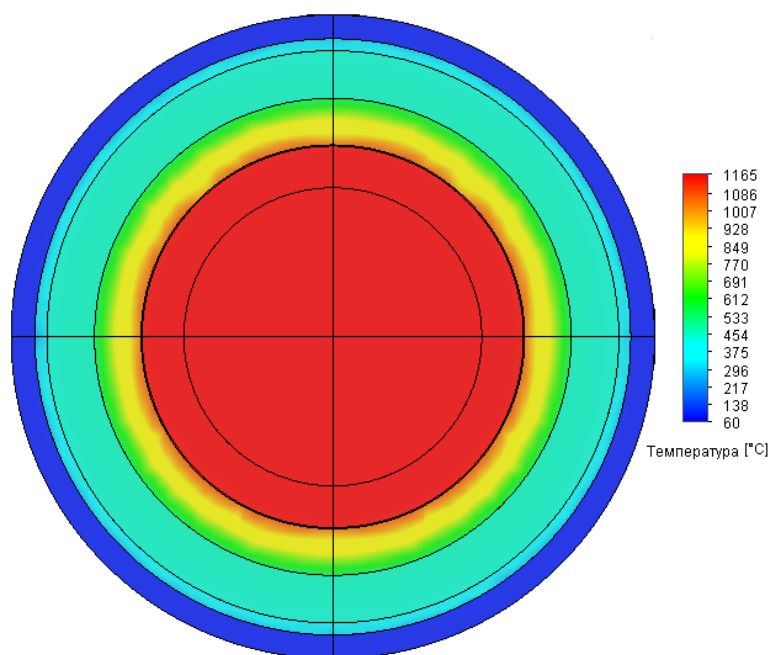


Рис. 9. Распределение температуры в ампуле на уровне СПАЗ

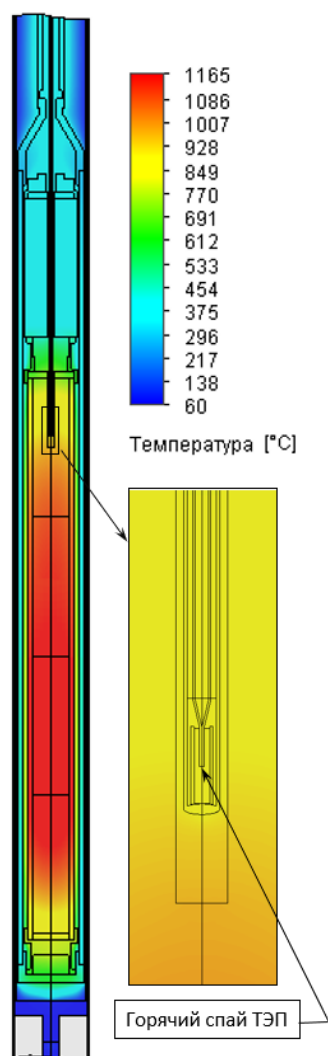


Рис. 10. Распределение температуры по высоте капсулы

В результате проведенного предварительного теплофизического расчета видно, что расчетная температура облучения ТК находится в диапазоне 700–1165 °С, это связано с неравномерным по высоте распределением энерговыделения. Так как температура ТК не должна превышать 1300 °С, а максимальная расчетная температура облучения ТК составляет 1165 °С, во время проведения испытаний будет запас повышения температуры в случае фактической загрузки экспериментальных каналов РУ СМ-3, при которой мощность ТК и энерговыделения в конструкционных материалах окажутся выше предварительно рассчитанных. Повысить температуру ТК возможно понижением давления в полости ампулы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований была выбрана конструкция ОУ для проведения реакторных испытаний ТК, проведены предварительные нейтронно-физические, теплофизические и прочностные расчеты конструкции ОУ. По результатам проведенных нейтронно-физических, теплофизических и прочностных расчетов определены: размеры гафниевого экрана и необходимое количество проволочек для его изготовления, подобраны материалы и определены размеры конструктивных элементов ОУ, при которых температура ТК на протяжении всего периода реакторных испытаний не превышала 1300 °С, а мощность каждого ТК не превышала

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

430 Вт. Изготовлено два ампульных ОУ, предназначенных для проведения испытаний в ячейках отражателя № 6 и 7 реактора СМ-3, предназначенных для разной длительности облучения. Каждое ОУ имело в своем составе по три герметичных капсулы с ТК. Во время испытаний периодически проводились отборы проб газовой среды из капсул с ТК для обнаружения вышедших за пределы защитных покрытий МТ продуктов деления топлива. После завершения облучения в составе ОУ, ТК были направлены на послереакторные материаловедческие исследования.

В результате реакторных испытаний и послереакторных исследований были получены данные о вышедших за пределы покрытий МТ продукты деления топлива в процессе облучения ТК в условиях ВТГР, был проведен анализ работоспособности МТ и подтверждена их герметичность во время эксплуатации.

С использованием результатов выполненной работы был разработан и обоснован технический проект реакторной установки ВТГР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарёв-Степной Н.Н. Атомно-водородная энергетика // Вестник Российской академии наук, 2021. Т. 91. № 5. С. 484–498.

2. Каплина М.С., Калинина Н.К., Марихин Н.Ю., Громов М.О., Головкин Г.А., Нагайцев В.Г., Филимонов А.Е., Моисеев В.С., Дреганов О.И. Исследование выхода газообразных продуктов деления из топливных компактов. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2022 г.) / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Калыгина. Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2023. 296 с.

3. Марихин Н.Ю. Комплекс программных средств на базе прецизионного кода для расчетов нейтронно-физических параметров эксплуатации реактора СМ: Диссертация... канд. физ.-мат. наук. Димитровград, 2011. 135 с.

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

5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: АТОМИЗДАТ, 1968. 484 с.

6. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: учебное справочное пособие для студентов / Под общ. ред. проф. П.Л. Кириллова; 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИздАт, 2007. 200 с.

7. Каплина М.С., Калинина Н.К., Ильиных Г.А., Марихин Н.Ю., Моисеев В.С. Теплофизический расчет облучательного устройства для облучения топливных компактов в реакторе СМ-3 // Сборник докладов XXII Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам 13–14 апреля 2022 г. Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2022. С. 256–263.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 133–141

DESIGN-BASIS JUSTIFICATION OF AN IRRADIATION RIG DESIGN
TO TEST MICRO-SPHERICAL FUEL IN THE SM-3 REACTOR TO DETERMINE
THE FISSION GAS RELEASE

M.S. Kaplina^{1,2,*}, N.K. Kalinina², N.Yu. Marikhin², V.S. Moiseyev^{1,2}, O.I. Dreganov²

¹Dimitrovgrad Engineering and Technology Institute-branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering and Physics Institute), Dimitrovgrad, 433511, Russia,

²JSC «SSC RIAR» (State Scientific Center - Research Institute nuclear reactors),
Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, 433510, Russia

*e-mail: marabond21@mail.ru

Received March 04, 2024; revised May 03, 2024; accepted May 14, 2024

One of the innovative projects of Gen- IV reactors is a high-temperature gas-cooled reactor able to generate heat with a coolant temperature of up to 950–1000 °C, which makes it possible to produce hydrogen and other useful products without CO₂ emissions. A distinctive feature of such reactors is the use of micro fuel rods dispersed in a graphite matrix, a fuel compact (FC). The commercialization of high-temperature gas-cooled reactors requires the

reliability and performance of their components to be confirmed. Therefore, one of the tasks is to study fuel compacts with micro-spherical fuel (MF). To address this task, reactor tests and post-irradiation examinations of fuel compacts with micro fuel rods shall be performed. To test fuel compacts in a helium environment, a capsule-type irradiation rig shall be designed that allows sampling of the gas environment from cavities with fuel compacts to analyze the FGR dynamics. The paper presents a rationale for the irradiation rig (IR) design to conduct reactor tests of fuel compacts with micro-spherical fuel with the possibility of real-time analysis of the radioisotope composition of the gas environment where the fuel compacts are located using semiconductor gamma spectrometers.

Key words: micro fuel rod, fuel compact (FC), matrix graphite, core mid-plane (CMP), micro-spherical fuel (MF), reactor SM-3, Marinelli vessel, fission gas, Gen- IV reactors, nuclear power engineering plant (NPEP).

REFERENCES

1. *Ponomarev-Stepnoy N.N.* Atomno-vodorodnaya energetika [Atomic-hydrogen energy]. Vestnik Rossijskoj akademii nauk Atomno-vodorodnaya energetika, 2021. Vol. 91. No. 5. Pp. 484–498 (in Russian).
2. *Kaplina M.S., Kalinina N.K., Marikhin N.Yu., Gromov M.O., Golovko G.A., Nagaitsev V.G., Filimonov A.E., Moiseev V.S., Dreganov O.I.* Issledovanie vyhoda gazoobraznykh produktov deleniya iz toplivnykh kompaktoy. [Study of fission gas release from fuel compacts]. Nauchnyj godovoj otchet AO “GNC NIIAR” (otchet ob osnovnykh issledovatel'skikh rabotakh, vypolnennykh v 2022 g.) / Pod obshchej red. d-ra tekhn. nauk, prof. V.V. Kalygina. [Scientific Annual Report of RIAR JSC (Report on the main research activities performed in 2022) / under the ed. of Prof. V.V. Kalygin]. Dimitrovgrad, RIAR JSC, Publ., 2023. 296 p. (in Russian).
3. *Marikhin N.Yu.* Kompleks programmnykh sredstv na baze precizionnogo koda dlya raschetov nejtronno-fizicheskikh parametrov ekspluatatsii reaktora SM. Diss. k.fiz.-mat. nauk [A set of software tools based on a precision code for calculating the neutronic parameters of the SM reactor operation. PhD Thesis in Physics and Mathematics]. Dimitrovgrad, 2011. 135 p.
4. *Gomin E.A.* Status MCU-4 [MCU-4 status]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya «Fizika yadernykh reaktorov», 2006. Iss. 1. Pp. 6–32 (in Russian).
5. *Chirkin V.S.* Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoj tekhniki [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 484 p.
6. *Kirillov P.L., Terentyeva M.I., Deniskina N.B.* Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoj tekhniki: uchebnoe spravochnoe posobie dlya studentov / Pod obsh. red. prof. P.L. Kirillova. [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials: Educational Reference Guide for Students / Under the general. ed. prof. P.L. Kirillova]. Moscow, IzdAt Publ., 2007. 200 p.
7. *Kaplina M.S., Kalinina N.K., Ilinykh G.A., Marikhin N.Yu., Moiseyev V.S.* Teplofizicheskij raschet obluchatel'nogo ustrojstva dlya oblucheniya toplivnykh kompaktoy v reaktore SM-3 [Thermophysical Calculation of An Irradiation Device for Irradiating Fuel Compacts in the SM-3 Reactor]. Sbornik dokladov XXII Mezhdunarodnoj konferencii molodykh specialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam 13-14 aprelya 2022 g. [Proc. of the XXII International Conference of Young Specialists on Nuclear Power Plants April 13–14, 2022]. Podolsk, JSC OKB «GIDROPRESS» Publ., 2022. Pp. 256–263 (in Russian).