

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НА ПРОИЗВОДСТВО ^{99}Mo В МИШЕНЯХ РЕАКТОРА ВВР-ц

О.Ю. Кочнов*, П.А. Данилов**

* АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 6

** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ»

249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, д. 1

Р

Проведен анализ эффективности размещения различных типов отражателей в активной зоне реактора ВВР-ц на производство ^{99}Mo . Ранее в работах [1, 2] был выполнен расчет влияния только бериллиевого отражателя на характеристики активной зоны реактора ВВР-ц, такие как запас реактивности, плотность потока нейтронов в экспериментальных каналах и активность наработанного ^{99}Mo . Вычисления реализованы на основе сформированной прецизионной модели активной зоны, которая включает в себя один экспериментальный канал, где происходит облучение мишеней для производства ^{99}Mo . Модель создана в программном комплексе SCALE. Комплекс позволяет проводить широкий диапазон расчетов, начиная с оценки критичности и заканчивая задачами оценки радиационной обстановки.

В результате расчетного анализа модели были получены такие характеристики, как эффективный коэффициент размножения, энерговыделение в мишенях для наработки ^{99}Mo , плотность потока нейтронов в сырьевом материале мишеней и количество наработанного ^{99}Mo после 120-ти часов облучения. Данные сравнивались с результатами подобных вычислений параметров активной зоны реактора ВВР-ц. По сведениям из справочной литературы был сформирован перечень широко используемых материалов в качестве отражателя или замедлителя в активных зонах реакторов. На его основе было получено и проанализировано несколько моделей, в которых водное пространство на периферии активной зоны было заменено на исследуемые материалы.

Ключевые слова: реактор ВВР-ц, отражатель, наработка ^{99}Mo , плотность потока нейтронов, энерговыделение, программный комплекс SCALE.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производство ^{99}Mo в реакторе ВВР-ц осуществляется в вертикальных экспериментальных каналах с принудительным охлаждением, в которых расположены две мишени типа «труба в трубе», установленные одна на другую. Наружный диаметр 36 мм с высотой топливной части 150 мм. Конструкция мишени представляет собой две трубки, между которыми помещена смесь U_3O_8 и ZnO [1]. Такая конфигурация оказалась более продуктивной для наработки ^{99}Mo по сравнению с предыдущим вариантом («стакан в стакане»). По результатам расчетов мощность энерговыделения в канале при загрузке мишеней нового типа со-

© О.Ю. Кочнов, П.А. Данилов, 2020

ставляла 32,9 кВт, что в 1,7 раза больше чем при загрузке мишени старой конструкции [3].

Проведены расчеты влияния бериллиевого отражателя на производство ^{99}Mo , результаты которых представлены в [2]. В зависимости от компоновки бериллия в активной зоне расчеты показали увеличение производства ^{99}Mo минимум на 2% и максимум на 9%. В работах [1, 4] проанализировано влияние бериллиевого отражателя на параметры активной зоны реактора ВВР-ц. Результаты расчетов показали значительное увеличение запаса реактивности реактора и рост плотности потока в экспериментальных каналах до 10%.

Анализ оптимизации производства ^{99}Mo проводился исходя из возможности увеличения числа экспериментальных каналов в активной зоне. В ходе исследований было показано, что «...размещение бериллиевых блоков в шести полостях на периферии активной зоны позволяет установить дополнительно один экспериментальный канал для наработки радионуклидов, не изменяя конфигурацию остальной части активной зоны и существенно не влияя на реактивностные характеристики стержней СУЗ» [5].

Увеличение производства ^{99}Mo в реакторе ВВР-ц можно осуществить за счет изменения конструкции мишени. В результате расчетного анализа была предложена новая конструкция мишени, содержащей большее количество стартового материала. Было обосновано, что новая конструкция удовлетворяет максимально допустимым теплогидравлическим параметрам в экспериментальном канале. Результаты проведенных исследований изложены в работах [6 – 12].

Целью работы является сравнение влияния различных вариантов материала отражателей на увеличение производства ^{99}Mo в реакторе ВВР-ц. Такого типа расчеты для активной зоны реактора ВВР-ц ранее выполнялись только для бериллиевого отражателя, однако сравнительный анализ с другими типами не проводился. Решение данного вопроса позволит подобрать наиболее эффективный материал отражателя из списка анализируемых для получения максимально возможного количества ^{99}Mo после облучения в активной зоне реактора. Подбор материала для отражателя основывался на его распространенности в качестве отражателя в ядерной энергетике. В работе [13], на основании которой были подобраны материалы отражателей, подробно описаны свойства широко используемых отражателей и замедлителей.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Расчеты энерговыделения в экспериментальных каналах проводились с использованием программного комплекса SCALE [14], в котором анализ модели выполнялся с помощью двух модулей – KENO-VI и ORIGEN. Первый модуль производит вычисление параметров активной зоны с использованием метода Монте-Карло. Второй модуль рассчитывает выгорание на основании численного решения системы дифференциальных уравнений, которые описывают образование, истощение и распад нуклидов [14]:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j \neq i} (l_{ij}\lambda_j + f_{ij}\sigma_j\Phi)N_j(t) - (\lambda_i + \sigma_i\Phi)N_i(t) + S_i(t), \quad (1)$$

где N_i – количество нуклида i ; λ_i – постоянная распада нуклида i ; l_{ij} – выход нуклида i при распаде нуклида j ; σ_i – спектрально-усредненное сечение увода для нуклида i ; f_{ij} – выход нуклида i при выгорании нуклида j ; Φ – проинтегрированный по углу и энергии нейтронный поток; S_i – зависящий от времени источник.

На основании данных из работ [3, 15, 16] была сформирована прецизионная модель активной зоны реактора ВВР-ц с экспериментальным каналом, где происхо-

дит наработка ^{99}Mo (рис. 1, 2).

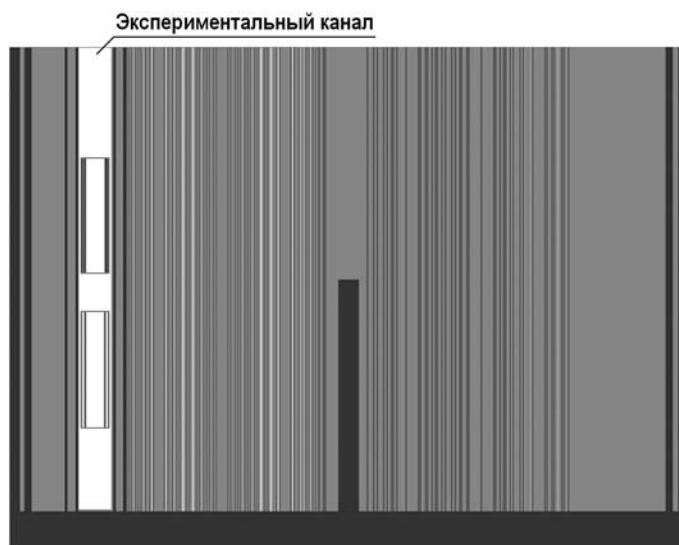


Рис. 1. Вертикальный разрез модели реактора ВВР-ц



Рис. 2. Горизонтальный разрез фрагмента модели реактора ВВР-ц

Для проверки корректности созданной модели и параметров вычисления рассчитывались основные характеристики: эффективный коэффициент размножения, плотность потока нейтронов в материале мишеней, энерговыделение в мишенях. Стержни автоматического регулятора (АР) и ручного регулятора (РР) в расчетной модели погружены в активную зону наполовину. В качестве параметров для KENO-VI было выбрано 750 поколений нейтронов с 10000 нейтронов в каждом. Мощность модели была нормирована на 10 МВт в топливной части всех ТВС. Полученные данные сравнивались с результатами расчетов аналогичной модели в программном комплексе MCNP.

ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТОВ

В таблице 1 приводятся результаты расчёта энерговыделения в верхней и нижней мишенях и плотности потока нейтронов в них, а также соответствующие значения, полученные в работе [3].

Эффективный коэффициент размножения по расчетам с использованием програм-

мы SCALE составляет $k_{\text{eff}} = 1,01041 \pm 0,00026$. В работе [3] $k_{\text{eff}} = 1,01097 \pm 0,00034$. Результаты расчетов эффективного коэффициента размножения, плотности потока нейтронов и энерговыделения в материале мишеней сходятся в пределах погрешности с данными в [3].

Таблица 1

Сравнение полученных характеристик мишеней в программах SCALE и MCNP

| Программный комплекс | Характеристики | | | |
|----------------------|--|---|---------------------------------------|--------------------------------------|
| | Плотность потока нейтронов в верхней мишени, $n/(см^2с)$ | Плотность потока нейтронов в нижней мишени, $n/(см^2с)$ | Энерговыделение в верхней мишени, кВт | Энерговыделение в нижней мишени, кВт |
| SCALE | $(1,28 \pm 0,02) \cdot 10^{14}$ | $(1,36 \pm 0,02) \cdot 10^{14}$ | 16,0±0,2 | 17,1±0,2 |
| MCNP | $(1,31 \pm 0,01) \cdot 10^{14}$ | $(1,39 \pm 0,01) \cdot 10^{14}$ | 16,0±0,2 | 16,9±0,2 |

В качестве материала отражателя были выбраны наиболее распространенные в ядерной энергетике замедлители – графит, бериллий, оксид бериллия, гидрид циркония. Отражатель расположен вдоль боковой поверхности активной зоны. В существующей конструкции активной зоны реактора область, куда в моделях помещались отражатели, заполнена водой.

При расчете графитового отражателя данные о плотности и изотопном составе были взяты для марок графита ВПГ и СГТ. Графит марки ВПГ наиболее распространен в реакторной промышленности, а графит СГТ обладает наибольшей плотностью за счет насыщения кремнием.

Таблица 2

Характеристики отражателей

| Материал | Плотность, $кг/м^3$ | Изотопный состав |
|------------------|---------------------|---|
| Графит марки ВПГ | 1680 | $^{12}C-98,93\%$; $^{13}C-1,07\%$ |
| Графит марки СГТ | 2500 | $^{12}C-49,465\%$; $^{13}C-0,535\%$; $^{28}Si-46,115\%$; $^{29}Si-2,335\%$; $^{30}Si-1,55\%$ |
| Оксид бериллия | 2200 | 9Be , ^{16}O |
| Гидрид циркония | 5600 | $^{90}Zr-51,45\%$; $^{91}Zr-11,22\%$; $^{92}Zr-17,15\%$; $^{94}Zr-17,38\%$; $^{96}Zr-2,8\%$; 1H |
| Бериллий | 1848 | $^9Be-100\%$ |

Блоки отражателя

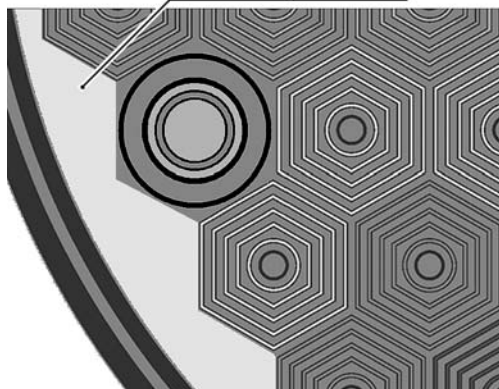


Рис. 3. Экспериментальный канал с блоками отражателя

В таблице 2 представлены данные по изотопному составу и плотности рассматриваемых типов отражателей. Данные по материалам были взяты из [13].

Блоки отражателя расположены на периферии активной зоны, заполняя все полости между боковой стенкой реактора и периферийными ТВС (рис. 3). В таблице 3 приводятся расчетные значения плотностей потоков нейтронов и энерговыделение в материале мишеней на начальный момент времени.

Таблица 3

Расчет энерговыделения и плотности потока нейтронов в экспериментальном канале для разных типов отражателей

| Материал отражателя в полостях | Плотность потока нейтронов, 10^{14} н/(см ² с) | | Энерговыделение, кВт | |
|--------------------------------|---|----------------|----------------------|----------------|
| | Нижняя мишень | Верхняя мишень | Нижняя мишень | Верхняя мишень |
| Графит марки ВПГ | 1,39±0,02 | 1,30±0,02 | 16,4±0,2 | 15,3±0,2 |
| Графит марки СГТ | 1,40±0,02 | 1,31±0,02 | 16,2±0,2 | 15,1±0,2 |
| Оксид бериллия | 1,44±0,02 | 1,33±0,02 | 17,2±0,2 | 15,8±0,2 |
| Гидрид циркония | 1,35±0,02 | 1,26±0,02 | 16,5±0,2 | 15,6±0,2 |
| Бериллий | 1,47±0,02 | 1,39±0,02 | 17,7±0,2 | 16,7±0,2 |

Таблица 4

Активность ⁹⁹Mo на момент окончания облучения

| Отражатель | Бериллий | Оксид бериллия | Гидрид циркония | Графит СГТ | Графит ВПГ | Вода |
|---|-----------|----------------|-----------------|------------|------------|-----------|
| Активность наработанного ⁹⁹ Mo, 10^{13} Бк | 4,55±0,09 | 4,37±0,09 | 4,29±0,09 | 4,14±0,08 | 4,25±0,09 | 4,37±0,09 |

Активность наработанного ⁹⁹Mo с двух мишеней после 120-ти часов облучения при различных вариантах отражателя в активной зоне представлена в табл. 4.

Согласно результатам расчетов энерговыделения и активности ⁹⁹Mo в мишенях, только размещение бериллиевого отражателя увеличит производство в сравнении с существующей конструкцией, в которой область размещения отражателя заполнена водой. Активность наработанного ⁹⁹Mo в данном случае на 4% выше, что подтверждено аналогичной величиной в [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформирована прецизионная модель активной зоны реактора ВВР-ц, которая может быть использована для проведения расчетных исследований в будущем. Результаты расчетов основных характеристик активной зоны реактора ВВР-ц хорошо соотносятся с результатами, полученными ранее. Вычисление энерговыделения и наработки ⁹⁹Mo при размещении различных отражателей на периферии активной зоны показали, что только бериллиевый вариант вносит ощутимый вклад в увеличение производства по сравнению с водным отражателем. Активность производимого ⁹⁹Mo после 120-ти часов облучения при размещении бериллиевого отражателя превышает на 4% значение при использовании водного отражателя. Проведенные оценки подтверждают, что другие варианты отражателя либо уступают, либо имеют схожие параметры.

Литература

1. Кочнов О.Ю., Колесов В.В. Влияние бериллиевого отражателя, помещенного в активную зону реактора ВВР-ц, на ее нейтронно-физические характеристики. // Известия вузов.

Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 22-125.

2. Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Фомин Р.В. Оценка увеличения производства ^{99}Mo при различных компоновках активной зоны на реакторе ВВР-ц. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 110-147.

3. Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Фомин Р.В. Оценка энерговыделения в мишени с урансодержащим материалом при производстве ^{99}Mo с использованием мишеней усовершенствованной конструкции на реакторе ВВР-ц. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 4. – С. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2012.4.03>

4. Колесов В.В., Кочнов О.Ю., Фомин Р.В. Улучшение нейтронно-физических характеристик ВВР-ц посредством замены части ТВС активной зоны на бериллиевый отражатель. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 118. – № 4. – С. 191-193.

5. Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Фомин Р.В., Фомиченко П.А. Возможность увеличения числа экспериментальных каналов ВВР-ц за счет изменения конструкции активной зоны. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – № 3. – С. 146-147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-00460-7>

6. Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Зевякин А.С., Фомин Р.В. Теплогидравлический расчет максимальной температуры топлива и воды в установке МАК-2. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127. – № 3. – С. 135-137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00601-x>

7. Фомин Р.В., Колесов В.В., Зевякин А.С., Кочнов О.Ю. Оценка увеличения производства ^{99}Mo при использовании мишеней усовершенствованной конструкции на реакторе ВВР-ц. / Материалы II Международной конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов «Инновационные ядерные реакторы малой и сверхмалой мощности» 15-17 мая 2017 г. ГК «Росатом», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 14-15.

8. Колмыков В.Ю., Зевякин А.С., Фомин Р.В., Соболев А.В. Модернизация конструкции мишени для наработки молибдена. / Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики (AtomFuture 2017)» 27-30 ноября 2017 г. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 8-9.

9. Колмыков В.Ю., Зевякин А.С., Фомин Р.В. Модернизация конструкции мишени для наработки радиоизотопов. / Материалы II Международной (XV региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» 19-20 апреля 2018 г. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 15-16.

10. Колмыков В.Ю., Зевякин А.С., Фомин Р.В., Соболев А.В. Сравнение теплогидравлических характеристик мишеней для наработки молибдена. / Материалы VII Международной молодежной научной школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий» 16-21 апреля 2018 г. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 236-237.

11. Колмыков В.Ю., Зевякин А.С. Модернизация конструкции мишени для наработки радиоизотопов реактора ВВР-ц. / Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Будущее атомной энергетики» 29-30 ноября 2018 г. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2019. – С. 4-5.

12. Колмыков В.Ю., Зевякин А.С., Фомин Р.В. Теплогидравлический расчет мишени стержневого типа для наработки радиоизотопов. / Материалы III Международной конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Инновационные ядерные реакторы малой и сверхмалой мощности». 15 – 16 мая 2018. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 52-53.

13. Бобков В.П., Блохин А.И., Забудько Л.М., Казанцев Г.Н., Румянцев В.Н., Смогалева И.П., Тарасиков В.П. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 4. Свойства замедлителей. / Под общ. ред. проф. В.М. Поплавского. – М.: ИздАТ, 2012. – 408 стр.

14. Rearden B.T., Jessee M.A., Eds. SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Ver. 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016). Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834.

15. Колесов В.В., Кочнов О.Ю., Волков Ю.В., Украинцев В.Ф., Фомин Р.В. Создание прецизионной модели реактора ВВР-ц для последующей оптимизации его конструкции и наработки ^{99}Mo и других радионуклидов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 129-146.

16. Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Фомин Р.В., Жердев Г.М. Оценка увеличения производства ^{131}I при использовании теллуровых мишеней усовершенствованной конструкции на реакторе ВВР-ц. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 102-110. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2014.4.11>

Поступила в редакцию 19.09.2019 г.

Авторы

Кочнов Олег Юрьевич, главный инженер
E-mail: kochnov2000@mail.ru

Данилов Павел Анатольевич, аспирант
E-mail: chugunca3230@gmail.com

UDC 621.039.51

INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF REFLECTORS ON ^{99}Mo PRODUCTION IN VVR-ts' TARGETS

Kochnov O.Yu.*, Danilov P.A.**

* JSC «NRFChI n.a. L.Ya. Karpov»

6 Kievskoe shosse, Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»

1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

The analysis of placement effectiveness for various types of reflectors in the core of the VVR-ts reactor for the production of ^{99}Mo is carried out. Earlier, a calculation was made of the effect of only a beryllium reflector on the characteristics of the VVR-ts reactor core such as reactivity margin, neutron flux in experimental channels, and accumulated activity of ^{99}Mo . The calculations are based on the formed precision model of the core, which includes one experimental channel, where the targets for ^{99}Mo production are irradiated. The model was created in the SCALE software package. The software package allows a fairly wide range of calculations to be carried out, from criticality assessment to the tasks of assessing the radiation situation.

As a result of the computational analysis of the model, such characteristics were obtained as the effective multiplication factor, energy release in the targets for ^{99}Mo generation, the neutron flux in the target raw material, and the amount of ^{99}Mo generated after 120 hours of irradiation. The data were compared with the results of similar calculations of the parameters of the core of the VVR-ts reactor. Further, on the basis of reference literature, a list of widely used materials as a reflector or moderator in the reactor core was formed. Based on it, several models were formed and analyzed in which the water space at the periphery of the core was replaced with the researched materials. The calculation results showed that the maximum production of ^{99}Mo is achieved when placing a beryllium reflector. Placement of other types of reflectors does not significantly increase production compared to an already placed water reflector.

Key words: VVR-ts reactor, reflector, ^{99}Mo production, neutron flux, power density, SCALE software package.

REFERENCES

1. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V. Influence of Beryllium Reflector Placed in Active Zone of VVR-ts Reactor on its Neutron Physics Characteristics. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 2, pp. 22-125 (in Russian).
2. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomin R.V. Estimation of ^{99}Mo Production Increase at Various Core Layouts on VVR-ts Reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 1, pp. 110-147 (in Russian).
3. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomin R.V. Evaluation of Energy Release in Targets with Uranium Containing Material for Production of ^{99}Mo with Using of Advanced Design Targets on VVR-ts Reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 4, pp. 23-29. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2012.4.03> (in Russian).
4. Kolesov V.V., Kochnov O.Yu., Fomin R.V. Improvement of Neutron-Physical Characteristics of VVR-ts by Means of Replacement of a Part of Core Fuel Assembly by a Beryllium Reflector. *Atomnaya Energiya*. 2015, v. 118, no. 4, pp. 191-193 (in Russian).
5. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomin R.V., Fomichenko P.A. Possibility of Increasing the Number of Experimental Channels VVR-ts by Means of Core Design Change. *Atomnaya Energiya*, 2018, v. 125, no. 3, pp. 146-147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-00460-7> (in Russian).
6. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Zeviakin A.S., Fomin R.V. Thermal Hydraulic Calculation of Maximum Fuel and Water Temperature in MAK-2 Unit. *Atomnaya Energiya*. 2019, v. 127, no. 3, pp. 135-137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00601-x> (in Russian).
7. Fomin R.V., Kolesov V.V., Zeviakin A.S., Kochnov O.Yu. Estimation of ^{99}Mo Production Increase Using Advanced Design Targets at the VVR-ts Reactor. *Proc. of the II International Conference of Young Scientists, Specialists, Post-graduate Students «Innovative Nuclear Reactors of Small and Super Low Power», 15-17 May 2017. SC «Rosatom», National Research Nuclear University «MEPhI»*. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2017, pp. 14-15 (in Russian).
8. Kolmykov V.Yu., Zeviakin A.S., Fomin R.V., Sobolev A.V. Modernization of the target design for production of molybdenum. *Proc. of the XIII International Scientific-Practical Conference «The Future of Nuclear Power Engineering (AtomFuture 2017)», November 27-30, 2017. Obninsk. IATE NIYaU MIFI Publ.*, 2018, pp. 8-9 (in Russian).
9. Kolmykov V.Yu., Zeviakin A.S., Fomin R.V. Modernization of the target design for the radioisotope operating time. *Proc. of the II International (XV Regional) Scientific Conference «Technogenic Systems and Ecological Risk», April 19-20, 2018. Obninsk. IATE NIYaU MIFI Publ.*, 2018, pp. 15-16 (in Russian).
10. Kolmykov V.Yu., Zeviakin A.S., Fomin R.V., Sobolev A.V. Comparison of the Thermal-Hydraulic Characteristics of Targets for Molybdenum Production. *Proc. of the VII International Youth Scientific School-Conference «Modern Problems of Physics and Technologies», April 16-21, 2018. Moscow. NIYaU MIFI Publ.*, 2018, pp. 236-237 (in Russian).
11. Kolmykov V.Yu., Zeviakin A.S. Modernization of Target Design for Radioisotope Production of VVR-ts Reactor. *Proc. of the XIV International Scientific-Practical Conference «The Future of Nuclear Power Engineering», November 29-30, 2018. Obninsk. IATE NIYaU MIFI Publ.*, 2019, pp. 4-5 (in Russian).
12. Kolmykov V.Yu., Zeviakin A.S., Fomin R.V. Thermal-Hydraulic Calculation of a Rod Type Target for the Radioisotope Operating Time. *Proc. of the III International Conference of Young Scientists, Specialists, Post-graduates and Students «Innovative Nuclear Reactors of Small and Extra Low Power», May 15-16, 2018. Obninsk. IATE NIYaU MIFI Publ.*, 2018, pp. 52-53 (in Russian).
13. Bobkov V.P., Blokhin A.I., Zabudko L.M., Kazantsev G.N., Rumyantsev V.N., Smogalev I.P., Tarasikov V.P. *Handbook of Material Properties for Advanced Reactor Technologies. Vol. 4.*

Properties of Moderators. Ed. by Prof. V.M. Poplavsky. Moscow. IzdAT Publ., 2012, 408 p. (in Russian).

14. Rearden B.T. and Jessee M.A. *SCALE Code System*, ORNL/TM-2005/39, Ver. 6.2.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2016). Available from Radiation Safety Information Computational Center as CCC-834

15. Kolesov V.V., Kochnov O.Yu., Volkov Yu.V., Ukraintsev V.F., Fomin R.V. Creation of Precision Model of the VVR-ts Reactor for Subsequent Optimization of its Design and Production of ^{99}Mo and other Radionuclides. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2011, no. 4, pp. 129-146 (in Russian).

16. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomin R.V., Zherdev G.M. Evaluation of Increase in ^{131}I Production Using Tellurium Targets of Improved Design at the VVR-ts Reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 4, pp. 102-110. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.4.11> (in Russian).

Authors

Kochnov Oleg Yurievich, Chief Engineer
E-mail: kochnov2000@mail.ru

Danilov Pavel Anatolievich, PhD Student
E-mail: chugunca3230@gmail.com