

УВЕЛИЧЕНИЕ НАРАБОТКИ ИЗОТОПА МО-99 ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ МИШЕНЕЙ, ОБЛУЧАЕМЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КАНАЛАХ РЕАКТОРА ВВР-Ц

Д.А. Пахолик, О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, В.В. Фомичев

АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»

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



Существуют различные способы получения Мо-99. Некоторые из них имеют широкое распространение при промышленном производстве, другие находятся в стадии исследования с целью увеличения выхода продукта. Основным промышленным способом получения Мо-99 при помощи ядерного реактора является осколочный способ. Данный способ предусматривает наличие урановой мишени и ядерного реактора. Мишень помещается в канал активной зоны реактора и облучается нейтронами в течение необходимого времени. После чего мишень извлекается из канала и перемещается в «горячую» камеру для химического выделения Мо-99. Так получают Мо-99 практически во всем мире. Рассмотрен осколочный способ наработки Мо-99, реализуемый на базе инженерно-технологического комплекса исследовательского ядерного реактора ВВР-ц. Для увеличения выхода Мо-99 предложена модернизированная модель мишени «труба в трубе». Выполнена оценка наработки Мо-99 и эффективности охлаждения модернизированной мишени путём проведения нейтронно-физического и теплогидравлического расчётов с помощью программных комплексов VisualBurnOut и Ansys CFX. Расчётные исследования показали увеличение энерговыделения и количества нарабатываемого изотопа Мо-99 в мишени модернизированной конструкции.

Ключевые слова: молибден-99, реактор ВВР-ц, экспериментальный канал, мишень для наработки Мо-99.

ВВЕДЕНИЕ

Использование радиоизотопной продукции для диагностики и лечения онкологических заболеваний является важной частью современной медицины. Потребность в радиохимических препаратах постоянно увеличивается и вместе с тем растёт производство медицинских радионуклидов, например, таких как изотоп Тс-99m. Период полураспада Тс-99m около шести часов, что затрудняет его поставку в медицинские центры. Чтобы решить проблему поставки изотопера Тс-99m конечному потребителю, применяются так называемые генераторы технеция-99m – свинцовые контейнеры с колонками с Мо-99, который, распадаясь с периодом полураспада 66 ча-

© Д.А. Пахолик, О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, В.В. Фомичев, 2021

сов, образует изомер Тс-99m. Бесперебойная наработка Мо-99 является ключевой в производстве генераторов Тс-99m.

Важнейшей задачей для производства Мо-99 с помощью ядерного реактора является совершенствование уже имеющихся технологий получения радионуклида и создание новых. В этом отношении тема исследования является актуальной, поскольку напрямую связана с совершенствованием производства Мо-99 с помощью исследовательского реактора ВВР-ц на базе АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова».

ПОЛУЧЕНИЕ МО-99 НА БАЗЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВР-Ц

Наработка Мо-99 с помощью ядерного реактора может осуществляться двумя путями:

- получение Мо-99 в результате реакции захвата нейтронов на Мо-98;
- получение Мо-99 как одного из осколков деления U-235.

Получение Мо-99 с помощью реакции захвата на данный момент не рассматривается в промышленных масштабах, так как не позволяет нарабатывать большие объёмы продукта (невозможно отделить материал мишени от наработанного Мо-99 и удельная активность продукта невысока). В настоящее время основным промышленным способом получения Мо-99 является наработка радионуклида как одного из осколков деления U-235. Для этого U-235 облучают в ядерном реакторе и потом химическим путем извлекают Мо-99 из продуктов деления. В АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» применяется осколочный способ наработки Мо-99 при помощи исследовательского ядерного реактора ВВР-ц.

ВВР-ц является водо-водяным реактором бассейнового типа номинальной мощностью 15 МВт, имеет двухконтурную систему охлаждения. В активной зоне реактора расположено шесть вертикальных экспериментальных каналов (ВЭК), четыре из которых применяются для наработки Мо-99 [1].

Охлаждение вертикальных экспериментальных каналов, применяемых для наработки Мо-99, осуществляется с помощью двух петлевых установок, каждая из которых представляет собой замкнутый водяной контур с принудительной циркуляцией воды. В состав одной петлевой установки входят два подключенных последовательно друг за другом вертикальных экспериментальных канала, два циркуляционных насоса (один в работе, второй в резерве), бак с водой, трубопроводы, регулирующая и запорная арматура, контрольно-измерительная аппаратура. Охлаждение внешней поверхности ВЭК осуществляется водой первого контура реактора.

Канал для наработки Мо-99 конструктивно выполнен в виде трубы Фильда и представляет собой две коаксиально расположенные трубки (рис. 1). Вода по центральной трубе движется сверху вниз, охлаждает мишени, а затем поднимается по межтрубному пространству к выходу из канала.



Рис. 1. Экспериментальный канал с мишенями (вертикальный разрез, поворот на 90°)

Для облучения на реакторе используются мишени (облучаемые образцы, содержащие U-235) двух типов (рис. 2).

Мишень первого типа («стакан в стакане») представляет собой конструкцию, выполненную в виде вставленных один в другой стаканов. В зазор между стаканами насыпается урансодержащий материал (U_3O_8+ZnO). Общая высота мишени с головкой под захват механизма перегрузки составляет 140 мм. Корпус мишени выполнен

из алюминиевого сплава САВ-1. Одновременно в одном канале могут облучаться до четырёх мишеней такой конструкции.



Рис. 2. Мишени, применяемые для наработки Мо-99 на реакторе ВВР-ц (вертикальный разрез)

Второй тип мишени – «труба в трубе». Урансодержащий материал (U_3O_8+ZnO) помещается в полость между двумя коаксиально расположенными трубками. Трубки изготовлены из сплава САВ-1. Общая высота такой мишени с головкой под захват механизма перегрузки равна 250 мм. Мишень имеет двухстороннее охлаждение. В один канал возможна установка не более двух мишеней такого типа.

РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Целью расчётного исследования являлась модернизация конструкции мишени «труба в трубе», которая позволит увеличить наработку Мо-99 при стандартных условиях облучения, не допуская при этом нарушения пределов безопасной эксплуатации реактора ВВР-ц.

Основные требования к конструкции мишени [2]:

- конструкция мишени должна обеспечивать оптимальное использование нейтронного потока в экспериментальных каналах реактора ВВР-ц;
- мишень должна иметь размеры и конструкцию, которые позволяют обеспечить её загрузку в канал ядерного реактора ВВР-ц и выгрузку из него;
- мишень должна обеспечить барьер, чтобы не допустить выброса радиоактивных продуктов и особенно газов во время и после облучения;
- конструкция мишени должна быть легко разборной в условиях «горячей» камеры (хорошо защищенный бокс, в котором при помощи дистанционных манипуляторов выполняется процесс выделения Мо-99 из осколков деления U-235);
- конструкция и состав мишени должны обеспечивать химическую переработку её в «горячей» камере с максимальным выходом продукта за минимальное время.

С учетом перечисленных выше требований разработана мишень модернизированной конструкции. Отличается модернизированная мишень от применяемых в настоящее время на реакторе ВВР-ц мишеней типа «труба в трубе» полезной высотой (увеличена на 35%), внутренним диаметром цилиндрического корпуса (увеличен на 10%), размером полости для размещения урансодержащего материала (ширина полости уменьшена на 30%)

и общей высотой (увеличена на 20%). При этом объем и материал урансодержащей смеси остаются неизменными (изменяется только геометрия корпуса мишени). В один канал возможно одновременно установить не более двух мишеней модернизированной конструкции.

Конструкция модернизированной мишени позволяет выгоднее использовать поток тепловых нейтронов в экспериментальном канале и за счёт увеличения поверхности теплообмена обеспечивает более лучший теплосъём, чем конструкция применяемой мишени. Увеличение накопления Мо-99 происходит вследствие оптимального использования воздушного зазора, имеющегося в мишени для скопления газообразных осколков, деления, а также за счет улучшенного использования распределения нейтронного потока по высоте экспериментального канала и уменьшения слоя уран-содержащего материала (уменьшение эффекта блокировки). Для сравнения на рис. 3 показан вертикальный разрез применяемой и модернизированной мишени в одинаковом масштабе.

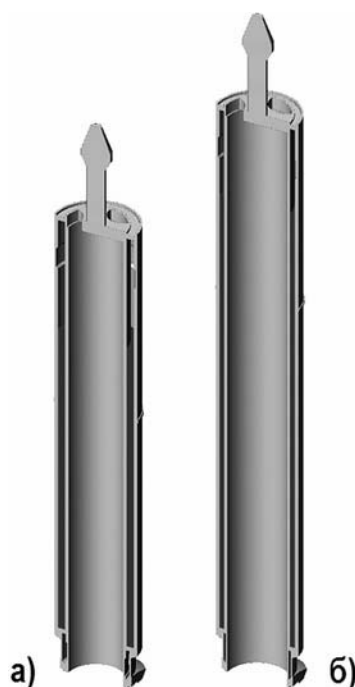


Рис. 3. Сравнение мишеней: а) – применяемая; б) – модернизированная

Для нейтронно-физического расчёта в связке программных комплексов MCNP и VisualBurnOut (описание и верификация программы приводятся в [3, 4]) создана прецизионная математическая модель активной зоны реактора ВВР-ц. Расчёты по используемой связке программ показывают хорошее совпадение плотностей потоков нейтронов в активной зоне ИЯУ ВВР-ц и изменения запаса реактивности в процессе кампании с данными из архива АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». С помощью данной модели проведён расчёт энерговыделения в мишенях и выполнена оценка наработки Мо-99 для модернизированных и применяемых мишеней типа «труба в трубе» по всем четырём вертикальным экспериментальным каналам. Особенностью расчетной модели является тот факт, что моделируется конструкция, в верхней части которой находятся крепежные элементы, создающие угловую асимметрию в потоке жидкости. Этим и обусловлена необходимость использования более сложной модели, для расчета которой используется программный комплекс (ПК) ANSYS CFX.

В расчётных исследованиях рассматривался следующий режим работы реактора:

- мишени облучаются в течение 120 ч (кампания реактора);
- мощность реактора не изменяется на протяжении кампании и составляет 15 МВт.

Результаты расчёта энерговыделения и активности Мо-99 для ВЭК 8-1 (самая большая наработка из всех ВЭК) показаны в табл. 1. Суммарная активность Мо-99 по всем ВЭК представлена в табл. 2. Проведенные расчётные исследования показывают увеличение энерговыделения и количества нарабатываемого изотопа Мо-99 в мишенях модернизированной конструкции по сравнению с применяемыми. Суммарная активность Мо-99 по всем ВЭК увеличится на 21.41 %.

Таблица 1

Энерговыделение и активность Мо-99, рассчитанные для ВЭК 8-1

Тип мишени	Энерговыделение, кВт		Активность Мо-99, Ки		Суммарная активность Мо-99, Ки
	верхняя	нижняя	верхняя	нижняя	
Применяемая мишень	25,47	21,13	993,96	826,06	1820,02
Модернизированная мишень	26,07	25,85	1165,95	1155,93	2321,88

Таблица 2

Результаты расчёта активности Мо-99 по всем ВЭК

Тип мишени	Суммарная активность Мо-99 по всем ВЭК, Ки	Увеличение активности Мо-99, %
Применяемая мишень	6711,88	21,41
Модернизированная мишень	8540,20	

Теплогидравлический расчёт, а именно, численное моделирование течения циркуляционной воды через вертикальный экспериментальный канал реактора ВВР-ц при размещении в нём мишеней модернизированной конструкции проводилось в расчётной программе ANSYS CFX. В расчётах использовалась модель турбулентности $k-\epsilon$ [5]. Выбор программы и модели турбулентности обусловлен их апробацией многочисленными расчётами [1, 6] и сравнением с экспериментальными данными. Энерговыделение в мишенях задавалось исходя из нейтронно-физического расчёта. В расчёте рассматривался вертикальный экспериментальный канал 8-1, так как он является наиболее энергонапряжённым.

В результате расчёта были получены значения компонентов скорости, температуры и давления циркуляционной воды в канале, температуры стенок мишеней и матрицы урансодержащей смеси (рис. 4 – 7).

На рисунке 4 показано распределение температуры в вертикальном сечении экспериментального канала реактора ВВР-ц при размещении в нём модернизированных мишеней, а на рис. 5 – распределение температуры в зоне расположения мишеней. Из рисунков видно, что максимальная температура урансодержащей смеси составляет 220,02°C. Максимальное значение температуры корпуса мишени не превосходит 204,95°C (нижняя мишень), что существенно ниже температуры плавления алюминиевого сплава САВ-1 ($T_{пл} \approx 650^\circ\text{C}$). Максимальная температура циркуляци-

онной воды на выходе из расчётной области не превышает 72,85°C.



Рис. 4. Распределение температуры в вертикальном сечении экспериментального канала

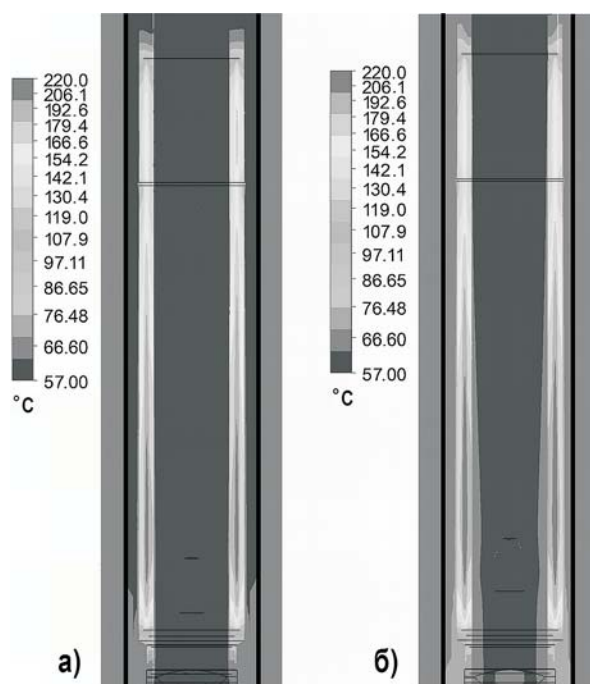


Рис. 5. Распределение температуры в зоне расположения мишеней: а) – верхняя мишень; б) – нижняя мишень

На рисунках 6, 7 показано распределение давления и скорости циркуляционной воды в вертикальном сечении экспериментального канала.

По рисунку 6 можно сделать вывод, что минимальное значение давления воды в

зоне расположения мишеней составляет 1,689 кПа, чему соответствует температура кипения $T_s \approx 115^\circ\text{C}$ [7].



Рис. 6. Распределение давления циркуляционной воды в вертикальном сечении канала

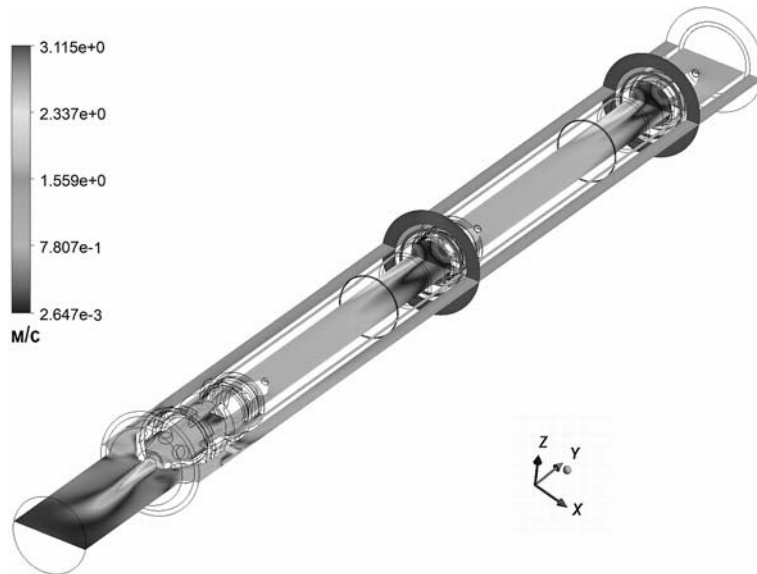


Рис. 7. Распределение скорости циркуляционной воды в вертикальном сечении канала

Из рисунка 7 видно, что наибольшее значение скорости (3,12 м/с) достигается в районе узла крепления головки мишени к её корпусу. В этой зоне появляется течение из трёх струй, что влияет на распределение температуры циркуляционной воды по радиусу канала. В зоне движения струи скорость течения имеет максимальное значение, а температура – минимальное.

Следует сказать, что имеются зоны, где температура корпуса мишеней на границе контакта с циркуляционной водой превышает температуру насыщения воды в канале. Это говорит о том, что в пристеночном слое присутствует локальное поверхностное кипение. Но так как температура основного ядра потока циркуляционной

воды значительно ниже температуры насыщения в канале ($T_s \approx 115^\circ\text{C}$), то подкипание будет сопровождаться быстрой конденсацией паровых пузырей и не приведет к развитому кипению [8, 9]. Что также подтверждается значением максимальной температуры воды на выходе из расчётной области ($72,85^\circ\text{C}$). Данный вид кипения называется кипением с недогревом [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана мишень модернизированной конструкции, которая полностью удовлетворяет требованиям производства Mo-99 на базе инженерно-технологического комплекса реактора ВВР-ц. Конструкция модернизированной мишени позволяет внедрить её в цикл производства без дополнительных затрат со стороны предприятия. Модернизированная мишень более оптимально использует особенности распределения плотности потока нейтронов в экспериментальном канале реактора за счет измененных, по сравнению со стандартной мишенью, геометрических размеров.

Количество радиоактивных отходов при увеличении наработки Mo-99 растёт пропорционально увеличению целевого радионуклида. Это допускается, и на это предусмотрены резервные технологические мощности. Выполняется главная цель – при ограниченном максимальном количестве мишеней (восемь шт.) появляется возможность производить дополнительный объём Mo-99 в случае увеличения потребностей заказчиков.

Проведённые расчётные исследования показывают увеличение количества нарабатываемого изотопа Mo-99 в мишени модернизированной конструкции на 21.41%.

В наиболее нагруженных зонах температура корпуса мишеней превышает температуру насыщения воды. В этих зонах проявляется поверхностное кипение. Вследствие этого увеличивается турбулизация и перемешивание пристеночного пограничного слоя воды. Это способствует улучшению теплоотдачи [10].

Литература

1. Кочнов О.Ю., Левченко Ю.Д., Чусов И.А. Теплогидравлическое обоснование возможности установки контейнеров с урансодержащим материалом в экспериментальный канал реактора ВВР-ц. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 62-72.
2. 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.
3. Kamayev D.A., Ukraintsev V.F., Hitrik, D.V. The use of interval calculation technique for fuel characteristic uncertainty estimations into a fuel cycle. / Proc. of the International Conference «Advances in Nuclear Analysis and Simulation». PHYSOR-2006.Vancouver.Canada. – Report B032. – 2006.
4. VisualBurnOut. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – № 2009617021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 декабря 2009 г.
5. Коркодинов Я.А. Обзор семейства k - ϵ -моделей для моделирования турбулентности. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2013. – Т. 15. – № 2. – С. 5-16.
6. Кочнов О.Ю., Колесов В.В., Зевякин А.С., Фомин Р.В. Теплогидравлический расчёт максимальной температуры топлива и воды в установке МАК-2. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127 – Вып. 3. – С. 135-137.
7. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
8. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчётам. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

9. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.
10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
11. Колесов В.В., Кочнов О.Ю., Фомин Р.В. Оценка увеличения производства ^{99}Mo при различных компоновках активной зоны на реакторе ВВР-ц. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 1. – С.110-116.
12. The Supply of Medical Radioisotopes «Medical Isotope Supply in the Future: Production Capacity and Demand Forecast for the $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Market, 2015-2020». – 2014.
13. Чусов И.А., Шелегов А.С., Кочнов О.Ю. Особенности конструкций исследовательских реакторов водо-водяного типа. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 3. – С. 116-126.
14. Ахмедзянов Д.А. Верификация расчёта процесса теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX. // Вестник Уфимского гос. авиац. техн. ун-та. – 2009. – Т. 13. – № 2. – С. 226 - 232.

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

Авторы

Пахолик Денис Анатольевич, ведущий инженер-физик, аспирант

E-mail: pakholikda@mail.ru

Кочнов Олег Юрьевич, главный инженер, д-р техн. наук

E-mail: kochnov2000@mail.ru

Колесов Валерий Васильевич, инженер I категории, канд. физ.-мат. наук

E-mail: kolesov@iate.obninsk.ru

Фомичев Владимир Владимирович, начальник участка дозиметрии, аспирант

E-mail: vovik19931993@mail.ru

UDC 621.039

INCREASING THE PRODUCTION OF THE Mo-99 ISOTOPE BY MODERNIZING THE DESIGN OF TARGETS IRRADIATED IN THE EXPERIMENTAL CHANNELS OF THE VVR-c REACTOR

Pakholik D.A., Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomichev V.V.

Karpov Research and Development Institute for Physical Chemistry JSC
6 Kievskoye Hwy, 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

There are various ways to obtain Mo-99. Some of them are widely used in industrial production, others are in the research stage with the aim of increasing the product yield. The main industrial method for obtaining Mo-99 using a nuclear reactor is the fragmentation method. This method provides for the presence of a uranium target and a nuclear reactor. The target is placed in the channel of the reactor core and irradiated with neutrons for the required time. After that, the target is removed from the channel to the 'hot' chamber for the chemical separation of Mo-99. This is how Mo-99 is obtained practically all over the world.

The paper considers the fragmentation method for producing Mo-99, which is

implemented on the basis of the engineering and technological complex of the VVR-c research nuclear reactor. In order to increase the yield of Mo-99, a modernized model of the 'pipe-in-pipe' target is proposed. The assessment of the production of Mo-99 and the cooling efficiency of the modernized target was carried out. The calculations were performed using the VisualBurnOut and Ansys CFX software packages. Computational studies have shown an increase in the energy release and the amount of the produced Mo-99 isotope in the target of the modernized design. In the most stressed zones, the target wall temperature exceeds the water saturation temperature. Surface boiling occurs in these zones. As a result, turbulization and mixing of the near-wall boundary water layer increases. This improves heat dissipation.

Key words: molybdenum-99, VVR-c reactor, experimental channel, target for the production of Mo-99.

REFERENCES

1. Kochnov O.Yu., Levchenko Yu.D., Chusov I.A. Thermal-hydraulic substantiation of the possibility of installing containers with uranium-containing material in the experimental channel of the VVR-ts reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 3, pp. 62-72 (in Russian).
2. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Fomin R.V. Evaluation of energy release in a target with uranium-containing material during the production of ^{99}Mo using targets of an improved design at the VVR-ts reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 4, pp. 23-29 (in Russian).
3. Kamayev D.A., Ukraintsev V.F., Hitrik D.V. The use of interval calculation technique for fuel characteristic uncertainty estimations into a fuel cycle. *Proc. of the International Conference «Advances in Nuclear Analysis and Simulation». PHYSOR-2006*. Vancouver, Canada. Report B032. 2006.
4. *VisualBurnOut*. Certificate of state registration of the computer program No. 2009617021. Registered in the Register of Computer Programs on December 9, 2009 (in Russian).
5. Korkodinov Ya.A. An overview of a family of $k-\varepsilon$ models for turbulence modeling. *Vestnik Permskogo Gosudarstvennogo Politekhnicheskogo Universiteta*. 2013, v. 15, no. 2, pp. 5-16 (in Russian).
6. Kochnov O.Yu., Kolesov V.V., Zevyakin A.S., Fomin R.V. Thermal-hydraulic calculation of the maximum fuel and water temperature in the MAK-2 unit. *Atomnaya Energiya*. 2019, v. 127, iss. 3, pp. 135-137 (in Russian).
7. Rivkin S.L., Alexandrov A.A. *Thermophysical Properties of Water and Steam*. Moscow. Energiya Publ., 1980, 424 p. (in Russian).
8. Kirillov P.L., Yuriev Yu.S., Bobkov V.P. *Handbook on Thermohydraulic Calculations*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990, 360 p. (in Russian).
9. Kutateladze S.S., Borishansky V.M. *Heat Transfer Handbook*. Moscow. Gosenergoizdat Publ., 1958, 414 p. (in Russian).
10. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Basics of Heat Transfer*. Moscow. Energiya Publ., 1977, 344 p. (in Russian).
11. Kolesov V.V., Kochnov O.Yu., Fomin R.V. Evaluation of the increase in ^{99}Mo production with different core layouts at the VVR-ts reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 1, pp. 110-116 (in Russian).
12. The Supply of Medical Radioisotopes «Medical Isotope Supply in the Future: Production Capacity and Demand Forecast for the $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Market, 2015-2020». 2014.
13. Chusov I.A., Shelegov A.S., Kochnov O.Yu. Features of the design of research reactors of pressurized water type. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 3, pp. 116-126 (in Russian).

14. Akhmedzyanov D.A. Verification of the calculation of the heat transfer process in the ANSYS CFX software package. *Vestnik Ufimskogo Gosudarstvennogo Aviatsionnogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2009, v. 13, no. 2, pp. 226-232 (in Russian).

Authors

Pakholik Denis Anatolievich, Leading Engineer Physics, PhD Student

E-mail: pakholikda@mail.ru

Kochnov Oleg Yurievich, Chief Engineer, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: kochnov2000@mail.ru

Kolesov Valery Vasilievich, First Category Engineer, Cand. Sci. (Phys. - Math.)

E-mail: kolesov@iate.obninsk.ru

Fomichev Vladimir Vladimirovich, Head of Dosimetry Section, PhD Student

E-mail: vovik19931993@mail.ru