

кого развития регионов, в том числе и горных. Другими словами, как сконцентрировать рассеянные деятельностью человека ресурсы и как рассеять сконцентрированные отходы его деятельности.

Таким образом, основное направление деятельности (стратегия и план действий), обеспечивающее устойчивое развитие горных территорий Республики, должно быть направлено на сохранение и рациональное использование ресурсов, биологического и ландшафтного разнообразия в целях устойчивого социально-экономического развития Киргизской Республики. Важнейший аспект охраны природных экосистем – разработка эколого-биологических основ рационального использования естественной экосистемы. Планирование мероприятий по приведению объектов уранового наследия в хвостохранилищах и отвалах в безопасное состояние должно включать рассмотрение не только стратегию стабилизации (консервации) или другие альтернативные долговременные мониторинговые пути решения проблемы, а также проведение социальных мер по дезактивации и обустройству, социальной перспективы и др.

Литература

1. Айтматов И.Т., Торгоев И.А., Алешин Ю.Г. Геоэкологические проблемы в горнопромышленном комплексе Кыргызстана // *Наука и новые технологии*. – 1997. – № 1. – С. 57–65.
2. Бакиров А. Минеральные богатства Кыргызстана // *Наука и новые технологии*. – 1997. – № 4. – С. 52–60.
3. Боконбаев К.Ж. Проблемы экологии высокогорных регионов (на примере Кыргызского Тянь-Шаня) // *Наука и новые технологии*. – 1997. – № 4. – С. 126–128.
4. Горный саммит [Электронный ресурс]. – Бишкек, 2002. – URL: www.globalmountainsummit.org.
5. Доклад ООН Комиссии по окружающей среде, сельскому хозяйству, местным и региональным вопросам (Ассамблея 20 июня 2005 года, 17-е заседание).
6. Дженбаев Б.М., Калдыбаев Б.К., Жолболдиев Б.Т. Проблемы радиэкологии и радиационной безопасности бывших урановых производств в Кыргызстане // *Радиационная биология. Радиэкология*. – 2013. – Т. 53, № 4. – С. 428–431.
7. Дженбаев Б.М., Мурсалиев А.М. Биогеохимия природных и техногенных экосистем Кыргызстана. – Б. : Илим, 2012. – 404 с.
8. Ермаков В.В. Геохимическая экология как следствие системного изучения биосферы // *Тр. биогеохим. лаб.* – М. : Наука, 1998. – Т. 23. – С. 152–183.
9. Урановые биогеохимические пищевые цепи в условиях Иссык-Кульской котловины / В.В. Ковальский, И.Е. Воротницкая, В.С. Лекарев и др. // *Труды Биогеохимической лаборатории*. – М. : Наука, 1968. – [Т.] 12. – С. 25–53.
10. Котляков В.М. Избранные сочинения. – М. : Наука, 2001. – Кн. 3. География в меняющемся мире. – 411 с.
11. Мамытов А.М. Почвенные ресурсы и вопросы земельного кадастра Кыргызской Республики. – Бишкек : Кыргызстан, 1996. – 240 с.
12. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). СП 2.6.1.799-99.
13. Проблема горной отрасли в Кыргызской Республике. – 2012. – 192 с.
14. Современное состояние и перспективы развития горно-геологической отрасли. – Бишкек, 2013. – 213 с.
15. Торгоев И.А, Алешин Ю.Г. Геоэкология и отходы горнопромышленного комплекса Кыргызстана. – Бишкек : Илим, 2009. – 240 с.
16. Radioecological Assessment of the Uranium Tailings in Tuyuk-Suu (Kyrgyzstan) / B.M. Djenbaev, B.T. Zholboldiev, T.N. Zhumaliev et al. // *Journal of Geological Resource and Engineering*. – 2015. - Vol. 3, No. 2. – P. 89–97.
17. Djenbaev B.M., Kaldybaev B.K., Zholboldiev B.T. Radioactive waste. – 2012. – 502 p.
18. Monitoring and remediation of the legacy sites of uranium mining in Central Asia / A. Jakubick, M. Kurylchuk, O. Voitsekovic et al. // *Uranium, Mining and Hydrogeology*. – 2008. – P. 389–405.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ АКТИВНОСТИ И НУКЛИДНОГО СОСТАВА ТВС ТИПА ИРТ-3М ВО ВРЕМЯ ХРАНЕНИЯ

С.К. Дмитриев, М.Н. Аникин, И.И. Лебедев, О.К. Колесова

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия, dmitriev@sibmail.com

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR THE EVALUATING OF ACTIVITY AND NUCLIDE COMPOSITION FOR IRT-3M TYPE FUEL ASSEMBLIES DURING STORAGE

S.K. Dmitriev, M.N. Anikin, I.I. Lebedev, O.K. Kolesova

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Analytical dependencies were obtained for spent fuel assembly. Using these dependencies allow calculate nuclide composition depending on the burnout and the activity of fuel assembly depending on the storage time. Using the obtained results mathematical model was developed, and based on the model program was developed. This program calculates the activity of FA at any time considering time and mode of operation. The resulting computational model showed high agreement with the experimental data, and this, in turn, allows for further research activity of the irradiated fuel assembly at the stage of storage and recycling.

Исследовательский реактор ИРТ-Т

Реактор ИРТ-Т является исследовательским реактором бассейнового типа с использованием воды в качестве замедлителя, теплоносителя и верхней биологической защиты. Он является источником нейтронного и гамма излучения и предназначен для проведения научно-исследовательских работ по физике твердого тела, нейтронно-активационному анализу элементного состава веществ, производству радионуклидов, легированию кремния, нейтронной радиографии и других работ, связанных с использованием реакторного излучения. Реактор имеет водно-бериллиевый замедлитель и отражатель [2].

В активной зоне реактора используются тепловыделяющие сборки (ТВС) типа ИРТ-3М – восьмитрубные и шеститрубные. В таблице 1 приведены характеристики ТВС реактора ИРТ-Т.

Определение концентраций нуклидов в ТВС ИРТ-3М во время эксплуатации

В настоящее время вопрос об изменении нуклидного состава ядерного топлива в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов по-прежнему остается актуальным. Во время работы ядерного реактора в тепловыделяющих элементах образуется огромное количество нуклидов, являющихся источниками ионизирующего излучения. Таким образом, зная нуклидный состав топлива, задача определения радиационных характеристик облученного ядерного топлива становится легко выполнимой.

Основными параметрами, характеризующими облученные тепловыделяющие сборки (ОТВС) являются начальное количество ядерного топлива, энерговыработка ТВС, а также время выдержки после извлечения сборки из активной зоны. Таким образом для создания математической модели для определения активности ОТВС в любой момент времени в качестве входных данных используется значение концентраций нуклидов, образующихся в ядерном топливе, а также время хранения сборок.

В настоящей работе для расчета концентраций нуклидов, образующихся в ТВС типа ИРТ-3М при выгорании, использовалась высокодетализированная модель ТВС, применяемая в верифицированной полномасштабной модели реактора ИРТ-Т разработанной в прецизионной программе MCU-PTR с библиотекой оцененных ядерных данных MDBPT50 [5]. В расчетах применялась

кусочно-постоянная интерполяция сечений взаимодействия нуклидов и плотности потока нейтронов.

Были получены значения концентраций нуклидов, содержащихся в ядерном топливе при его выгорании, через каждые 50 эффективных суток работы реактора ИРТ-Т для 8-трубной и 6-трубной ТВС, что обеспечивает оптимальное соотношение точности и времени расчета [4]. Первоначально были выбраны те нуклиды, вклад которых в гамма-фон от облученной ТВС реактора ВВЭР-1000 при времени выдержки 3 года и глубине выгорания 40,5 (МВт-сут)/кгU составлял суммарно более 90% [1]. Перечень нуклидов указан в таблице 2.

На основе данных приведенных в таблице 2 и оценки характеристик топлива реактора ИРТ-Т, а также его режимов работы был выбран ряд нуклидов, определяющих активность отработавшей сборки ИРТ-3М во временном интервале от времени выгрузки ТВС из активной зоны до 100 лет хранения.

Поскольку при эксплуатации ТВС основным параметром, определяющим текущее состояние сборки, является глубина выгорания топлива, измеряемая в процентах от начальной загрузки U^{235} и рассчитываемая исходя из энерговыработки в текущей кампании реактора, то для каждого нуклида была получена аналитическая зависимость концентрации от глубины выгорания U^{235} [6, 7]. По полученным зависимостям были построены функции изменения концентрации каждого нуклида в ТВС. На рисунках 1–3 приведены зависимости, характеристический вид которых соответствует распадаемым нуклидам (для 8-трубной ТВС).

Таким образом, применяя полученные аналитические зависимости, можно точно определить значения

Таблица 2. Вклад различных изотопов в источник гамма-квантов

| Изотоп | Доля, % |
|--------------------|---------|
| Sr ⁹⁰ | 2,04 |
| Y ⁹⁰ | 12,52 |
| Rh ¹⁰⁶ | 20,57 |
| Sb ¹²⁵ | 1,70 |
| Cs ¹³⁴ | 21,54 |
| Ba ^{137m} | 14,80 |
| Ce ¹⁴⁴ | 4,18 |
| Pr ¹⁴⁴ | 11,38 |
| Eu ¹⁵⁴ | 1,78 |
| Всего | 90,49 |

Таблица 1. Характеристики ТВС ИРТ-Т

| Параметр | Значение |
|--|----------------------------|
| Количество твэлов в ТВС, шт. | 8 (6) |
| Тип твэла | трехслойный, дисперсионный |
| Толщина стенки твэла, мм | 1,4 |
| Обогащение топлива по U-235, % | 90 |
| Содержание U-235 в ТВС, г | 300 (264) |
| Концентрация U-235 в активной зоне, г/л | 101 (89) |
| Количество U-235, приходящегося на единицу площади поверхности теплообмена, г/м ² | 192 |
| Поверхность теплоотдачи ТВС, м ² | 1,56 (1,37) |

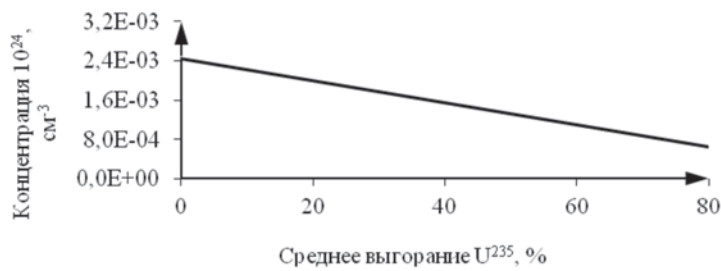


Рис. 1. Зависимость концентрации U^{235} от глубины выгорания (линейное изменение)

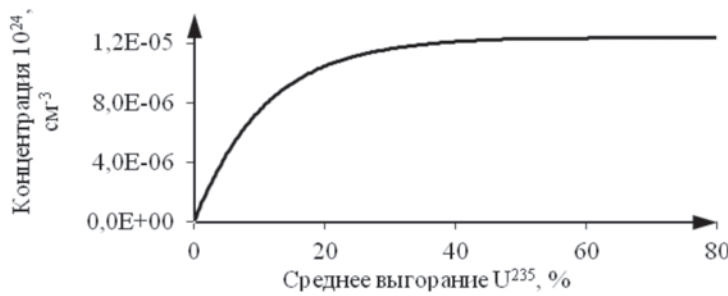


Рис. 2. Зависимость концентрации Y^{91} ТВС от глубины выгорания (логарифмическое изменение)

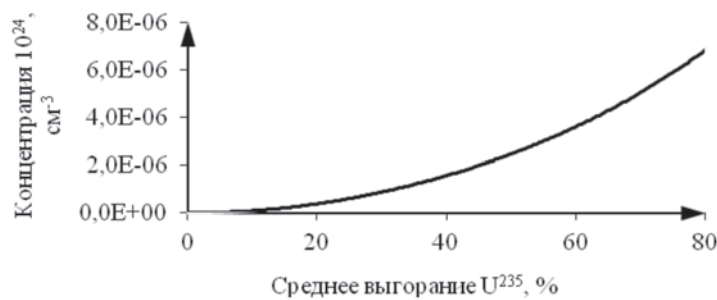


Рис. 3. Зависимость концентрации Cs^{134} ТВС от глубины выгорания (экспоненциальное изменение)

концентраций рассматриваемых нуклидов на момент выгрузки ОТВС из реактора в зависимости от достигнутой глубины выгорания конкретной тепловыделяющей сборки.

Математическая модель расчета концентраций нуклидов в ТВС ИРТ-3М во время хранения

В настоящей работе, при расчете концентраций нуклидов в сборке во время хранения, были использованы соотношения на основе закона сложного радиоактивного распада, который имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t), \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t), \\ \frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_{i-1} N_{i-1}(t) - \lambda_i N_i(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $N_i(t)$ – концентрация i -го нуклида в момент времени t , $см^{-3}$; λ_i – постоянная распада i -го нуклида, $с^{-1}$.

Используя численные многошаговые методы решения дифференциальных уравнений, соотношение (1) можно привести к виду:

$$N_i^k = [\lambda_{i-1} N_{i-1}^{k-1} - \lambda_i N_i^{k-1}] \cdot \Delta t + N_i^{k-1}, \quad (2)$$

где Δt – временной шаг расчета, $с$; k – номер итерации.

Соотношение (2) использовалось для расчета концентраций каждого нуклида в ОТВС ИРТ-3М, с временным шагом $\Delta t = 60$ с, что обеспечивает высокую точность и оптимальное время расчета. Полученные значения концентраций с помощью соотношения (2) сравнивались с расчетными значениями, полученными с помощью прецизионной программы MCU-PTR. При учете всех нуклидов, период полураспада которых сопоставим с временным шагом расчет, в каждой цепочке распада, численные многошаговые методы дают высокую точность расчета, с погрешностью не более 1,5%.

Расчет активности ОТВС ИРТ-3М

Активность смеси радиоактивных изотопов является интегральной характеристикой и численно равна количеству распадов, которые происходят в смеси в единицу времени. При данном определении активности ОТВС, как правило, учитываются только альфа-, бета-распады, а также распады метастабильных изотопов, которые часто происходят путем испускания гамма-кванта. Испускание гамма-квантов в процессе бета-распада не рассматривается как распадный процесс [3]. В течение первых 100 лет хранения после остановки ре-

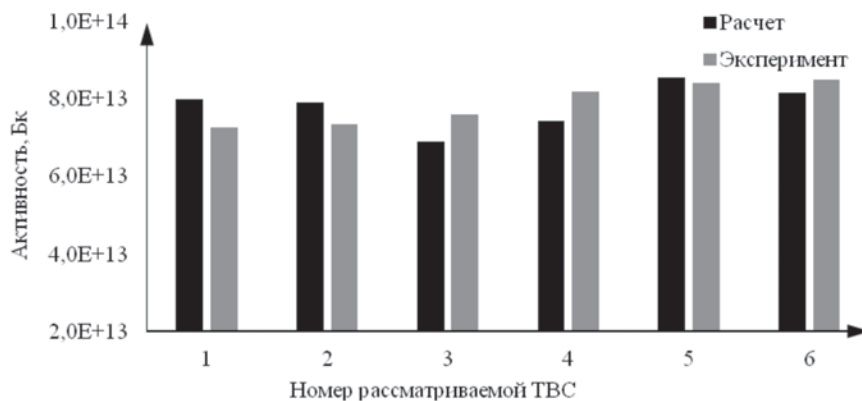


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений активности некоторых 8-трубных ТВС ИРТ-3М

актора активность практически полностью определяется бета-распадами продуктов деления, которые вносят определяющий вклад в энерговыделение и создают значительный гамма-фон вокруг отработавших сборок. Для расчета активности ОТВС используется хорошо известная формула:

$$A(t) = \sum_{i=1}^I \lambda_i \cdot N_i^{\Sigma}(t), \quad (3)$$

где $N_i^{\Sigma}(t)$ – количество ядер i -го элемента в ОТВС.

Из формулы (3) видно, что помимо постоянной распада и концентрации каждого нуклида, для расчета активности ОТВС необходимо знать общее количество ядер каждого нуклида в сборке. В свою очередь общее количество ядер каждого нуклида для 6- и 8-трубной ТВС ИРТ-3М при одном режиме эксплуатации будет различным, что обусловлено разным содержанием U^{235} в сборке, а также различием в геометрии сборок. Таким образом, для расчета суммарного количества ядер в сборке использовалась формула:

$$N_i^{\Sigma}(t) = N_i(t) \cdot V, \quad (4)$$

где V – суммарный объем топливного сердечника в ТВС, $см^3$.

Для 6- и 8-трубной ТВС ИРТ-3М значения суммарного объема энерговыделяющих элементов равны 305 и 345 $см^3$ соответственно.

По описанной математической модели была написана программа, позволяющая определять концентрации, содержание ядер в ТВС и активность рассматриваемых в настоящей работе нуклидов, а, следовательно, с большой точностью активность ОТВС ИРТ-3М в любой момент времени хранения, с учетом времени и режимов эксплуатации энерговыделяющей сборки. Полученная расчетная модель показала высокое соответствие с экспериментальными данными. Сравнение некоторых ОТВС представлено на рисунке 4.

Заключение

В ходе выполнения работы были получены аналитические зависимости изменения концентраций нуклидов, образующихся в ТВС в процессе выгорания топлива. Полученные зависимости использовались в качестве

входных данных для моделирования процесса радиоактивного распада нуклидов, оказывающих существенный вклад в активность и гамма-фон ОТВС.

Таким образом, была создана модель для расчета концентраций и активности нуклидов, оказывающих существенный вклад в гамма-фон и активность ОТВС ИРТ-3М, с учетом режима эксплуатации ядерной установки, глубины выгорания ядерного топлива, а также времени хранения облученной энерговыделяющей сборки.

На основе разработанной модели, была написана программа, которая производит расчет 6-ти и 8-ми трубной ТВС ИРТ-3М. Созданная расчетная модель показала высокое соответствие с экспериментальными данными, а это, в свою очередь, позволяет производить дальнейшие исследования активности облученной энерговыделяющей сборки на этапе хранения и утилизации.

Литература

1. Бекман И.Н. *Ядерная индустрия : курс лекций*. – М., 2005. – 870 с.
2. *Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т / В.А. Варлачев, Г.Г. Глухов, В.С. Скуридин и др. ; Томский политехнический университет*. – 2011.
3. *Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами в атомной энергетике / Н.Н. Давиденко, К.В. Куценко, Г.В. Тихомиров, А.А. Лаврухин*. – НИЯУ МИФИ, 2007.
4. *Кинетика изменения нуклидного состава топлива в энерговыделяющих сборках реактора ИРТ-Т / С.К. Дмитриев, А.С. Бусыгин, И.И. Лебедев и др.; Томский политехнический университет*. – 2015.
5. Alekseev N.I., Gomin E.A. *MCU-PTR program for high-precision calculations of pool and tank type research reactors // Atomic En.* – 2011. – [Vol.] 109/3. – P. 149–158.
6. *Feasibility study of using new fuel composition in IRT-T research reactor / A.G. Naymushin et al. // Advanced Materials Research*. – 2015. – [Vol.] 1084. – С. 306–308.
7. *Thermal analysis of IRT-T reactor fuel elements / A.G. Naymushin et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 93: *Modern Technique and Technologies (MTT'2015)*.