

^{1,2}Д.С. Сайранбаев , ¹С.Н. Колточник,
¹А.А. Шаймерденов, ^{1,2}Е.А. Кенжин ,
¹А.Н. Альмагамбетов, ³К. Цучия

¹РГП «Институт ядерной физики» Министерства Энергетики Республики Казахстан,
 Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

³Агентство атомной энергии Японии, Япония, г. Оарай,
 e-mail: darkhan.sairanbay@gmail.com

ДИНАМИКА ВЫГОРАНИЯ БОРА-10 В СТЕРЖНЯХ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА ВВР-К

Аннотация. В 2015 году в рамках перевода реактора ВВР-К на топливо пониженного обогащения проведена модернизация основных систем реактора, включая полную замену системы управления и защиты (СУЗ) реактора. Энергонапряженность в новой, более компактной активной зоне стала заметно выше, изменились количество и геометрические параметры рабочих органов (РО) СУЗ. В качестве материала поглотителя в РО СУЗ используется карбид бора с естественным изотопным составом. РО СУЗ отвечают за управление цепной ядерной реакцией деления урана. Реактор ВВР-К – это стационарный исследовательский реактор, поэтому для его работы необходимо создать первоначальный запас реактивности. В начале рабочего цикла реактора большая часть стержня СУЗ погружена в активную зону. В процессе работы реактора, стержень постепенно извлекается из активной зоны вследствие «отравления» активной зоны и выгорания урана. На изотопе бор-10 протекает ядерная реакция с поглощением теплового нейтрона и образованием альфа-частицы и изотопа литий-7, что приводит к уменьшению ядер исходного изотопа, т.е. выгоранию бора-10. Уменьшение массы изотопа бор-10 в стержне СУЗ приведет к уменьшению его физической эффективности, что напрямую влияет на ядерную безопасность реактора. Важным критерием работы ядерного реактора является создание подкритичности активной зоны для безопасного останова цепной ядерной реакции. Подкритичность активной зоны зависит от суммарной эффективности стержней компенсации реактивности. В настоящей работе приведена количественная оценка выгорания бора-10 в РО СУЗ реактора ВВР-К. Показано влияние выгорания изотопа бор-10 на физическую эффективность стержней СУЗ при их длительной эксплуатации в активной зоне реактора ВВР-К. Рассмотрены временные интервалы 1, 3 и 10 лет. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования ресурса и безопасности эксплуатации стержней СУЗ реактора ВВР-К. Расчеты проведены с помощью программного средства MNCР6 с библиотекой ядерных констант ENDF/B-VII.1.

Ключевые слова: бор, РО СУЗ, выгорание, ВВР-К.

^{1,2}D.S. Sairanbayev, ¹S.N. Koltchnik, ¹A.A. Shaimerdenov,
^{1,2}Y.A. Kenzhin, ¹A.N. Almagambetov, ³K. Tsuchiya

¹RSE Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan,
 Kazakhstan, Almaty

²Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

³Japan Atomic Energy Agency, Japan, Oarai
 e-mail: darkhan.sairanbay@gmail.com

Dynamics of boron-10 burning out in the control rods of reactivity of the WWR-K reactor

Abstract. In 2015, as part of the conversion of the WWR-K reactor to low enrichment fuel, the main reactor systems were modernized, including the complete replacement of the reactor control and protection system (CPS). The energy intensity in the new, more compact core has become noticeably higher, the number and geometric parameters of the working bodies (WB) of the CPS have changed. Boron carbide with a natural isotopic composition is used as the material of the absorber in the CPS WB. CPS WB are responsible for managing the nuclear fission chain reaction of uranium. The WWR-K reactor is a

stationary research reactor, so for its operation it is necessary to create an initial reactivity margin. At the beginning of the reactor operating cycle, most of the CPS rod is immersed in the core. During the operation of the reactor, the rod is gradually removed from the core due to the "poisoning" of the core and the burning of uranium. A nuclear reaction proceeds on the boron-10 isotope with absorption of a thermal neutron and the formation of an alpha particle and a lithium-7 isotope, which leads to a decrease in the nuclei of the initial isotope, i.e. burnout of boron-10. A decrease in the mass of the boron-10 isotope in the CPS rod will lead to a decrease in its physical efficiency, which directly affects the nuclear safety of the reactor. An important criterion for the operation of a nuclear reactor is the creation of subcriticality of the core for the safe shutdown of a nuclear chain reaction. The subcriticality of the core depends on the total efficiency of the reactivity compensation rods. In this work, a quantitative assessment of the burnup of boron-10 in the WB of the WWR-K reactor is presented. The effect of burnout of the boron-10 isotope on the physical efficiency of CPS rods during their long-term operation in the core of the WWR-K reactor is shown. The time intervals of 1, 3 and 10 years are considered. The obtained results can be used to justify the resource and safety of operation of the control and safety rods of the WWR-K reactor. The calculations were performed using the MNCP6 software with the library of nuclear constants ENDF/B-VII.1.

Key words: boron, CPS WB, burnout, WWR-K, reactivity.

^{1,2}Д.С. Сайранбаев, ¹С.Н. Колточник, ¹А.А. Шаймерденов,
^{1,2}Е.А. Кенжин, А.Н. ¹Альмагамбетов, ³К. Цучия

¹ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РММ, Қазақстан, Алматы қ.
²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
³Жапонияның атом энергиясы жөніндегі агенттігі, Жапония, Оарай
e-mail: darkhan.sairanbay@gmail.com

ССР-Қ реакторының реактивтілік компенсациялық өзектеріндегі бор-10 күйіп кетудің динамикасы

Аңдатпа. 2015 жылы ССР-Қ реакторын төмен байытылған отынға ауыстыру аясында негізгі реакторлық жүйелер жаңартылды, оның ішінде реакторларды басқару және қорғау жүйесі (БҚЖ) толық ауыстырылды. Жаңа, неғұрлым белсенді аумағындағы энергия сыйымдылығы едәуір жоғарылайды, БҚЖ жұмысшы органдарының (ЖО) саны және геометриялық параметрлері өзгерді. Табиғи изотопты құрамы бар бор карбиді БҚЖ ЖО-да сіңіргіш зат ретінде қолданылады. БҚЖ ЖО уранның ядролық бөліну тізбегінің реакциясын басқаруға жауап береді. ССР-Қ реакторы стационарлық зерттеу реакторы болып табылады, сондықтан оның жұмыс істеуі үшін бастапқы реактивтілік қорын құру қажет. Реактордың жұмыс циклінің басында БҚЖ өзегінің көп бөлігі белсенді аумаққа батырылған. Реакторды пайдалану кезінде өзек біртіндеп «улану» және уранның күйіп қалуы салдарынан өзекшеден біртіндеп алынады. Ядролық реакция бор-10 изотопында жылу нейтронының сіңірілуімен және альфа бөлшегі мен литий-7 изотопының түзілуімен жүреді, бұл бастапқы изотоптың ядроларының төмендеуіне әкеледі, яғни бор-10 күйіп кетуі. БҚЖ өзегіндегі бор-10 изотопының массасының төмендеуі оның физикалық тиімділігінің төмендеуіне әкеледі, бұл реактордың ядролық қауіпсіздігіне тікелей әсер етеді. Ядролық реактордың жұмысының маңызды критерийі – ядролық тізбекті реакцияны қауіпсіз тоқтату үшін ядроның субкритикалықты құру. Белсенді аумағының субкритикалығы реактивтілік компенсациялық өзектерінің жалпы тиімділігіне байланысты. Бұл жұмыста ССР-Қ реакторының БҚЖ ЖО-да бор-10 күйіп кетуіне сандық баға берілген. Бор-10 изотопының күйіп кетуінің БҚЖ өзектерінің ССР-Қ реакторының белсенді аумағында ұзақ уақыт жұмыс істеген кездегі физикалық тиімділігіне әсері көрсетілген. 1, 3 және 10 жылдар уақыт интервалдары қарастырылады. Алынған нәтижелер ССР-Қ реакторының басқару және қорғаныс тіректерін пайдалану қауіпсіздігі мен қорғалуын негіздеу үшін пайдаланылуы мүмкін. Есептеулер ENDF/B-VII.1 ядролық константалар кітапханасымен бірге MNCP6 бағдарлама қолдану арқылы жүргізілді.

Түйін сөздер: бор, БҚЖ ЖО, күйіп кету, ССР-Қ.

Введение

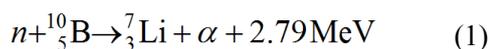
В 2016 году исследовательский реактор ВВР-К был переведен на топливо пониженного обогащения [1-4]. С сентября 2016 года начата его регулярная эксплуатация с низкообогащенным топливом. Номинальная тепловая мощность реактора составляет 6 МВт. Эксплуатация реак-

тора проводится рабочими циклами, длительностью 21 сутки. В течение одного календарного года, общее эффективное время эксплуатации реактора составляет 210 суток, с учетом двухмесячного останова на планово-профилактические работы.

В ядерном реакторе для управления цепной ядерной реакцией деления применяются стерж-

ни с поглотителем нейтронов. Поглотителем нейтронов могут служить разные материалы, но широкое распространение получил карбид бора [5-7]. Это обусловлено набором его уникальных свойств, такие как: большое сечение поглощения нейтронов в широком спектре энергий нейтронов (~4000 барн), высокая температура плавления (2240°C), химическая стабильность, низкая плотность (1.7-2.4 г/см³) и сравнительно низкая стоимость [5]. К стержням СУЗ реактора предъявляются требования правил ядерной безопасности, механической и радиационной стойкости, так как их работа напрямую влияет на безопасную эксплуатацию реактора. Стержни СУЗ должны сохранять свою эффективность в заданных пределах и целостность (внешнюю форму) для свободного перемещения внутри канала. Например, согласно техническому регламенту «Ядерная и радиационная безопасность» [8], стержни СУЗ относятся ко второму классу безопасности, т.е. их отказ может являться исходным событием, приводящему к проектной аварии. Главными факторами в ограничении срока службы РО СУЗ являются выгорание поглотителя (в нашем случае, бора-10) и радиационное повреждение компонентов стержней, под воздействием температуры и радиационного поля [9-18].

В настоящей работе рассмотрены динамика выгорания изотопа бор-10 и его влияние на эффективности стержней компенсации реактивности реактора ВВР-К, а также наработка гелия за разное время эксплуатации стержней СУЗ. Под выгоранием бора здесь понимается уменьшение массы бора-10 за счет ядерной реакции.



В результате ядерной реакции (1), в поглощающем стержне накапливается газ гелий, который может привести стержень к распуханию и разгерметизации, но в настоящей работе не проводится анализ радиационной стойкости стержней.

Материалы и методы

Активная зона реактора ВВР-К с топливом пониженного обогащения состоит из 17-ти восьмитрубных ТВС (ТВС-1) и 10-ти пятитрубных ТВС (ТВС-2). Все десять РО СУЗ (три стержня аварийной защиты – АЗ, шесть стержней компенсации избыточной реактивности – КО и один автоматический регулятор – АР) размещены внутри ТВС 2-го типа (см. рис. 1 и 2). Ис-

полнительные механизмы РО располагаются непосредственно на каналах, что делает возможным их установку практически в любую ячейку активной зоны. Использование однотипных каналов РО СУЗ, делает их взаимозаменяемыми. При появлении аварийного сигнала (например, при отключении внешнего электроснабжения) вместе с РО АЗ в активную зону под действием силы гравитации вводятся РО КО и РО АР. Поглощающий материал всех РО КО и РО АЗ – карбид бора (B₄C), а материал РО АР – нержавеющая сталь.

В РО КО и РО АЗ используются однотипные поглощающие стержни, состоящие из блочков карбида бора, размещенных внутри алюминиевой трубы. Суммарная длина поглощающей части стержня составляет 700 мм, тогда как высота активной зоны – 610 мм. Соотношение между изотопами бора в карбиде бора естественное (~80% бор-11 и ~20% бор-10). Исходная масса бора-10 в одном стержне принималась равной 52,63 г.

Расчеты проведены с помощью компьютерного кода MCNP6 с библиотекой ядерных констант ENDF/B-VII.1 [19, 20]. В созданном пользователем файле исходных данных моделируется детальная геометрия всех компонентов активной зоны реактора ВВР-К, включая РО СУЗ, а также все присутствующие в ней материалы. Скриншот горизонтального разреза смоделированной активной зоны с боковым бериллиевым отражателем (горизонтальная плоскость) показан на рисунке 3. Код MCNP6 выдает массы и ядерные концентрации бора-10 и наработанных продуктов реакции (1), а именно лития-7 и гелия-4 в материалах, выгорание которых пользователь хочет определить за заданное им время работы реактора. Нарботка гелия в стержнях оценивалась только по ядерной реакции (1), т.е. в расчетах не учитывалась наработка гелия по ядерной реакции (2), которая протекает при взаимодействии с быстрыми нейтронами (>4 МэВ).

С целью моделирования реальных условий работы стержней КО, при расчетах они были погружены в активную зону на 400 мм, что соответствует критическому положению (стационарное состояние). По высоте происходит неравномерное выгорание бора-10. Такое неравномерное выгорание бора-10 приводит к неравномерному по высоте выходу гелия под оболочку. Для определения этого градиента, каждый стержень был разбит на равные участки по 5 мм, в которых оценивалось выгорание бора-10 и газовыделение.



Рисунок 1 – ТВС ВВР-КН 2-го типа

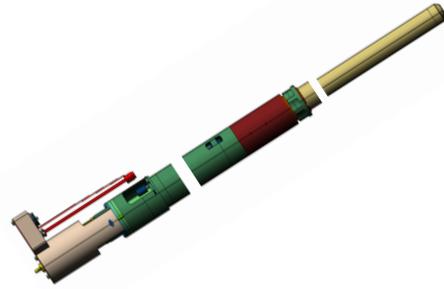


Рисунок 2 – Исполнительный механизм

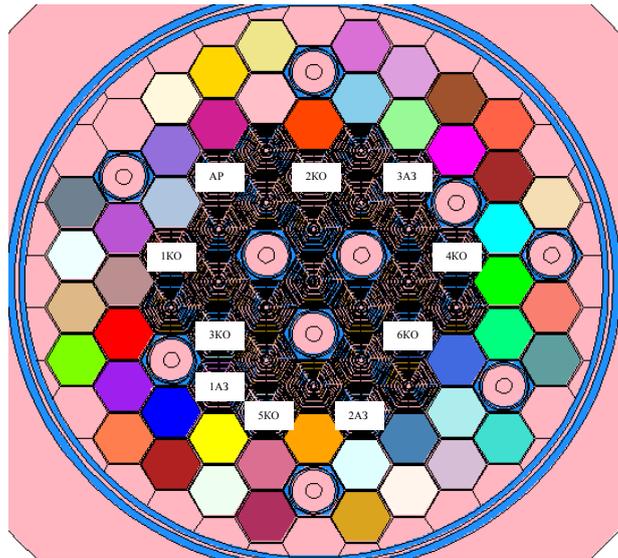
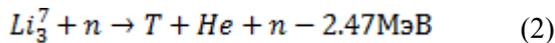


Рисунок 3 – Компьютерная модель активной зоны с бериллиевым отражателем. Горизонтальное сечение

В расчетах рассмотрены три временных промежутка работы реактора, 210, 630 и 2100 эффективных суток, что соответствует календарному времени работы реактора 1, 3 года и 10 лет, соответственно.



Результаты и их обсуждения

Дефицит массы (выгорание) В-10 и количество образовавшихся нуклидов Li-7 и He-4 показаны на рисунках 4, 5 и 6 и приведены в таблице 1.

В реальности, стержни КО в начале цикла погружены в активную зону примерно на 400 мм, далее происходит их быстрое извлечение из-за отравления активной зоны, а затем идет постепенное извлечение из-за выгорания топлива. Поэтому полученные оценки по выгоранию бора-10 являются консервативными.

Количество образованного гелия за 10 лет эксплуатации стержней СУЗ составит ~13 мг.

Рассмотрено влияние выгорание бора-10 на физическую эффективность РО СУЗ. Результаты приведены в таблице 2. Как видно из таблицы 2, влияние выгорания бора-10 за рассмотренный период на физическую эффективность стержней компенсации реактивности не значительно.

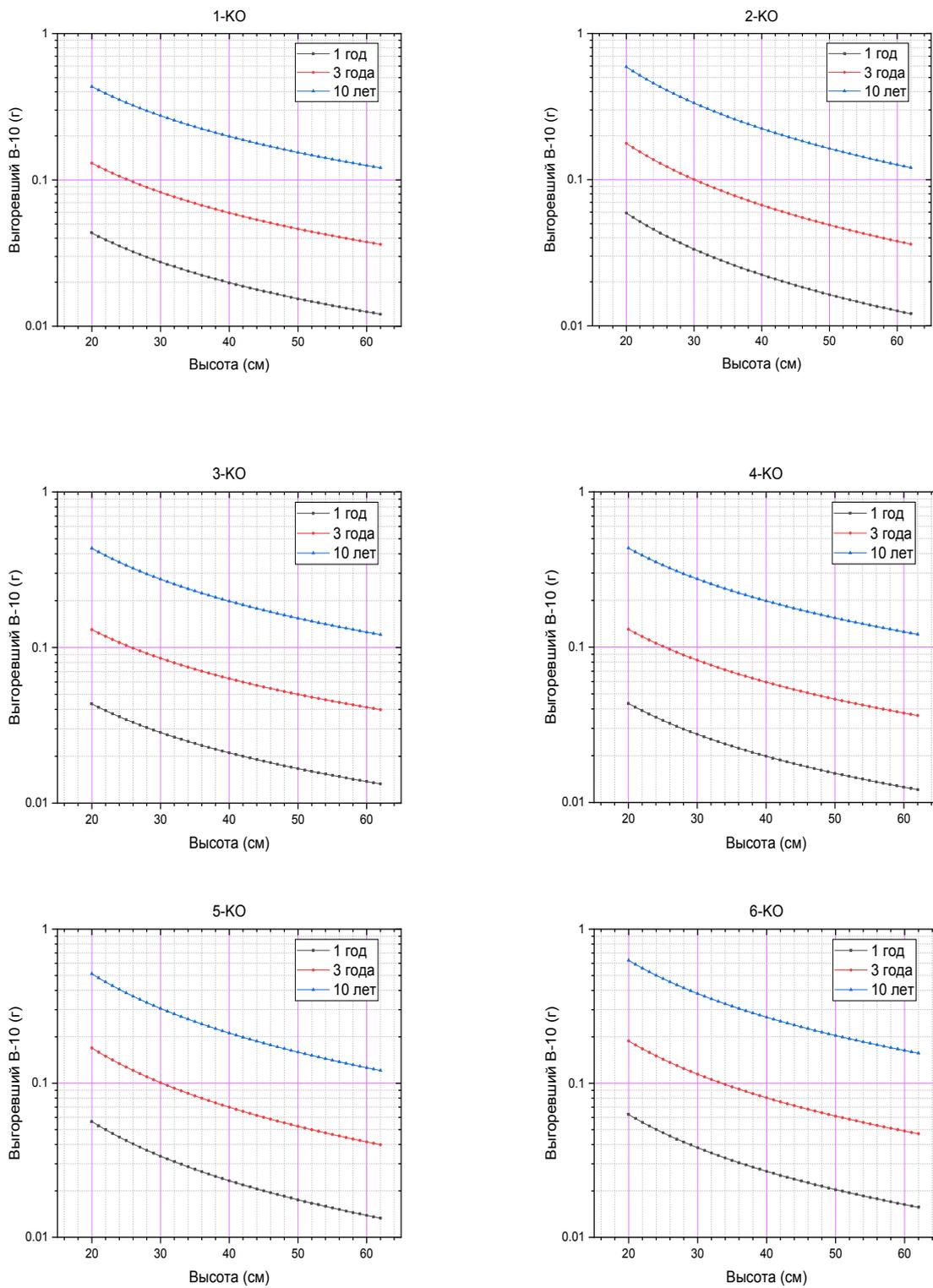


Рисунок 4 – Выгорание бора-10 по длине стержня

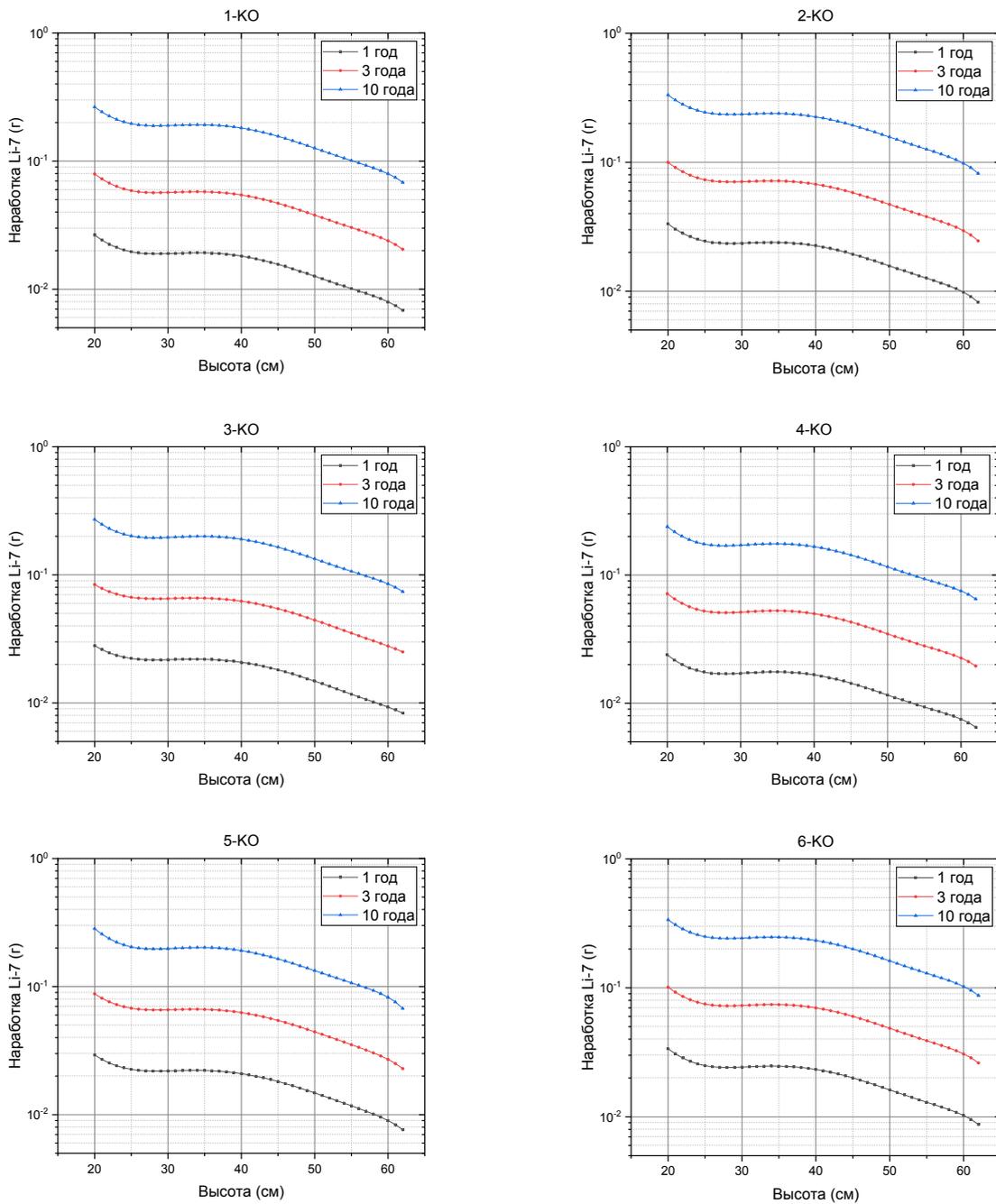


Рисунок 5 – Количество наработанного лития-7 в стержнях СУЗ

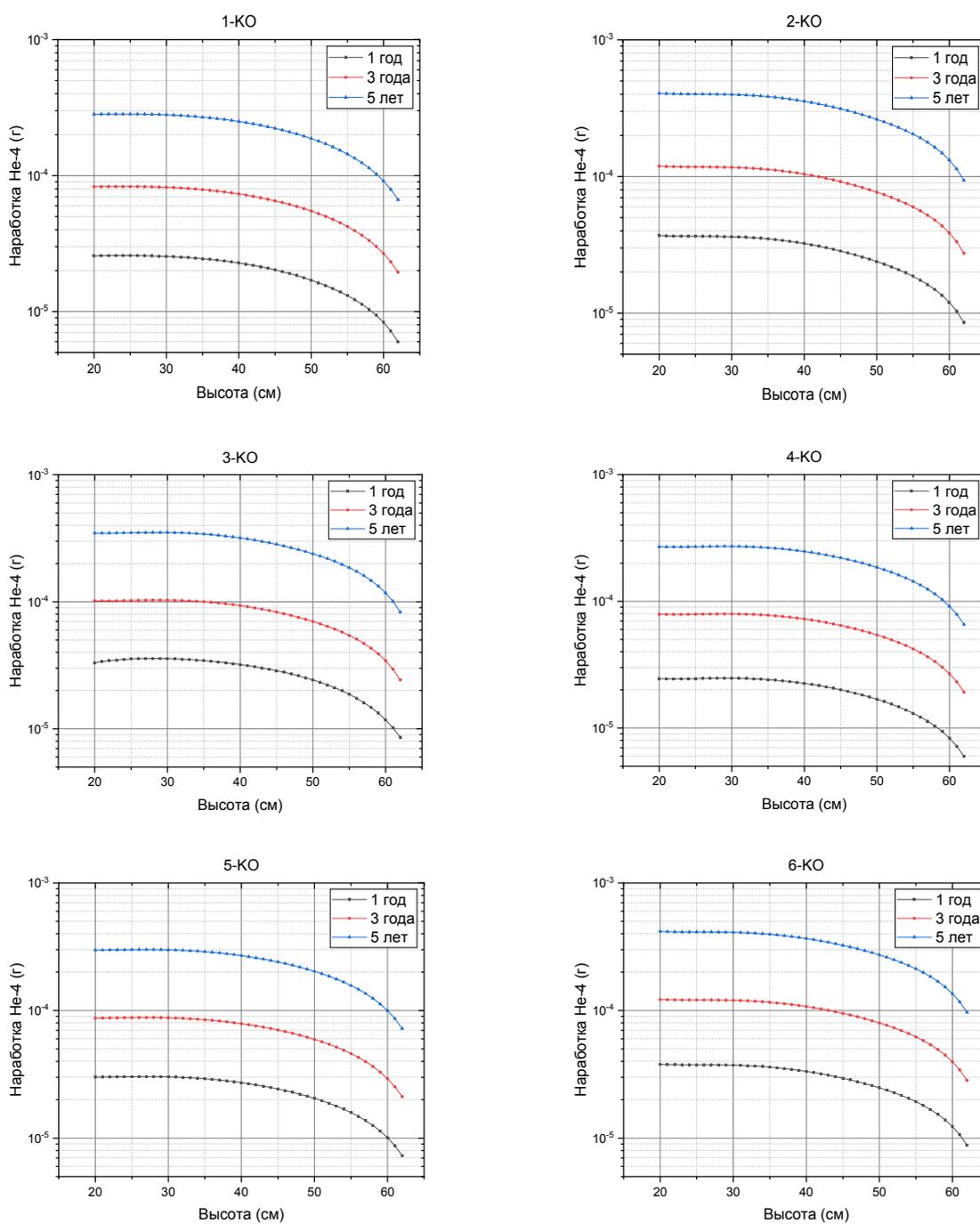


Рисунок 6 – Количество наработанного He-4 в стержнях СУЗ

Таблица 1 – Дефицит массы бора-10 и наработка Li-7 и He-4 за 1, 3, 10 лет работы реактора

Время эксплуатации реактора	1 год					
	1-КО	2-КО	3-КО	4-КО	5-КО	6-КО
РО СУЗ						
выгорание изотопа В-10, г	0,94	1,11	0,99	0,94	1,09	1,1
доля выгоревшего бора-10, %	1,79	2,11	1,88	1,78	2,07	2,09
наработка Li-7, г	0,68	0,85	0,78	0,62	0,79	0,84
наработка He, мг	0,86	1,22	1,20	0,84	1,03	1,20
Время эксплуатации реактора	3 года					
выгорание изотопа В-10, г	2,83	3,33	2,96	2,82	3,25	3,3
доля выгоревшего бора-10, %	5,4	6,3	5,6	5,4	6,2	6,3
наработка Li-7, г	2,05	2,55	2,35	1,87	2,36	2,45
наработка He, мг	2,78	3,94	3,50	2,70	3,00	3,91
Время эксплуатации реактора	10 лет					
выгорание изотопа В-10, г	9,42	12	9,42	9,42	10,28	11,9
доля выгоревшего бора-10, %	18	23	18	18	20	23
наработка Li-7, г	6,85	8,52	7,14	6,24	7,19	8,1
наработка He, мг	9,45	13,40	11,90	9,27	10,20	12,90

Таблица 2 – Значения эффективностей всех стержней КО РО СУЗ с учетом выгорания бора-10 и наработки Li-7 и He-4, % ΔК/К

	ко1	ко2	ко3	ко4	ко5	ко6
«Свежий» бор	1,07	1,86	1,22	0,83	1,14	1,85
1 год	1,07	1,85	1,21	0,81	1,14	1,85
3 года	1,07	1,85	1,21	0,83	1,12	1,84
10 лет	1,06	1,81	1,19	0,81	1,12	1,81

Выводы

В период 2015-2016 гг. проведена модернизация основных систем реактора ВВР-К отвечающих за его безопасную эксплуатацию. В новой активной зоне реактора ВВР-К с низкообогащенным топливом увеличено количество РО СУЗ и используются однотипные каналы РО СУЗ, что делает их взаимозаменяемыми. При отключении внешнего электроснабжения, все РО СУЗ погружаются в активную зону реактора под действием силы гравитации и переводят реактор в

безопасное состояние. Полученные оценки показывают, что дефицит массы бора-10 в поглощающих стержнях КО за 10 лет эффективной работы реактора составит, в среднем, 20%, однако влияние на эффективность РО СУЗ будет несущественным.

Полученные оценки по наработке гелия показали, что за 10 лет эксплуатации реактора ВВР-К в стержнях КО накопится не более 13 мг гелия. Для определения более точного количества образованного гелия необходимо также оценить его наработку по ядерной реакции (2).

Литература

- 1 Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чакров П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. // Атомная энергия. – 2017. – Т.123, №1. – С.15-20.
- 2 Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin, F.M. et al. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Phys. Atom. Nuclei. – 2018. – Vol. 81:10. – P.1408-1411.

- 3 Shaimerdenov A.A., Arinkin F.M., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Gizatulin Sh.Kh., Koltsochnik S.N. Physical and Power Start-up of WWR-K Research Reactor with LEU Fuel. // Proceeding of 37th International Meeting RERTR-2016. – Antwerp, Belgium. – 2016. – P.8.
- 4 Koltsochnik S.N., Sairanbayev D.S., Chekushina L.V., Gizatulin Sh.Kh., Shaimerdenov A.A. Comparison of neutron spectrum in the WWR-K reactor with LEU fuel against HEU one // Vestnik NYATC RK. – 2018. – Vol.4. – P.14-16.
- 5 Рисованный В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П., Гусева Т.М. Бор в ядерной технике. – Димитровград: ГНЦ НИИАР, 2011. – 668 с.
- 6 Keller H.W., Shallenberger J.M., Hollein D.A., Hott C., Development of hafnium and comparison with other pressurized water reactor control rod materials // Nuclear technology. – 1982. – Vol.5 (3). – P.476-482.
- 7 Subramanian C., Suri A.K. and Murthy T.S.R.Ch. Development of Boron-based materials for nuclear applications // BARC NEWSLETTER. – 2010. – Vol.313. – P.14-22.
- 8 Технический регламент «Ядерная и радиационная безопасность». Приказ Министра энергетики Республики Казахстан от 20 февраля 2017 года №58.
- 9 Светухин В.В., Кадочкин А.С., Салих-Заде П.Ф., Рисованный В.Д. Выход гелия из облученного порошка карбида бора под оболочку поглощающего элемента // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2007. – № 4. – С.68-74.
- 10 Фридман С.Р., Рисованный В.Д., Захаров А.В., Топорова В.Г. Радиационная стойкость ПЭЛ ПС СУЗ реакторов ВВЭР-100 с карбидом бора // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2001. – No2 (79). – С.84-90.
- 11 Баканов М.В., Желтышев В.А., Лыжин А.А., Мальцев В.В., Росляков В.Ф., Фарақшин М.Р. Оценка минимально возможной эффективности стержней СУЗ реактора БН-600. // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2005. – №1. – С.53-59.
- 12 Nosov V.I., Ponomarev-stepnoi N.N., Portnoi K.I., Savel'ev E.G. Dispersion-type absorber materials for thermal reactor control rods. //Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology. – 1965. – Vol.19, Is. 9. – P.720-728.
- 13 Savva P., Varvayanni M., Catsaros N. Dependence of control rod worth on fuel burnup // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, Is. 2. – P.492-497.
- 14 Maedeh Yari, Ahmad Lashkari, S. Farhad Masoudi, Mirshahram Hosseinipannah Three dimensional analysis of temperature effect on control rod worth in TRR // Nuclear Engineering and Technology. – 2018. – Vol.50, Is. 8. – P.1266-1276.
- 15 Boafu E.K., Alhassan E., Akaho E.H.K., Odoi C. Assessing the effect of fuel burnup on control rod worth for HEU and LEU cores of GHARR-1 // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol.5, Is. 4. – P.1129-1133.
- 16 Yuki Honda, Nozomu Fujimoto, Hiroaki Sawahata, Shoji Takada, Kazuhiro Sawa Burn-Up Dependency of Control Rod Position at Zero-Power Criticality in the High-Temperature Engineering Test Reactor // ASME J of Nuclear Rad Sci. – 2017. – Vol.3(1). – P. 011013 (4).
- 17 Khrais R.A., Tikhomirov G.V., Saldikov I.S. and Smirnov A.D. Neutronic analysis of VVER-1000 fuel assembly with different types of burnable absorbers using Monte-Carlo code Serpent // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – Vol.1189. – P.012002.
- 18 Amir Hosein Fadaei. Investigation of burnable poisons effects in reactor core design // Annals of Nuclear Energy. – 2011. – Vol. 38(10). –P.2238-2246.
- 19 MCNP6TM USER'S MANUAL – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 1. – Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013.
- 20 Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., Kahler A. C., Trkov A., Herman M.W. end et. al. ENDF/B-VII.1 Neutron Cross Section Data Testing with Critical Assembly Benchmarks and Reactor Experiments. // Nuclear Data Sheets. – 2011. – Vol. 112, Is. 12. – P.2887-2996.

References

- 1 F.M. Arinkin, A.A. Shaimerdenov, Sh.Kh. Gizatulin, D.S. Dyusambaev, S.N. Koltsochnik, P.V. Chakrov, and L.V. Chekushina, Atomic energy, 123 (1), 15-20 (2017). (in Russ)
- 2 A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, F.M. Arinkin and et al., Phys. Atom. Nuclei, 81:10 1408-1411 (2018).
- 3 A.A. Shaimerdenov, F.M. Arinkin, P.V. Chakrov, L.V. Chekushina, Sh.Kh. Gizatulin, and S.N. Koltsochnik, Proceeding of 37th International Meeting RERTR-2016. Antwerp, Belgium, 2016, p.8.
- 4 S.N. Koltsochnik, D.S. Sairanbayev, L.V. Chekushina, Sh.Kh. Gizatulin, and A.A. Shaimerdenov, Vestnik NYATC RK, 4, 14-16 (2018).
- 5 V.D. Risovany, A.V. Zakharov, E.P. Klochkov, and T.M. Guseva, Boron in nuclear engineering, (Dimitrovgrad, SSC RIAR, 2011), 668 p. (in Russ)
- 6 H.W. Keller, J.M. Shallenberger, D.A. Hollein, and C. Hott, Nuclear technology, 5 (3), 476-482 (1982).
- 7 C. Subramanian, A.K. Suri, and T.S.R.Ch. Murthy, BARC NEWSLETTER, 313, 14-22 (2010).
- 8 Technical Regulation “Nuclear and Radiation Safety”. Order of the Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan dated February 20, 2017 No. 58. (in Russ)
- 9 V.V. Svetukhin, A. S. Kadochkin, P. F. Salikh-Zade, V. D. Risovany, Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Volga region, 4, 68-74 (2007). (in Russ)

- 10 S.R. Friedman, V.D. Risovany, A.V. Zakharov, and V.G. Toporova, Questions of atomic science and technology. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science, 2(79), 84-90 (2001). (in Russ).
- 11 M.V. Bakanov, V.A. Zhelyshev, A.A. Lyzhin, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, and M.R. Farakshin, News of higher educational institutions. Nuclear Energy, 1, 53-59 (2005). (in Russ)
- 12 V.I. Nosov, N.N. Ponomarev-Stepnoi, K.I. Portnoi, and E.G.Savel'ev, Journal of Nuclear Energy. Parts A/B. Reactor Science and Technology, 19(9), 720-728 (1965).
- 13 P. Savva, M. Varvayanni, and N. Catsaros, Nuclear Engineering and Design, 241(2), 492-497 (2011).
- 14 Maedeh Yari, Ahmad Lashkari, S. Farhad Masoudi, Mirshahram Hosseinipناه, Nuclear Engineering and Technology, 50(8), 1266-1276 (2018).
- 15 E.K. Boafo, E. Alhassan, E.H.K. Akaho, and C. Odoi, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 5(4), 1129-1133 (2013).
- 16 Yuki Honda, Nozomu Fujimoto, Hiroaki Sawahata, Shoji Takada, Kazuhiro Sawa, ASME J of Nuclear Rad Sci. 3(1), 011013 (2017).
- 17 R.A. Khrais, G.V. Tikhomirov, I.S. Saldikov, and A.D. Smirnov, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 1189, 012002 (2019).
- 18 Amir Hosein Fadaei, Annals of Nuclear Energy, 38(10), 2238-2246 (2011).
- 19 MCNP6TM USER'S MANUAL – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 1. (Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013).
- 20 D.A. Brown, M.B. Chadwick, R. Capote, A.C. Kahler, A. Trkov, M.W. Herman end et. al., Nuclear Data Sheets, 112(12), 2887-2996 (2011).