

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-4-56-62>

УДК: 621.039.4:621.039.7:621.039.76

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА ВЫВОДА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ИГР ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**В.К. Цхе, А.Н. Котляр, А.А. Миллер, В.А. Гайдайчук, С.М. Кажитаев,
А.Д. Вурим, В.С. Гныря, И.В. Прозорова, А.К. Мухамедиев**

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: valente07@mail.ru; mukhamediev@nnc.kz

В статье приведены результаты исследований в обоснование проекта вывода реакторной установки ИГР из эксплуатации. По результатам комплексного инженерно-радиационного обследования определены границы систем реактора ИГР, выводимых из эксплуатации, а также установлено соответствие состояния реакторной установки ИГР (РУ ИГР), ее систем и оборудования требованиям проектной, исполнительной и эксплуатационной документации. Нейтронно-физические расчеты активности продуктов деления и продуктов активации, а также мощности экспозиционной дозы ионизирующего излучения на разных расстояниях от основных элементов конструкции РУ ИГР были выполнены с помощью программного комплекса MCNP5. По результатам выполненных расчетов установлена группа радионуклидов, которая вносит основной вклад в радиоактивное излучение активной зоны РУ ИГР, а также определены основные элементы конструкции, существенно влияющие на радиационную обстановку РУ ИГР. По итогам инструментальных и расчетных исследований разработано и согласовано с КАЭНК МЭ РК Техническое задание на разработку технического проекта «Вывод РУ ИГР из эксплуатации».

Ключевые слова: реактор ИГР, вывод из эксплуатации, комплексные инженерно-радиационные обследования (КИРО), MCNP5, продукты деления, мощность экспозиционной дозы.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасный вывод из эксплуатации ядерных установок с учетом их большого количества и длительного срока эксплуатации становится одной из серьезных проблем мировой ядерной отрасли. В настоящее время практически во всех развитых «ядерных» странах проводятся работы по выводу реакторов из эксплуатации; при этом качество решения экологических, технических и финансовых вопросов напрямую связано со степенью проработанности проекта вывода реакторной установки (РУ) из эксплуатации и соответствующего комплексного плана выполнения этой работы.

Вывод из эксплуатации – это один из основных этапов жизненного цикла любой РУ наряду с выбором площадки, проектированием, строительством, вводом в эксплуатацию и эксплуатацией, под которым понимается комплекс мероприятий, направленных на исключение возможности использования установки и обеспечивающих безопасность персонала, населения и окружающей природной среды. В соответствии с требованиями [1–3], эксплуатирующая организация до истечения проектного срока эксплуатации ИР должна обеспечить разработку раздела по снятию ИР с эксплуатации в случае его отсутствия в составе технического проекта РУ.

Комплекс исследовательского реактора ИГР (КИР ИГР) РГП НЯЦ РК представляет собой сложный инженерно-технический объект с уникальным оборудованием и сооружениями, разветвленными сетями и коммуникациями. Реактор ИГР находится в эксплуатации более 60 лет, что сравнимо с предельными сроками использования реакторов АЭС и боль-

шинства исследовательских реакторов мира. В этой связи задачи управления старением и вывода из эксплуатации РУ ИГР являются актуальными [4].

Целью настоящих исследований являлся анализ технического и радиационного состояния РУ в обоснование проекта вывода из эксплуатации исследовательского реактора ИГР на КИР ИГР.

Полученные результаты исследований позволили оценить текущее техническое и радиационное состояние строительных конструкций, систем и оборудования реактора для разработки проекта вывода РУ ИГР из эксплуатации, а также установить критерии освобождения снятого с эксплуатации исследовательского реактора из-под контроля КАЭНК МЭ РК и МАГАТЭ.

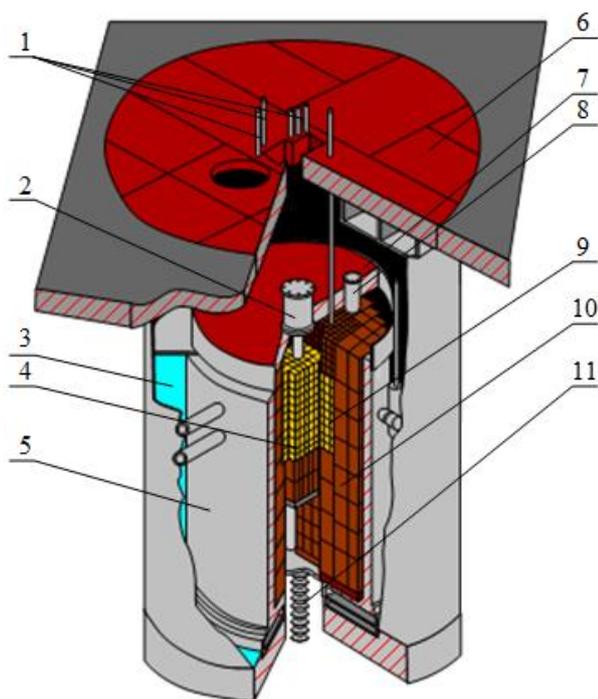
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ РУ ИГР

Работы по оценке текущего состояния РУ ИГР включали в себя анализ проектно-конструкторской и эксплуатационной документации на РУ ИГР, инженерное и радиационное обследование состояния систем и оборудования реактора, разработку и согласование с КАЭНК МЭ РК Технического задания на разработку проекта «Вывод РУ ИГР из эксплуатации»

Для формирования базы данных, необходимых для обоснования технического проекта вывода из эксплуатации РУ ИГР, было выполнено комплексное инженерное и радиационное обследование (КИРО) состояния основных элементов конструкции РУ ИГР с учетом особенностей его прикладного использования [5].

Реактор ИГР [6] был создан в 1960 году и относится к классу импульсных исследовательских реакторов гомогенного типа на тепловых нейтронах, име-

ет твердую уран-графитовую активную зону. Реактор ИГР (рисунок 1) работает в режиме программируемых импульсов мощности на теплоемкости. По принципу гашения импульса реактор является самогасящимся, контура теплоносителя, охлаждающего активную зону, не имеет. Среди импульсных реакторов большой интегральной мощности реактор ИГР обладает самым высоким флюенсом тепловых нейтронов, составляющим $3,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, и интегральной дозой гамма-излучения за пуск – $4,8 \times 10^7$ рад в значительной по объему экспериментальной полости в центре реактора.



1 – органы регулирования СУЗ; 2 – центральный экспериментальный канал (ЦЭК); 3 – бак с охлаждающей водой; 4 – подвижная часть кладки; 5 – кожух реактора; 6 – плита биологической защиты; 7 – крышка реактора; 8 – боковой экспериментальный канал (БЭК); 9 – неподвижная часть кладки; 10 – графитовый отражатель; 11 – резинометаллический компенсатор (сильфон)

Рисунок 1. Реактор ИГР

Конструктивно реактор представляет собой кладку из графитовых блоков и стержней, из которых собраны вертикальные колонны, соединенные сверху графитовыми замками. Графитовая кладка реактора размещена в герметичном стальном цилиндрическом кожухе с гелиевой средой. Стальной кожух реактора расположен в баке с охлаждающей водой, но принудительной системы охлаждения реактор ИГР не имеет. Графитовые элементы активной зоны реактора пропитаны водно-солевым раствором урана. Активная зона реактора ИГР состоит из неподвижной и подвижной частей кладки, геометрическая форма которой в рабочем состоянии близка к кубической с длиной ребра 1400 мм. Активная зона окружена боковым и торцевым графитовыми отражателями.

В графитовой кладке и корпусе реактора также имеются цилиндрические отверстия для размещения в них стационарных экспериментальных каналов – центрального и бокового. Экспериментальные каналы реактора оснащены петлевыми водоохлаждаемыми устройствами – неподвижными ампулами. Рабочими органами управления и защиты реактора являются 16 графитовых стержней регулирования с поглотителем из окиси гадолиния.

Также реактор включает в себя ряд технологических систем, которые обеспечивают вакуумирование и наполнение корпуса гелиевой рабочей средой, отвод тепла от корпуса реактора и ампул экспериментальных каналов, управление и аварийную защиту реактора, технологический и радиационный контроль эксплуатационных пределов и условий безопасной работы реактора.

В связи с тем, что РУ ИГР находится в эксплуатации, оценка технического состояния и радиационное обследование основных систем и оборудования РУ ИГР проводились, по существу, на работающем оборудовании, при этом принимались во внимание результаты:

- комплексной проверки работоспособности систем и элементов реактора ИГР, выполненной в 2020 году [7];
- текущего обслуживания и планового предупредительного ремонта оборудования реактора ИГР и его систем.

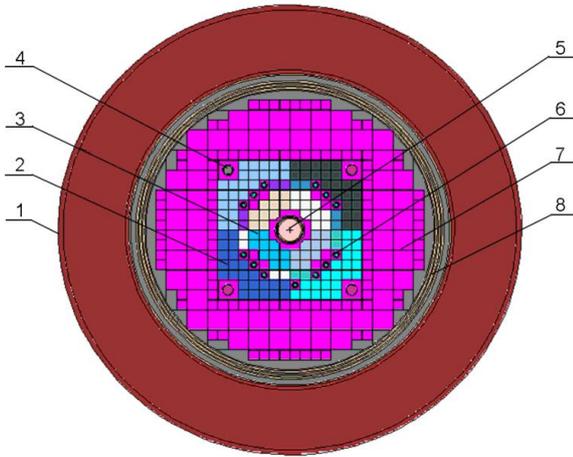
Инструментальное радиационное обследование было проведено путем прямых измерений мощности эквивалентной дозы гамма-излучения с использованием универсального радиометра-дозиметра РКС-01СОЛЮ и путем расчетных оценок в тех случаях, когда доступ к оборудованию и объектам обследования для прямых измерений был невозможен.

Нейтронно-физические расчеты активности продуктов деления и продуктов активации, а также мощности экспозиционной дозы (МЭД) были выполнены с использованием расчетного кода MCNP5 [8–10], относящегося к числу универсальных программ для решения задач переноса излучения в произвольной трехмерной геометрии с библиотеками констант ENDF/B-5,6.

Расчеты выполнялись в несколько этапов, на первом этапе была использована программа MCNP для расчета продуктов активации. На следующих этапах полученные результаты были использованы при проведении инженерных расчетов по соответствующим формулам, которые приведены ниже. Расчеты МЭД были проведены с помощью программы MCNP для каждого радионуклида с учетом снижения его активности со временем, используя справочные данные по радионуклидам (ПД и ПА), такие как выход и энергия гамма-квантов.

Расчетная модель реактора ИГР для программы MCNP5 максимально приближена к существующей конструкции реактора: задана реальная трехмерная

геометрия расположения конструкционных материалов, графитовых блоков и стержней. Графическое изображение расчетной модели представлено на рисунке 2.



1 – бак с водой; 2 – неподвижная часть кладки; 3 – подвижная часть кладки; 4 – боковой экспериментальный канал (БЭК); 5 – центральный экспериментальный канал (ЦЭК); 6 – стержень регулирования; 7 – отражатель; 8 – тепловые экраны

Рисунок 2. Расчетная модель реактора ИГР

Активная зона РУ ИГР, описанная в расчетной модели, состоит из 1440 уран-графитовых блоков. В ней учтено неравномерное распределение концентрации урана по активной зоне в аксиальном и радиальном направлениях. Основные физические параметры активной зоны приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физические параметры активной зоны РУ ИГР

Параметр	Значение
Количество блоков	1440
Материал активной зоны	графит с содержанием урана
Плотность	1,71 г/см ³
Габариты [максимальные]:	
– длина	98 мм
– ширина	98 мм
– высота	133 мм

Расчеты активности продуктов деления были выполнены с учетом величины интегрального энерговыделения за все время эксплуатации РУ ИГР (с 1968 по 2022 год). Вклад продуктов деления в формирование радиационной обстановки был оценен по расчетной интегральной активности [11].

Удельная активность продуктов активации, накопленных в конструкционных материалах в течение отдельного пуска реактора, определялась с учетом времени, прошедшего после пуска, по формуле (1) [12]:

$$q = p \cdot \frac{\sigma_{акт} \Phi(T) \cdot N_A}{A} \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot T)) \cdot \exp(-\lambda \cdot t), \quad (1)$$

где q – удельная активность i -го радиоактивного изотопа в материалах конструкционных элементов, Бк/г;

$$p = \frac{f_i \cdot f_i^m}{100 \cdot 100} - \text{относительное содержание ядер-мишеней в материалах конструкционных элементов;}$$

f_i – содержание i -го активируемого элемента в материале конструкционного элемента, %; f_i^m – распространенность изотопа ядра-мишени в естественной смеси i -го активируемого элемента, % (таблица 1); $\sigma_{акт}$ – микроскопическое сечение активации тепловыми нейтронами для i -ой реакции, 10^{-24} см² (таблица 1); A_i – молярная масса ядер-мишеней для i -ой реакции, моль⁻¹; N_A – число Авогадро, моль⁻¹, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$; $\Phi(T)$ – усредненная плотность потока тепловых нейтронов в материале конструкционного элемента, нейтрон/см²·с; T – время облучения потоком тепловых нейтронов, до 600 секунд; t – время выдержки после облучения, до ~55 лет.

В связи с тем, что время облучения уран-графитовых блоков во время единичного пуска несравнимо мало по сравнению с временем выдержки, формула (1) для отдельного радиоизотопа принимает следующий вид (2):

$$q = p \cdot \frac{\sigma_{акт} N_A}{A} \cdot \sum_i^k \Phi_i (1 - \exp(-\lambda \cdot t_i)), \quad (2)$$

где k – количество пусков за все время кампании реактора; $\Phi_i = \Phi(T)_i$ – флюенс нейтронов за i -ый пуск; t_i – время, прошедшее после i -го пуска.

Были выполнены расчеты активности продуктов активации для основных элементов конструкции РУ ИГР. Расчет МЭД для одиночного уран-графитового блока активной зоны РУ ИГР и основных элементов конструкции реактора проводился для следующих случаев [12]:

- на расстоянии 0,02 м;
- на расстоянии 1 м.
- на расстоянии 10 м.

МЭД от каждого значимого радионуклида определялась по формуле (3) [13, 14]:

$$P = 2 \cdot P_\gamma \cdot q \cdot r \cdot G(\mu_0 r), \quad (3)$$

где P – МЭД от радионуклида в точке определения, Р/час; P_γ – гамма-постоянная радионуклида, Р·см²/ч·мКи (таблица 1); $q = C/V$ – удельная объемная активность радионуклида, мКи/см³; C – активность радионуклида в конструкционном элементе ИР ИГР, мКи; V – объем конструкционного элемента РУ ИГР, см³; r – радиус цилиндра, которым представляется конструкционный элемент РУ ИГР, см; $G(\mu_0 r)$ – функция, учитывающая размеры, материал элемента конструкции РУ ИГР, взаимное расположение источника излучения и точки определения МЭД и эффективную энергию излучения [10]; μ_0 – линейный коэффициент поглощения гамма-излучения в материале элементов конструкции РУ ИГР в зависимости от эффективной энергии гамма-излучения, см⁻¹ [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам инженерного обследования РУ ИГР составлен перечень имеющейся проектно-конструкторской и эксплуатационной документации на РУ ИГР и ее основные системы для разработки технического проекта вывода из эксплуатации РУ ИГР.

В результате комплексной проверки работоспособности систем и элементов РУ ИГР установлено, что РУ ИГР, ее системы и оборудование находятся в работоспособном состоянии и соответствуют проектно-конструкторской и эксплуатационной документации.

Инструментальное радиационное обследование проведено для основного оборудования технологических систем реактора, первичных преобразователей систем управления и защиты, технологического контроля и контроля радиационной обстановки, размещенных в границах реакторного здания и пристройки «Теплообменники экспериментального контура».

Результаты радиационного обследования систем и оборудования РУ ИГР, помещений реакторного здания и пристройки «Теплообменники экспериментального контура» приведены в таблице 2.

По результатам расчетов определено, что основной вклад в радиоактивное излучение уран-графитовых блоков активной зоны РУ ИГР вносят такие радионуклиды как цезий (^{137}Cs), церий (^{141}Ce , ^{144}Ce) и празеодим (^{144}Pr). Результаты расчетов активности продуктов деления уран-графитовых блоков активной зоны РУ ИГР, на которые приходится 90% от

суммарной активности, представлены в таблице 3 [13].

На рисунке 3 представлена диаграмма активности радионуклидов, вносящих основной вклад в радиационную обстановку на РУ ИГР, при этом, в соответствии с хронологией пусков РУ ИГР, учтено и снижение их общей активности со временем (рисунок 4).

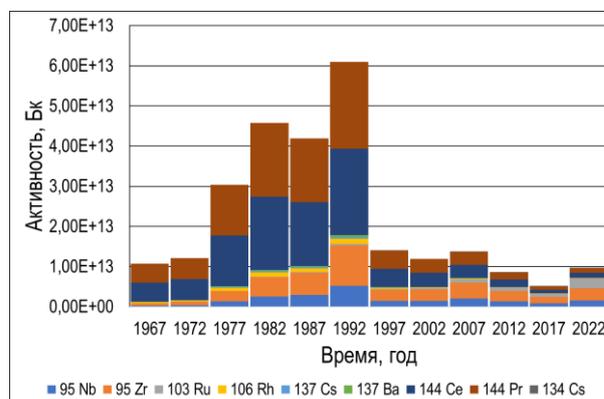


Рисунок 3. Активность радионуклидов, образованных в процессе деления ^{235}U в блоках активной зоны

Значение интегрального энерговыделения в активной зоне за время эксплуатации РУ ИГР и интегральной (накопленной) активности составило $2,74 \cdot 10^{12}$ Дж и $3,32 \cdot 10^{14}$ Бк соответственно. На рисунке 4 представлена диаграмма изменения остаточной и интегральной активности активной зоны реактора в соответствии с хронологией пусков РУ ИГР.

Таблица 2. Результаты радиационного обследования систем и оборудования РУ ИГР и помещений

Место проведения измерений, помещение	Мощность дозы, мЗв/ч	Уровень радиационного загрязнения α -активными радионуклидами, α -част./($\text{мин} \cdot \text{см}^2$)	Уровень радиационного загрязнения β -активными радионуклидами, β -част./($\text{мин} \cdot \text{см}^2$)	Эквивалентная равновесная объемная активность радона и торона (ЭРОА), Бк/м ³
Перекрытие верхнее (отметка «+3»)	0,00057	—	2, фикс. (не снимаемое)	—
Перекрытие верхнее (под биоплитой; отметка «+1»)	0,47000	—	25, не фикс. (снимаемое)	4
Крышка хранилища ЯМ (отметка «+0»)	0,00027	—	150, фикс. (не снимаемое)	—
Венткамера (вентарегаты)	0,00014	4	44, фикс. (не снимаемое)	172
Операторская	0,00150	—	53, фикс. (не снимаемое)	43
Санпропускник («грязная» зона)	0,00015	—	2, фикс. (не снимаемое)	—
Участок дезактивации	0,00580	—	246, фикс. (не снимаемое)	23
Насосная	0,01750	—	75, фикс. (не снимаемое)	75
Надбункерное	0,00940	—	750, фикс. (не снимаемое)	45
Теплообменники экспериментального контура	0,00032	—	5, фикс. (не снимаемое)	308

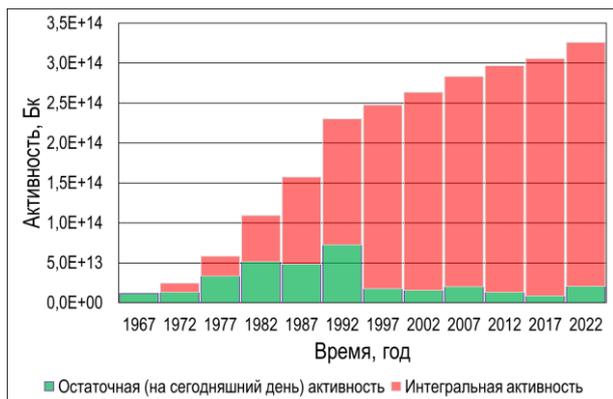


Рисунок 4. Изменение интегральной активности продуктов деления активной зоны РУ ИГР

Таблица 3. Активность продуктов деления уран-графитовых блоков активной зоны РУ ИГР

Радиационные характеристики радионуклидов		
изотоп	количество ядер, шт.	активность, Бк
⁹⁰ Sr	2,01·10 ²¹	1,63·10 ¹²
⁹⁰ Y	2,01·10 ²¹	1,63·10 ¹²
⁹¹ Y	1,11·10 ²²	2,69·10 ¹³
⁹⁵ Zr	2,21·10 ²²	4,31·10 ¹³
⁹⁵ Nb	3,26·10 ²¹	2,23·10 ¹³
¹⁰³ Ru	1,13·10 ²¹	5,88·10 ¹²
¹⁰⁶ Rh	9,96·10 ²²	5,75·10 ¹²
¹²⁷ Te	1,36·10 ²¹	1,54·10 ¹²
¹²⁹ Te	5,39·10 ²¹	3,68·10 ¹¹
¹³⁴ Cs	1,20·10 ¹⁷	1,29·10 ⁹
¹³⁷ Cs	2,45·10 ²¹	1,83·10 ¹²
^{137m} Ba	3,72·10 ¹⁴	1,72·10 ¹²
¹⁴¹ Ce	4,08·10 ²⁰	2,97·10 ¹²
¹⁴⁴ Ce	9,40·10 ²³	9,38·10 ¹³
¹⁴⁴ Pr	9,40·10 ²³	9,38·10 ¹³
Общие радиационные характеристики топлива		
Интегральная активность активной зоны, Бк		3,32·10 ¹⁴
Активность одного блока, Бк		2,81·10 ¹¹
Удельная объемная активность, Бк/см ³		1,71·10 ⁸
Удельная массовая активность, Бк/г		1,00·10 ⁸

По результатам выполненных расчетов продуктов активации для основных элементов конструкции РУ ИГР установлено, что наибольший вклад в радиационную обстановку вносят такие элементы как кожух реактора, основной бак и резинометаллический компенсатор (сильфон). Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4. Расчетные характеристики активности элементов конструкции РУ ИГР

Элемент конструкции	Активность		
	интегральная, Бк	удельная объемная, Бк/см ³	удельная массовая, Бк/г
Кожух реактора	3,17·10 ⁹	1,95·10 ⁶	2,49·10 ⁵
Основной бак	1,18·10 ⁴	11,2	1,43
Резинометаллический компенсатор (сильфон)	9,56·10 ⁸	8,77·10 ⁴	1,12·10 ⁴

Таблица 5. Результаты расчета МЭД от основных элементов конструкции РУ ИГР

№	Расстояние, м	МЭД, мЗв/ч			
		от кожуха	от основного бака	от сильфона	от одного блока
1	0,02	20,3·10 ⁻²	7,28·10 ⁻⁷	8,61	560
2	1	3,54·10 ⁻²	1,91·10 ⁻⁷	3,94	1,06
3	10	0,18·10 ⁻²	0,02·10 ⁻⁷	0,15	0,002

Результаты расчета по определению МЭД ионизирующего излучения от основных конструктивных элементов РУ ИГР: кожуха реактора, основного бака, резинометаллического компенсатора (сильфона) и одного уран-графитового блока РУ ИГР приведены в таблице 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты выполненных документальных, инструментальных и расчетных исследований технического и радиационного состояния РУ ИГР, можно с уверенностью утверждать, что данные, полученные с учетом особенностей технологии применения реактора ИГР в экспериментальных целях, а также с учетом уникальных конструктивных решений, реализованных при его создании, обеспечивают возможность разработки и обоснования проектных материалов по выводу исследовательского реактора ИГР из эксплуатации. При этом следует подчеркнуть, что результаты всесторонней оценки технического и радиационного состояния реактора ИГР и его систем являются достаточной основой для выбора и обоснования порядка выполнения демонтажных работ и определения графика их выполнения с учетом установленных в ходе исследований границ систем РУ ИГР и входящих в их состав отдельных элементов, а также с учетом их измеренных и рассчитанных радиационных характеристик.

Ожидаемым результатом выполненных исследований стало то, что наибольшую радиационную опасность в процессе вывода РУ ИГР из эксплуатации будут представлять уран-графитовые блоки и другие элементы конструкции активной зоны (например, резинометаллический сильфон), при этом планирование работ по их демонтажу необходимо осуществлять с учетом требований размещения ядерных материалов в хранилищах, которые отвечают не только условию обеспечения радиационной защиты, но условиям обеспечения сохранности ядерных материалов и их нераспространения, а также условиям обеспечения ядерной и ядерной физической безопасности.

Работа выполнена в рамках научно-технической программы ИРН BR09158470 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан», источник финансирования – Министерство энергетики Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Казахстан. Об использовании атомной энергии: [от 12 января 2016 года № 442-V ЗРК]. – 28 с.
2. Технический регламент «Ядерная и радиационная безопасность исследовательских ядерных установок», утв. приказом Министра энергетики Республики Казахстан № 59 от 20 февраля 2017 года.
3. НП-033-11 – Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок. – Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2011. – 54 с.
4. «Кодекс поведения по безопасности исследовательских реакторов», утв. резолюцией GC(48)/RES/10.A.8 Генеральной конференции МАГАТЭ 8 марта 2004 года.
5. Комплексное инженерное и радиационное обследование состояния систем и оборудования РУ ИГР: Отчет от 13.09.2021 / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК; утв. В.С. Гныря. – Курчатов, 2021. – Рег. №36-100-05/451.
6. Tskhe V.K., Mukhamedov N.Ye., Gaydaychuk V.A., Kozlovskiy Ye.V., Gradoboev A.V. The method of the reactivity margin calculation required for the IGR reactor start-up in the “Pulse” mode // *Annals of Nuclear Energy*. – 2022. – Vol.168. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108875>
7. По итогам рассмотрения результатов комплексной проверки работоспособности систем и элементов реактора ИГР: Акт от 27.08.2020 / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК; утв. С.А. Березин. – Курчатов, 2020. – Рег. № 36-100-02/1608вн.
8. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I, II, III. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos, New Mexico 2003.
9. Briesmeister, J. F. MCNP – a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport / J.F. Briesmeister [et al.]. – Los Alamos, 1997. – LA-7396M.
10. MacFarlane, R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2. – Los Alamos, 1994. – LA-12639-MS.
11. Журнал пусковой смены: Журнал от 26.10.2021 / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК – Курчатов, 2021. – Рег. № 36-100-07, 51 с.
12. Mashkovich, V.P. Защита от ионизирующих излучений: справочник / В.П. Mashkovich, А.В. Кудрявцева. – М.: Энергоатомиздат, 1995, 496 с.
13. Голубев, Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений / Б.П. Голубев. – М.: Атомиздат, 1976, 504 с.
14. Веселкин, А.П. Инженерный расчет защиты атомных электростанций / А.П. Веселкин; под ред. Ю.А. Егорова. – М.: Атомиздат, 1976, 296 с.

REFERENCES

1. Zakon Respubliki Kazakhstan. Ob ispol'zovanii atomnoy energii: [ot 12 yanvarya 2016 goda No. 442-V ZRK]. – 28 p.
2. Tekhnicheskiy reglament «Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' issledovatel'skikh yadernykh ustanovok», utv. prikazom Ministra energetiki Respubliki Kazakhstan No. 59 ot 20 fevralya 2017 goda.
3. NP-033-11 – Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti issledovatel'skikh yadernykh ustanovok. – Moskva: FBU «NTTs YaRB», 2011. – 54 p.
4. «Kodeks povedeniya po bezopasnosti issledovatel'skikh reaktorov», utv. rezolyutsiey GC(48)/RES/10.A.8 General'noy konferentsii MAGATE 8 marta 2004 goda.
5. Kompleksnoe inzhenernoe i radiatsionnoe obsledovaniy sostoyaniya sistem i oborudovaniya RU IGR: Otchet ot 13.09.2021 / Filial IAE RGP NYaTs RK; utv. V.S. Gnyrya. – Kurchatov, 2021. – Reg. No. 36-100-05/451.
6. Tskhe V.K., Mukhamedov N.Ye., Gaydaychuk V.A., Kozlovskiy Ye.V., Gradoboev A.V. The method of the reactivity margin calculation required for the IGR reactor start-up in the “Pulse” mode // *Annals of Nuclear Energy*. – 2022. – Vol.168. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108875>
7. Po itogam rassmotreniya rezul'tatov kompleksnoy proverki rabotosposobnosti sistem i elementov reaktora IGR: Akt ot 27.08.2020 / Filial IAE RGP NYaTs RK; utv. S.A. Berezin. – Kurchatov, 2020. – Reg. No. 36-100-02/1608vn.
8. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Volume I, II, III. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos, New Mexico 2003.
9. Briesmeister, J. F. MCNP – a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport / J.F. Briesmeister [et al.]. – Los Alamos, 1997. – LA-7396M.
10. MacFarlane, R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2. – Los Alamos, 1994. – LA-12639-MS.
11. Zhurnal puskovoy smeny: Zhurnal ot 26.10.2021 / Filial IAE RGP NYaTs RK – Kurchatov, 2021. – Reg. No. 36-100-07, 51 p.
12. Mashkovich, V.P. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniya: spravochnik / V.P. Mashkovich, A.V. Kudryavtseva. – Moscow: Energoatomizdat, 1995, 496 p.
13. Golubev, B.P. Dozimetriya i zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniya / B.P. Golubev. – Moscow: Atomizdat, 1976, 504 p.
14. Veselkin, A.P. Inzhenernyy raschet zashchity atomnykh elektrostantsiy / A.P. Veselkin; pod red. Yu.A. Egorova. – Moscow: Atomizdat, 1976, 296 p.

**ИГР РЕАКТОРЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫН ПАЙДАЛАНУДАН ШЫҒАРУ ЖОБАСЫН
НЕГІЗДЕУДЕГІ ЗЕРТТЕУЛЕР**

**В.К. Цхе, А.Н. Котляр, А.А. Миллер, В.А. Гайдайчук, С.М. Кажитаев,
А.Д. Вурим, В.С. Гныря, И.В. Прозорова, А.К. Мухамедиев**

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Мақалада ИГР реакторлық қондырғысын пайдаланудан шығару жобасын негіздеу үшін зерттеудің нәтижелері келтірілген. Кешенді инженерлік-радиациялық зерттеу нәтижелері бойынша пайдаланудан шығарылатын ИГР реакторы жүйелерінің шекаралары айқындалды, сондай-ақ ИГР реакторлық қондырғысының (ИГР РҚ), оның жүйелері мен жабдықтарының жай-күйінің жобалау, атқару және пайдалану құжаттамасының талаптарына сәйкестігі анықталды. Бөлу өнімдері мен активтендіру өнімдерінің белсенділігінің нейтрондық-физикалық есептеулері, сондай-ақ ИГР РҚ негізгі құрылымдық элементтерінен әртүрлі қашықтықтағы иондаушы сәулеленудің экспозициялық дозасының қуаты MCNP5 бағдарламалық кешенінің көмегімен орындалды. Орындалған есептеулердің нәтижелері бойынша радионуклидтер тобы анықталды, ол ИГР РҚ белсенді аймағының радиоактивті сәулеленуіне негізгі үлес қосады, сондай-ақ ИГР РҚ радиациялық жағдайына айтарлықтай әсер ететін құрылымның негізгі элементтері анықталды. Аспаптық және есептік зерттеулердің қорытындысы бойынша ҚР ЭМ АЭҚБК-мен «ИГР РҚ пайдаланудан шығару» техникалық жобасын әзірлеуге арналған техникалық тапсырма әзірленді және келісілді.

Түйін сөздер: ИГР реакторы, пайдаланудан шығару, кешенді инженерлік-радиациялық зерттеу (КИРЗ), MCNP5, бөлу өнімдері, экспозициялық дозаның қуаты.

THE STUDIES IN SUPPORT OF THE IGR REACTOR FACILITY DECOMMISSIONING PROJECT

**V.K. Tskhe, A.N. Kotlyar, A.A. Miller, V.A. Gaydaychuk, S.M. Kazhitaev,
A.D. Vurim, V.S. Gnyrya, I.V. Prozorova, A.K. Mukhamediyev**

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The article presents the results of studies to justify the project for decommissioning the IGR reactor facility. Based on the results of a comprehensive engineering and radiation survey, the IGR reactor system boundaries to be decommissioned were determined, and the compliance of the IGR reactor facility (IGR RF) state, its systems and equipment with the design requirements, executive and operational documentation was established. The neutronic calculations of the fission products' activity and activation products, as well as the exposure dose rate of ionizing radiation at different distances from the main construction elements of the IGR RF, were performed using the MCNP5 software package. Based on the calculation results, a group of radionuclides was established, which makes the main contribution to the radioactive emission of the IGR reactor core, and the main construction elements that significantly affect the radiation environment of the IGR RF were determined. Based on the instrumental and computational studies results, the Terms of Reference for the development of the technical project “The IGR Reactor Facility Decommissioning” were developed and approved with the Committee of Atomic and Energy Supervision and Control of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan.

Keywords: IGR reactor, decommissioning, comprehensive engineering radiation surveys, MCNP5, fission products, exposure dose rate.