

НЕОБХОДИМОСТЬ И РОЛЬ ПАСПОРТИЗАЦИИ АКТИВИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Б.К. Былкин*, **И.А. Енговатов****, **А.Н. Кожевников***, **Д.К. Синюшин*****

* *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1*

** *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
129337, Москва, Ярославское ш., д. 26*

*** *Акционерное общество «Государственный специализированный проектный институт»
115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4, корп. 1А*



В атомной отрасли сложилась ситуация, когда одновременно идут два процесса: проектирование и сооружение ядерных установок нового поколения и вывод из эксплуатации установок первых поколений.

Для всех типов установок большое количество радиоактивных отходов, образующихся на стадии вывода из эксплуатации, определяется наведенной активностью конструкционных и защитных материалов. Важнейшей характеристикой, определяющей уровни наведенной активности, является содержание в исходных строительных и конструкционных материалах активационно-опасных элементов, причем их содержание в одном и том же материале с разных месторождений может отличаться на один – два порядка. Информация по содержанию активационно-опасных элементов в материалах радиационной защиты разрозненна и недоступна для практического использования.

Цель работы состояла в обосновании необходимости и практическом обеспечении паспортизации составов конструкционных и защитных материалов для проектируемых, действующих и выводимых из эксплуатации ядерных установок.

Для исследования были выбраны три состава бетона. Концентрации активационно-опасных элементов были определены, в основном, с использованием метода инструментального нейтронно-активационного анализа. Расчеты прохождения нейтронного излучения через материалы элементов реактора и конструкции биологической защиты выполнены в одномерной геометрии по программе ANISN. Слои в расчетной модели приняты в следующей последовательности: активная зона, выгородка, шахта, вода, корпус, зазор, теплоизоляция, зазор, бетонная шахта толщиной 2м, выполняющая функции биологической защиты. Активация бетонной шахты рассчитывалась по программе CONRAD с библиотекой сечений ORIGEN.

Результаты позволяют оценить уровни наведенной активности в материале в зависимости от времени облучения, объемы и классы радиоак-

тивных отходов, а также их изменение во временном диапазоне выдержки от одного года до 1000 лет.

Установлено, что наведенная активность радиационной защиты (при прочих равных условиях) зависит от реального содержания активационно-опасных химических элементов в составе защитных бетонов, в том числе на уровне «следов». Показано, что недоучет влияния таких элементов может привести к недооценкам объемов радиоактивных отходов и их категории.

Полученные результаты подтвердили необходимость паспортизации элементного состава конструкционных и защитных материалов. Сформулировано предложение возможного накопления информации, структура и содержание паспорта на химический состав защитных и конструкционных материалов ядерных установок.

Ключевые слова: ядерные установки, блоки АЭС, вывод из эксплуатации, наведенная активность, радиоактивные отходы, бетонная радиационная защита, паспортизация.

Под действием нейтронов, генерируемых активной зоной реактора, оборудование, конструкционные и защитные строительные материалы становятся радиоактивными. На стадии вывода из эксплуатации ядерных установок такие конструкции являются основным источником радиоактивных отходов (РАО). Спецификой таких РАО является тот факт, что они не дезактивируются.

Для блоков АЭС с различными типами реакторов и для исследовательских реакторов основными активизируемыми конструкциями и материалами являются корпус реактора, внутрикорпусные устройства, металлоконструкции, графитовая кладка, бетон и железобетон.

Проблема активации защитных материалов, оборудования и элементов конструкций ядерных установок достаточно хорошо изучена [1 – 10]. Наведенная активность зависит от радиационно-физических параметров ядерной установки, включая плотности потока и энергетический спектр нейтронов, химический состав подверженного облучению материала, величин соответствующих сечений активации, времени облучения и выдержки и т.д.

При прочих равных условиях уровни наведенной активности будут определяться химическими элементами, присутствующими в составе конструкционных и защитных материалов в качестве основных (массовое содержание в материале более 1%), примесных (с содержанием от 0,01 до 1%) и следовых (с содержанием менее 0,01% по массе).

Из литературных источников [1 – 3, 5] известно, что количество так называемых активационно-опасных элементов, на изотопах которых образуются долгоживущие радионуклиды, ограничено: для металлов – это железо, кобальт, никель, кобальт; для графита – углерод, литий; для бетона радиационной защиты – литий, железо, кобальт, европий, кальций, цезий, никель.

Концентрация в конструкционных и защитных материалах таких элементов, как европий, кобальт, цезий, никель, литий, углерод составляет 10^{-2} – 10^{-6} процентов по массе. Содержание кальция и железа достигает единиц и десятков процентов по массе.

Разброс концентраций примесных и следовых элементов весьма значителен не только между видами однотипных материалов, но и проб материалов одного вида. В таблице 1 приведены данные о разбросе концентраций активационно-опасных

химических элементов в конструкционных и защитных материалах ядерных установок в России, США и странах ЕС [1, 2, 5, 8]. В качестве поясняющей информации в табл.1 приведены данные по содержанию таких элементов в земной коре [11].

Таблица 1

Диапазон изменения массовых концентраций активационно-опасных элементов в бетонах и сталях реакторных установок различных стран

Элемент	Содержание в земной коре, $A_{з.к.} \cdot 10^{-4}$ масс%	Диапазон концентраций в группе исследованных материалов ($A_{мин} - A_{макс}$), 10^{-4} масс%						
		Бетоны			Стали			
					Углеродистые		Нержавеющие	
		РФ	США	ЕС	РФ	США	РФ	США
Eu	1,3	0,01 – 4,4	0,11 – 1,2	0,31 – 1,18	–	–	–	–
Co	18,0	0,31 – 174	1,1 – 31,0	2,3 – 20	30 – 120	115	167 – 875	229 – 2570
Fe	4,65	0,07 – 61,4	0,5 – 24,0	0,6 – 61,2	99	99	68 – 97	68 – 76,7
Cs	3,7	0,01 – 5,9	0,32 – 6,2	0,26 – 5,0	–	–	–	–
Ca	2,96	1,5 – 39	8,8 – 35	3,4 – 29	–	–	–	–
Ni	58	0,1 – 13,6	11,9 – 87,0	6,1 – 26,0	–	0,93	0,25 – 10	8,8 – 11

Значительный разброс концентраций активационно-опасных элементов и некорректное определение их содержания в защитных и конструкционных материалах могут приводить к недооценке уровней активации и, как следствие, объемов радиоактивных отходов при выводе из эксплуатации реакторных установок [10, 12, 13].

Данный вывод проиллюстрирован на примере информации об активации бетонной радиационной защиты ядерных установок.

На основании работ [10, 13 – 16] были проведены расчеты уровней наведенной активности и объемов активированных РАО для бетонов радиационной защиты на различных заполнителях при минимальных, средних и максимальных концентрациях активационно-опасных элементов, численные значения которых получены в результате анализа их содержания в образцах из различных месторождений России, США и стран ЕС.

При этом приняты следующие исходные данные:

- потоки и спектр нейтронов – в соответствии с данными работ [10, 13];
- материалы радиационной защиты – бетон на серпентините, бетон на граните и бетон на гематите, т. е. широко применяемые и ранее использованные составы для радиационной защиты АЭС и исследовательских реакторов;
- время облучения – 50 лет;
- время выдержки – 1, 25, 50, 100 и 1000 лет.

Некоторые результаты расчетных исследований приведены на рис. 1 – 3 и в табл. 2, 3.

Приведены распределения суммарной удельной активности основных долгоживущих радионуклидов, определяющих наведенную активность бетона на серпентините, при минимальных, средних и максимальных концентрациях активационно-опас-

ных элементов для времени выдержки от одного года до 1000 лет (см. рис. 1). Полученные данные соответствуют активации приповерхностного слоя бетона, находящегося вблизи корпуса реактора.

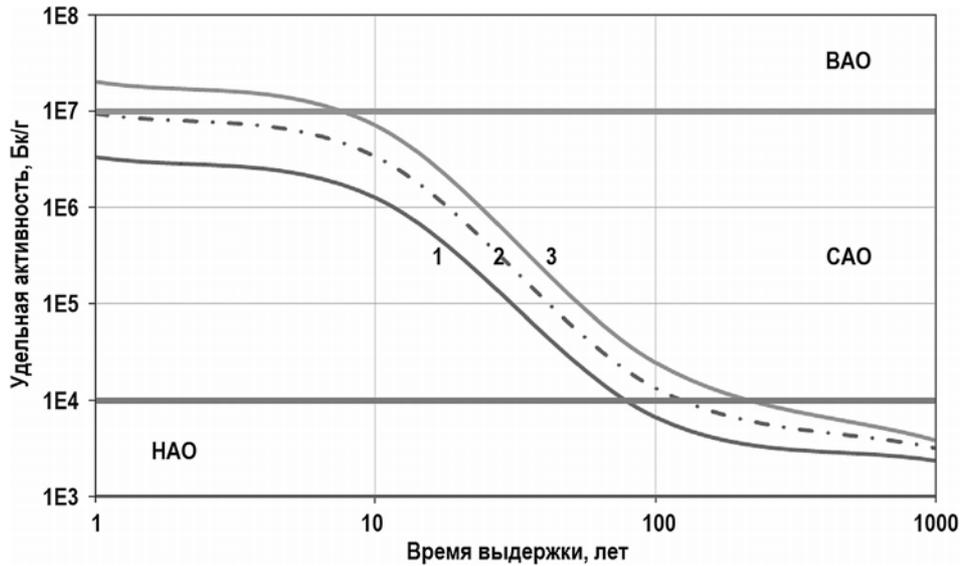


Рис. 1. Распределение суммарной удельной активности основных долгоживущих радионуклидов бетона на серпентините при минимальных (1), средних (2) и максимальных (3) концентрациях активационно-опасных элементов для времени выдержки от одного года до 1000 лет

Данные, приведенные на рис. 1, позволяют сделать следующие выводы:

- отличие в величине суммарной активности может достигать порядка при различных временах выдержки;
- при разных временах выдержки в зависимости от принятых концентраций активационно-опасных элементов для бетонов на различных заполнителях радиоактивные отходы в интервале выдержки от одного года до 1000 лет будут относиться к разным категориям [17] в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Категории РАО в интервале выдержки от одного года до 1000 лет для бетонов на различных заполнителях при минимальном (Min), среднем (Mid) и максимальном (Max) содержании активационно-опасных элементов

Заполнитель (плотность, кг/м ³)	Min				Mid				Max			
	Категория отходов				Категория отходов				Категория отходов			
	ВАО	САО	НАО	ОНАО	ВАО	САО	НАО	ОНАО	ВАО	САО	НАО	ОНАО
Серпентинит (2061.7)	–	До 100 лет	До 1000 лет	–	–	До 150 лет	До 1000 лет	–	До 10 лет	До 300 лет	До 1000 лет	–
Гранит (2145.6)	–	До 60 лет	До 700 лет	До 1000 лет	–	До 180 лет	До 1000 лет	–	–	До 400 лет	До 1000 лет	–
Гематит (3527.8)	До 5 лет	До 90 лет	До 1000 лет	–	До 8 лет	До 150 лет	До 1000 лет	–	До 10 лет	До 200 лет	До 1000 лет	–

На рисунках 2, 3 представлены распределения суммарной удельной активности основных долгоживущих радионуклидов по толщине радиационной защиты из бе-

тона на граните при минимальных, средних и максимальных концентрациях активационно-опасных элементов для времени выдержки 10 и 50 лет соответственно.

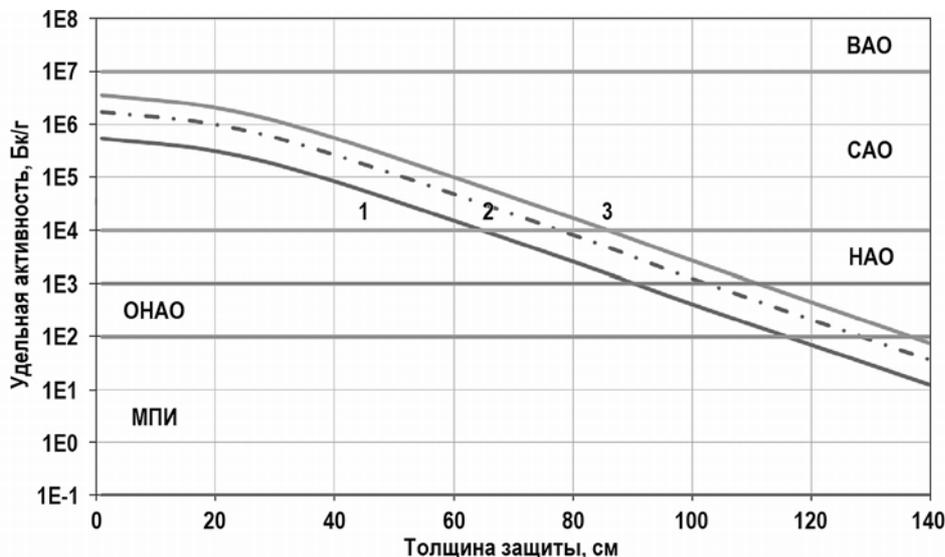


Рис. 2. Распределение суммарной удельной активности по толщине защиты при минимальных (1), средних (2) и максимальных (3) концентрациях активационно-опасных элементов в бетоне на граните при времени облучения 50 лет и времени выдержки 10 лет

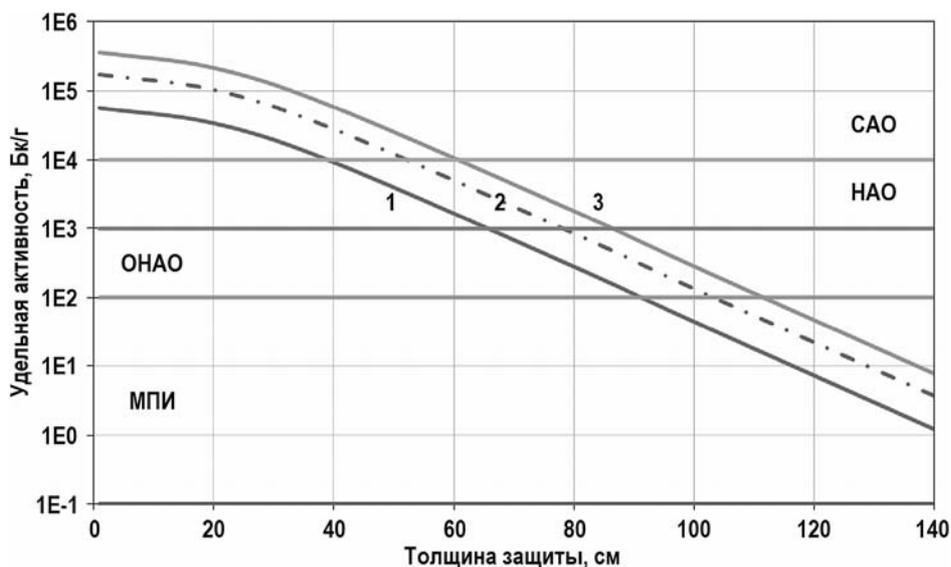


Рис. 3. Распределение суммарной удельной активности по толщине защиты при минимальных (1), средних (2) и максимальных (3) концентрациях активационно-опасных элементов в бетоне на граните при времени облучения 50 лет и времени выдержки 50 лет

Таким образом, на стадии вывода из эксплуатации активированный слой радиационной защиты бетона будет составлять значительную толщину при различных временах выдержки. Причем с точки зрения классификации, активированный слой будет относиться к различным категориям РАО [17].

В таблице 3 приведены расчетные данные для суммарной удельной активности активированных бетонов радиационной защиты для различных времен выдержки и толщины радиоактивного слоя, который будет определять объемы РАО различных категорий.

Таблица 3

Распределение РАО по категориям по толщине защиты при различных концентрациях активационно-опасных элементов в бетонах радиационной защиты

Заполнитель (плотность, кг/м ³)	Время выдержки, t, лет	Min			Mid			Max					
		Категория отходов			Категория отходов			Категория отходов					
		Толщина радиоактивного слоя, см	САО	НАО	ОНАО	Толщина радиоактивного слоя, см	САО	НАО	ОНАО	Толщина радиоактивного слоя, см	САО	НАО	ОНАО
Серпентинит (2061.7)	10	90	50	20	20	100	60	20	20	110	60	20	30
	50	70	30	20	20	80	40	20	20	90	45	25	20
Гранит 2145.6	10	110	60	30	20	130	70	40	20	140	90	20	30
	50	90	40	20	30	110	50	30	30	120	60	30	30
Гематит 3527.8	10	100	60	20	20	105	65	20	20	110	60	20	30
	50	70	30	20	20	80	40	20	20	85	40	25	20

Полученные результаты важны именно для стадии вывода из эксплуатации АЭС из-за образования большого количества недеактивируемых РАО [18 – 20], стоимость захоронения которых очень высока и значительно отличается для различных категорий по уровню удельной активности [21].

Для повышения надежности определения уровней активности и объемов радиоактивных отходов на момент вывода из эксплуатации действующих АЭС необходимо знать в каждом конкретном случае химический (элементный) состав всех конструкционных и защитных материалов в приреакторном пространстве, которые подвергаются облучению потоками нейтронов.

Отсутствие в расчетах содержания отдельных следовых элементов или некорректное их определение в защитных материалах приводит к недооценке объема радиоактивных отходов при выводе реакторных установок из эксплуатации. Это будет влиять на стоимость их захоронения, приведет к ошибкам в оценках требуемых объемов хранилищ и к недооценке радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду.

Анализ проектной документации новых ядерных установок показывает, что выбор конструкционных и защитных материалов действующих в настоящее время и окончательно остановленных реакторных установок осуществляется на стадии проектирования без детального анализа и определения их химического состава на содержание активационно-опасных примесных и следовых элементов.

При выводе из эксплуатации и подготовке к выводу из эксплуатации ядерных установок (в основном, блоков АС и исследовательских реакторов) возникает необходимость оценки объемов радиоактивных отходов за счет активации, их классификации и прогноза изменения в зависимости от времени выдержки. К сожалению,

информации по содержанию активационно-опасных элементов (на уровне примесей и следов) в материалах радиационной защиты практически нет и пока даже нет понимания, где такая информация должна собираться и храниться.

Среди специалистов по защите от ионизирующих излучений уже давно сложилось убеждение о необходимости разработки и внедрения в практику паспорта на химический состав конструкционных и защитных материалов.

В паспорте, который должен входить в перечень проектной документации, помимо существующих на настоящее время требуемых характеристик должны быть отражены следующие составляющие:

- макрохимический состав конструкционных и защитных материалов для расчета прохождения излучений и оценки радиационной стойкости;
- микрохимический состав конструкционных и защитных материалов для расчета их активационных характеристик с указанием содержания примесных и следовых активационно-опасных элементов;
- методы и погрешности определения содержания химических элементов.

Подобную информацию можно получить для материалов корпуса реактора и металлоконструкций, используя соответствующие образцы-свидетели.

Для защитных бетонов образцы-свидетели в настоящее время не используются. Поэтому для действующих ядерных установок необходимо провести комплексные работы по получению экспериментальной информации о содержании активационно-опасных элементов в конструкционных и защитных материалах и в сырье для их изготовления. Результаты исследований должны в качестве исходной информации входить в банк данных по активационным характеристикам защитных бетонов ядерных установок [22].

Таким образом, наличие паспорта обусловит уже на стадии проектирования новых ядерных энергетических установок использование такого химического состава конструкционных и защитных материалов, который позволит при их выводе из эксплуатации получить минимальные объемы радиоактивных отходов, что снизит затраты на их кондиционирование и последующее хранение (захоронение) и повысит конкурентоспособность ядерно-энергетического комплекса в современных рыночных условиях.

Литература

1. *Evans John C., Lepel Elwood A., Sundens Ronald W., Thomas Charles W., Robertson David E.* Long-lived activation products in Light-water Reactor Construction Materials: Implication for Decommissioning. // *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle.* – 1988. – Vol. 11(1). – PP. 1-39.
2. *Engovatov I.A., Mashkovich V.P., Orlov Yu.V., Pologikh B.G., Khlopkin N.S., Tsypin S.G.* Radiation Safety Assurance: Decommissioning Nuclear Reactors at Civil and Military Installations. Monographia. – Arlington, VA 22201 USA 2005. – 208 pp.
3. *Енговатов И.А., Машкович В.П., Орлов Ю.В., Пологих Б.Г., Хлопкин Н.С., С.Г. Цыпин С.Г.* Радиационная безопасность при выводе из эксплуатации реакторных установок гражданского и военного назначения. Проект МНТЦ №465-97. Под ред. Н.С. Хлопкина. – М.: ПАИМС, 1999. 300 с.
4. *Nazarov V.M., Frontyasyeva M.V., Baboshin N.G., Engovatov I.A., Lavdansky P.A., Stefanov N.I.* Activation studies of concrete binding agent ingredients used for nuclear radiation shielding. // *Kernenergie.* – 1991. – Vol. 34. – PP. 7-8.
5. *Bittner A., Jungwirth D., Bernard M., Gerland L., Brambilla G., Fitzpatrick J.* Concepts Aimed at Minimizing the Activation and Contamination of Concrete. «Decommissioning of Nuclear Power Plants». Proc. of the European Conference held in Luxembourg, 22-24 May 1984. Springer Netherlands, 1984. – PP. 371-388.
6. *Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors.* IAEA Safety Standards Ser. № WS-G-2.1. Vienna: IAEA, 1999. – 41 pp.

7. Борисов С.Е., Крюков А.П., Машкович В.П., Неретин В.А. Двумерные исследования наведенной активности в материалах ИРТ МИФИ при выводе из эксплуатации или реконструкции. // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81. – Вып. 4. – С. 277-281.
8. Былкин Б.К., Енговатов И.А., Кожевников А.Н., Синюшин Д.К. Наведенная активность радиационной защиты в проблеме вывода из эксплуатации ядерных установок. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 3 (85). – С. 1-14.
9. Былкин Б.К., Енговатов И.А. Вывод из эксплуатации реакторных установок. Монография. – М.: МГСУ, 2014. – 228 с.
10. Енговатов И.А., Былкин Б.К., Кожевников А.Н. Оптимизация составов бетонов радиационной защиты АЭС. / В сб.: IX Межд. научно-технич. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-2014. – М.: АО «ЭНИЦ», 2014. – С. 305-309.
11. Войткевич Г.А., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. Краткий справочник по геохимии. – М.: Недра, 1977. – 180 с.
12. Енговатов И.А. Объемы радиоактивных отходов и активация радиационной защиты реакторных установок. // Вестник МГСУ. – 2011. – № 8. – С. 325-330.
13. Былкин Б.К., Енговатов И.А., Кожевников А.Н. Выбор бетона радиационной защиты для АЭС нового поколения. // Атомная энергия. 2015. – Т. 118. – Вып. 6. – С. 350-354.
14. DOORS 3.2: One -Two- and Three Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System, ORNL-RSICC C-650, 1998.
15. BUGLE-96: Coupled 47 Neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications, ORNL-RSICC DLC-185, 1999.
16. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. NUREG/CR-200, Rev. 5, 1995.
17. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 («Собрание законодательства РФ», 29.10.2012, № 44, ст. 6017; 09.02.2015, № 6, ст. 974).
18. Былкин Б.К., Давыдова Г.Б., Журбенко Е.А. Радиоактивные отходы при демонтаже реакторных установок. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 110. – № 3. – С. 171-172.
19. Былкин Б.К., Енговатов И.А., Кожевников А.Н., Синюшин Д.К. К определению категории РАО для бетонов радиационной защиты ядерных установок при их выводе из эксплуатации. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – Вып. 5. – С. 298-301.
20. Енговатов И.А., Синюшин Д.К. Минимизация радиоактивных отходов при выводе из эксплуатации атомных станций новых поколений. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 10. – С. 45-51.
21. Иванов Е.А., Коротков А.С., Пырков И.В. Радионуклидный вектор. // Росэнергоатом. – 2015. – № 1. – С. 42-45.
22. Былкин Б.К., Енговатов И.А., Кожевников А.Н., Синюшин Д.К. Банк данных по активационным характеристикам бетонов радиационной защиты ядерных установок. // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Вып. 2 (113). – С. 213-218.

Поступила в редакцию 18.01.2018 г.

Авторы

Былкин Борис Константинович, профессор, д-р техн. наук

E-mail: bylkin_bk@nrcki.ru

Енговатов Игорь Анатольевич, профессор, д-р техн. наук

E-mail: eng46@mail.ru

Кожевников Алексей Николаевич, доцент, канд. техн. наук

E-mail: kozhevnikov_an@nrcki.ru

Синюшин Дмитрий Константинович, заместитель начальника отдела

E-mail: dimsin@bk.ru

UDC 621.039.058

**ON THE NECESSITY AND THE ROLE OF DESCRIPTORS
OF NEUTRON ACTIVATED STRUCTURAL AND SHIELDING
MATERIALS OF NUCLEAR INSTALLATIONS
FOR FUTURE DECOMMISSIONING**

Bylkin B.K. *, Engovatov I.A. **, Kozhevnikov A.N. *, Sinyushin D.K. ***

* National research center «Kurchatov institute»

1 Academician Kurchatov Sq., Moscow, 123182 Russia

** National Research Moscow State University of Civil Engineering

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337 Russia

*** Joint Stock Company «State Specialized Design Institute»

4 Sharikopodshipnikovskaya st., Moscow, 115088 Russia

ABSTRACT

Existing situation in nuclear industry is characterized with simultaneous development of the following two processes: design and construction of new generation of nuclear installations and decommissioning of installations of older generations.

Significant amounts of radioactive wastes generated during the decommissioning phase are determined both for the first and the second types of installations by the induced activity of neutron irradiated structural and shielding materials. Concentration of the so-called radioactivity-hazardous nuclides in primary building and construction materials is the most important characteristics determining the resulting levels of induced activity. Values of these concentrations for the same type of material extracted from different geological deposits may differ by one or two orders of magnitude. Information about concentrations of radiation-hazardous elements in radiation shielding materials is fragmented and, as a rule, unsuitable for practical application.

The purpose of the present study was to substantiate the necessity of compiling and recording the data on the concentrations of radioactivity-hazardous nuclides for building and structural materials for nuclear installations during the phases of design, operation and decommissioning.

Three types of shielding concrete compositions were selected for the investigation. Concentrations of radioactivity-hazardous nuclides were mainly obtained by neutron activation technique. Neutron transport calculations were performed in one-dimensional cylindrical geometry at the core midplane according to usual core-vessel-shielding model of modern VVER reactor unit including 2 m thick concrete shield. Both transport and activation calculations were undertaken using modules of SCALE system.

The obtained results allow estimating neutron-induced activation levels in the material as the function of irradiation time, amounts and categories of radioactive waste and their evolution during the decay time from 1 to 1000 years. It was established that neutron-induced activity of shielding concrete strongly depends on the actual concentrations of radioactivity-hazardous nuclides in the concrete including 'trace' concentrations (other factors being the same). It was also shown that failure to take such concentrations into account may lead to the underestimation of neutron-induced activation levels and amounts of radioactive wastes and their category.

The obtained results confirmed the necessity of compiling and maintaining data records on the concentrations of radioactivity-hazardous nuclides for materials used in structural and shielding materials of nuclear installations. Proposals were formulated on the potential accumulation of information, composition and formatting of descriptors of chemical composition of shielding and structural materials of nuclear installations.

Key words: nuclear facilities, NPP unit, decommissioning, neutron induced activity, radioactive waste, radiation shielding concrete, descriptor.

REFERENCE

1. Evans John C., Lepel Elwood A., Sundens Ronald W., Thomas Charles W., Robertson David E. Long-lived activation products in Light-water Reactor Construction Materials: Implication for Decommissioning. *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle*. 1988, v. 11(1), pp. 1-39.
2. Engovatov I.A., Mashkovich V.P., Orlov Y.V., Pologikh B.G., Khlopkin N.S., Tsypin S.G. *Radiation Safety Assurance: Decommissioning Nuclear Reactors at Civil and Military Installations*. Monographia. Arlington, VA 22201 USA 2005, 208 p.
3. Engovatov I.A., Mashkovich V.P., Orlov Y.V., Pologikh B.G., Khlopkin N.S., Tsypin S.G. *Radiation Safety at Decommissioning of Civil and Military Reactor Installations. ISTC Project No.465-97*. Under the editorship of Khlopkin N.S. Moscow. PAIMS Publ., 1999, 300 p.
4. Nazarov V.M., Frontyasyeva M.V., Baboshin N.G., Engovatov I.A., Lavdansky P.A., Stefanov N.I. Activation studies of concrete binding agent ingredients used for nuclear radiation shielding. *Kernenergie*, 1991, v. 34, pp. 7-8.
5. Bittner A., Jungwirth D., Bernard M., Gerland L., Brambilla G., Fitzpatrick J. *Concepts Aimed at Minimizing the Activation and Contamination of Concrete*. Decommissioning of Nuclear Power Plants. Proc. of the European Conference held in Luxembourg, 22-24 May 1984. Springer Netherlands, 1984, pp. 371-388.
6. Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors. IAEA Safety Standards Ser. № WS-G-2.1. Vienna. IAEA, 1999, 41 pp.
7. Borisov S.E., Kryukov A.P., Mashkovich V.P., Neretin V.A. Two-dimensional studies of induced activity in MIFI IRT materials during decommissioning and reconstruction *Atomnaya energiya*. 1996, v. 81, iss. 4, pp. 277-281 (in Russian).
8. Bylkin B., Kozhevnikov A., Engovatov I., Sinyushin D. Induced activity of radiation shielding before NPP decommissioning. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2017, no. 3 (85), pp. 1-14 (in Russian).
9. Bylkin B.K., Engovatov I.A. *Decommissioning of Reactor Installations*. Monography. Moscow. Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2014, 228 p. (in Russian).
10. Engovatov I.A., Bylkin B.K., Kozhevnikov A.N. Optimization of the Compositions of Concrete for Radiation Protection of NPP. In Proc. of the IX International Scientific-Technical Conference «Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Engineering (ISTC-2014)». Moscow. AO «ENIC» Publ., 2014, pp. 305-309 (in Russian).
11. Voytkovich G.A., Miroshnikov A.E., Povarennyh A.S., Prohorov V.G. *Quick reference guide to geochemistry*. Moscow. Nedra Publ., 1977, 180 p. (in Russian).
12. Engovatov I.A. Volume of radioactive waste and activation radiation shielding of nuclear installations *Vestnik MGSU*. 2011, no. 8, pp. 325-330 (in Russian).
13. Bylkin B.K., Kozhevnikov A.N., Engovatov I.A. Selecting Concrete for Radiation Protection for New-Generation NPP. *Atomnaya energiya*, 2015, v. 118, no. 6, pp.350-354 (in Russian).
14. DOORS 3.2: One- Two- and Three Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System, ORNL-RSICC C-650, 1998.
15. BUGLE-96: Coupled 47 Neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications, ORNL-RSICC DLC-185, 1999.

16. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. NUREG/CR-200, Rev. 5, 1995.

17. On Criteria of Referring Solid, Liquid and Gaseous Wastes to «Radioactive Wastes» Category; Criteria of Referring Radioactive Wastes to «Special Radioactive Wastes» Category and to «Disposed Radioactive Wastes» Category; and Criteria for Classification of «Disposed Radioactive Wastes». Decree of the RF Government No.1069 of October 19, 2012 («Collected Legislation of the Russian Federation», 29.10.2012, No. 44, Art. 6017; 09.02.2015, No. 6, Art. 974).

18. Bylkin B.K., Davydova G.B., Zhurbenko E.A. Radioactive Wastes at Dismantling of Reactor Installations. *Atomnaya energiya*, 2011, v. 110, no. 3, pp. 171-172 (in Russian).

19. Bylkin B.K., Kozhevnikov A. N., Engovatov I.A., Sinushin D.K. Radioactivity Category Determination for Radiation-Protection Concrete in Nuclear Facilities Undergoing Decommissioning. *Atomnaya energiya*, 2016, v. 121, no. 5, pp. 298-301 (in Russian).

20. Engovatov I.A., Sinushin D.K. Minimization of radioactive wastes in decommissioning of new generation nuclear power plants. *Vestnik BSTU*. 2017, no. 10, pp. 45-51 (in Russian).

21. Ivanov E., Korotkov A., Pyrcov I. Radionuclide vector. *Rosenergoanom*, 2015, no. 1, pp. 42-45 (in Russian).

22. Bylkin B.K., Engovatov I.A., Kozhevnikov A.N., Sinushin D.K. Data bank on activation characteristics of radiation shielding concrete of nuclear plants. *Vestnik MGSU*. 2018, v. 13, no. 2, pp. 213-218 (in Russian).

Authors

Bylkin Boris Konstantinovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: bylkin_bk@nrcki.ru

Engovatov Igor Anatol'evich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: eng46@mail.ru

Kozhevnikov Alexey Nikolaevich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: kozhevnikov_an@nrcki.ru

Sinyushin Dmitriy Konstantinovich, Deputy Head of Department

E-mail: dimsin@bk.ru