БАНК ДАННЫХ ПО АКТИВАЦИОННЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ БЕТОНОВ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Б.К. Былкин, И.А. Енговатов¹, А.Н. Кожевников, Д.К. Синюшин²

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ КИ),
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1;*

*¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;*

*²«Государственный специализированный проектный институт» (АО «ГСПИ»),
115088, г. Москва, Шарикоподшипниковская ул., д. 4*

Предмет исследования: проведенные в РФ и за рубежом исследования показали, что наведенная активность и активационные характеристики бетонов радиационной защиты определяются химическими элементами, концентрация которых в исходных компонентах может изменяться в пределах от тысячных долей до процентов по массе. В свою очередь активированные конструкции защиты являются одним из источников недеактивируемых радиоактивных отходов на стадии вывода из эксплуатации ядерных установок. Для снижения активности и объемов радиоактивных отходов выбор составов защитных бетонов ядерных установок должен происходить с учетом содержания активационно-опасных элементов.

Цель: обоснование необходимости и возможности создания банка данных по активационным характеристикам конструктивных и защитных материалов для ядерных установок.

Материалы и методы: исследования широкой номенклатуры составов защитных бетонов, активности и объемов активированных радиоактивных отходов.

Результаты: на основе данных расчетно-экспериментальных исследований выделены важнейшие химические элементы, определяющие долгоживущую наведенную активность защитных бетонов, разработаны структура, содержание и информационная составляющая банка данных по активационным характеристикам защитных бетонов ядерных установок.

Выводы: обоснована практическая возможность осуществлять целенаправленный выбор на этапе проектирования и строительства наименее активируемых защитных бетонов ядерных установок и моделировать составы действующих и выводенных из эксплуатации установок при прогнозных расчетах активности материалов и объемов радиоактивных отходов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: банк данных, активационные характеристики, ядерные установки, блоки АС, проектирование, строительство, вывод из эксплуатации, наведенная активность, радиоактивные отходы, бетоны радиационной защиты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. 213–221.

DATA BANK ON ACTIVATION CHARACTERISTICS OF RADIATION SHIELDING CONCRETE OF NUCLEAR PLANTS

B.K. Bylkin, I.A. Engovatov¹, A.N. Kozhevnikov, D.K. Sinyushin²

*National Research Centre "Kurchatov Institute" (NRC "Kurchatov Institute"),
1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russian Federation;*

*¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation;*

*²State Specialized Design Institute (AO "GSPI"),
4 Sharikopodshipnikovskaya st., Moscow, 115088, Russian Federation*

Subject: studies conducted in the Russian Federation and abroad have shown that the induced activity and activation characteristics of radiation shielding concretes are determined by chemical elements, concentration of which in the initial components can vary within the limits from several parts-per-thousand to percentages by mass. In turn, activated shielding structures are one of the sources of non-deactivated radioactive waste at the stage of decommissioning of nuclear plants. To reduce activity and volume of radioactive waste, the selection of compositions of shielding concretes for nuclear plants should take into account the content of activation-hazardous elements.

Research objectives: the purpose of this study was to justify the necessity and possibility of creating a data bank on activation characteristics of structural and shielding materials for nuclear plants.

Materials and methods: computational and experimental studies included the studies of a wide range of compositions of shielding concretes, activity and volumes of activated radioactive waste.

Results: the most important chemical elements that determine the long-term induced activity of shielding concretes were identified based on the data of computational and experimental studies. The structure, content and information components of the database on activation characteristics of shielding concretes of nuclear plants were developed.

Conclusions: we have justified the practical possibility of targeted selection of the least activated shielding concretes of nuclear plants at the stage of their design and construction as well as the possibility of modeling compositions of operating and decommissioned plants when performing predictive calculations of the activity of materials and volumes of radioactive waste.

KEY WORDS: data bank, activation characteristics, nuclear plants, NPP blocks, designing, construction, decommissioning, neutron induced activity, radioactive waste, radiation shielding concretes

FOR CITATION: Bylkin B.K., Engovatov I.A., Kozhevnikov A.N., Sinyushin D.K. Bank dannykh po aktivatsionnym kharakteristikam betonov radiatsionnoy zaschity yadernykh ustanovok [Data bank on activation characteristics of radiation shielding concrete of nuclear plants]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 2 (113), pp. 213–221.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из источников радиоактивных отходов, а следовательно, и источником потенциальной опасности для населения и окружающей среды является наведенная активность (активация) оборудования, конструкционных и защитных материалов под действием нейтронов, генерируемых активной зоной реактора. Наибольший объем радиоактивных отходов за счет активации нейтронами связан с демонтажем бетонных защитных конструкций, непосредственно находящихся в приреакторном пространстве, причем их активность не может быть снижена за счет дезактивации.

Отечественные нормативные и зарубежные документы содержат требования о необходимости при разработке документации учитывать будущий вывод из эксплуатации как действующих, так и вновь проектируемых ядерных установок [1]¹. В частности, в проекте строительства блока АС должны быть предусмотрены технические решения, направленные на обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации. К числу этих решений относятся выбор материалов для изготовления оборудования, систем и конструкций блока АС, обеспечивающих низкий уровень их активации за весь период эксплуатации блока АС и минимальное количество радиоактивных отходов при выводе из эксплуатации блока АС. Кроме того, учитывая нарастающее количество выводимых ядерных установок из эксплуатации, возникла потребность корректных оценок объемов радиоактивных отходов при демонтаже защитных конструкций. Это в немалой степени связано с тем фактом, что затраты на обращение, хранение и захоронение радиоактивных отходов могут достигать

десятков тысяч тонн [2] и быть непосильным бременем для атомной энергетики. Стоимость захоронения РАО составляет около 1,2 млн руб./м³ для высокоактивных, 550 тыс. руб./м³ — среднеактивных, 130 тыс. руб./м³ — низкоактивных и 35 тыс. руб./м³ — очень низкоактивных.

Таким образом, проблема наведенной активности защитных бетонов ядерных установок имеет научно-технические, социальные и экономические аспекты.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Одним из основных показателей, определяющим активационные характеристики металлов и бетонов, является химический состав (включая основные, примесные и следовые элементы). В количественном отношении под основными принято подразумевать элементы с массовой долей в материале более 1 %, под примесными — от 0,01 до 1 % и под следовыми — менее 0,01 %.

Расчетные оценки показали, что наведенная активность конструкционных и защитных материалов в различные периоды после окончательного останова реактора определяется ограниченным числом элементов, на изотопах которых образуются долгоживущие радионуклиды, важнейшими из которых для бетонов являются следовые: литий, европий, кобальт, железо, цезий, никель, ниобий, кальций, торий, уран, — примесные и основные: железо и кальций [3–7].

На изотопах этих элементов образуются долгоживущие радионуклиды, вносящие вклад в наведенную радиоактивность, по следующим реакциям:

¹ НП 012-16. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции.

НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.

Поскольку перечисленные радионуклиды имеют значительно различающиеся периоды полураспада, их вклад в различные интервалы выдержки после прекращения эксплуатации реактора будет различным [6]:

I (от 1 года до 25 лет) — ^3H , ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{134}Cs , ^{41}Ca ;

II (от 25 до 100 лет) — ^3H , ^{41}Ca , ^{152}Eu , ^{63}Ni , ^{154}Eu , ^{60}Co ;

III (от 100 до 1000 лет) — ^{41}Ca , ^{63}Ni , ^3H , ^{59}Ni ;

IV (от 1000 до 10000 лет) — ^{41}Ca , ^{233}U , ^{239}Pu .

Период I — наиболее вероятный интервал для проведения необходимых мероприятий по подготовке блока АС к выводу из эксплуатации; II — учитывает этап длительного сохранения под наблюдением блока АС и работы по выводу из эксплуатации; III — учитывает процесс хранения радиоактивных отходов; IV — учитывает процесс «вечного» захоронения радиоактивных отходов.

Проведенные исследования [3–8] показали, что содержание так называемых активационно-опасных элементов в горных породах, используемых для приготовления защитных бетонов, может различаться в значительной степени (до нескольких порядков по величине). Отсюда следует, что существует практическая возможность снижения уровней активации конструкций радиационной защиты и, соответственно, объемов радиоактивных отходов путем целенаправленного выбора на стадии проектирования и строительства ядерных установок, наименее активируемых компонент и сырья для бетонов.

Кроме того, при выводе из эксплуатации и подготовке к выводу из эксплуатации действующих ядерных установок (в основном блоков АС и исследовательских реакторов) необходимо оценить объемы радиоактивных отходов, их классификацию и прогноз изменения в зависимости от времени выдержки.

В проектной документации для используемых составов бетонов приводится, как правило, их марка и объемная масса. Технологический состав включает содержание основных элементов в крупном и мелком заполнителе и вяжущем.

В то же время важнейшая информация по содержанию активационно-опасных элементов (на уровне примесей и следов) в материалах бетонной защиты практически отсутствует и, что самое важное, пока даже нет понимания, где такая информация должна собираться и храниться.

Инструментом решения данной проблемы должен быть банк данных по активационным характеристикам конструкционных и защитных материа-

лов ядерных установок, который должен являться структурной составляющей информационной системы данных по выводу из эксплуатации ядерных установок, в частности АС [9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Необходимо отметить, что непосредственно банк данных является инструментом для решения поставленных задач. Основная ценность заключается в полноте и достоверности содержащейся в нем информации.

В качестве объекта исследования были выбраны бетоны и их составляющие, исходя из следующих соображений:

1. Бетоны должны иметь различную объемную массу от 2,15 до 4,5 т/м³.

2. Бетоны должны охватывать весь спектр используемых заполнителей и вяжущих, широко используемых при строительстве ядерных объектов.

3. Крупный заполнитель — гранит, известняк, гематит, лимонит, хромит, серпентинит.

4. Мелкий заполнитель — кварцевый песок, кварцевый песок с карбидом бора, лимонит, серпентинит, хромит, гематит, серпентинит.

5. Вяжущее — портландцемент, высокоглиноземистый цемент.

6. Должны быть известны концентрации активационно-опасных химических элементов, на изотопах которых образуются долгоживущие радионуклиды, в том числе и следовых, таких как европий и кобальт.

7. Есть широкий диапазон концентраций водорода, кальция, железа, кислорода, кобальта и европия.

Технологические составы некоторых рассматриваемых бетонов приведены в табл. 1.

Для экспериментального определения концентрации активационно-опасных элементов на уровне следов и примесей использовался в основном метод инструментального нейтронно-активационного анализа.

В качестве примера в табл. 2–3 приведен технологический и химический состав бетонов, ядерная плотность важнейших с точки зрения прохождения излучения элементов и концентрации активационно-опасных элементов кальция и железа, кобальта и европия, цезия, никеля, ниобия, лития, урана и плутония по данным [3–7, 11–14].

Прохождение нейтронного излучения из активной зоны через элементы реактора и последовательные слои конструкций радиационно-тепловой («сухой») и биологической защиты рассчитано с помощью модулей программного комплекса DOORS3.2 в одномерной цилиндрической геометрии в P_3S_8 -приближении метода дискретных ординат [15]. В расчетах плотности потока нейтронов использована 67-групповая библиотека сечений BUGLE-96, ориентированная на применение

Табл. 1. Технологические составы защитных бетонов. Материалы бетонной смеси

Номер состава бетона	Плотность бетона кг/м³	Материалы бетонной смеси		
		Вяжущее и тонкомолотая добавка, если она вводится	Мелкий заполнитель и добавка, если она вводится	Крупный заполнитель
1	2200	Портландцемент	Кварцевый песок	Гранит
4	2340	Портландцемент	Кварцевый песок	Известняк
15	2404	Гипсоглиноземистый цемент	Кварцевый песок	Известняк
16	2410	Магнезиальный цемент	Кварцевый песок	Известняк
17	2700	Портландцемент	Лимонит	Лимонит
18	3370	Гипсоглиноземистый цемент	Лимонит	Лимонит
19	3620	Магнезиальный цемент	Гематит	Лимонит
20	4400	Гипсоглиноземистый цемент	Лимонит	Стальной скрап
21	4400	Гипсоглиноземистый цемент	Лимонит	Стальной скрап
23	3660	Портландцемент	Гематит	Гематит
24	4300	Портландцемент	Кварцевый песок	Гематит
25	4683	Портландцемент	Кварцевый песок	Стальной скрап
26	5000	Портландцемент	Кварцевый песок	Стальной скрап
30	3340	Портландцемент	Колеманит	Гематит
31	4500	Портландцемент	Колеманит	Стальной скрап
35	2400	Портландцемент и шамот	Кварцевый песок	Известняк
36	2150	Портландцемент и серпентинит	Серпентинит	Серпентинит
37	2250	Портландцемент и серпентинит	Гематит	Серпентинит

Табл. 2. Технологические составы защитных бетонов

Номер состава бетона	Плотность бетона кг/м³	Материал, расходуемый на 1 кг на м³ бетонной смеси			
		Вяжущее и тонкомолотая добавка, если она вводится	Мелкий заполнитель	Крупный заполнитель	Вода
1	2200	228	582	1147	183
4	2340	306	624	1211	199
15	2404	304	620	1264	212
16	2410	295	600	1264	250
17	2700	300	660	1500	240
18	3370	300	720	2130	220
19	3620	400	920	2000	310
20	4400	225	1700	2250	225
21	4400	220	1725	2270	225
23	3660	300	1050	2130	180
24	4300	350	400	700	180
25	4683	300	510	3690	183
26	5000	400	100	4250	250
30	3340	380	220	2560	180
31	4500	300	220	3800	180
35	2400	320	482	1000	278
36	2150	230	600	847	243
37	2250	250	500	1000	250

Табл. 3. Форма представления химического состава защитных бетонов для бетона № 3

Элемент	Материал				Итого
	Вяжущее (портландцемент)	Мелкий заполнитель (кварцевый песок и карбид бора)	Крупный заполнитель (известняк)	Вода	
Неактивационно-опасные элементы					
H	0,3	0,0	0,0	6,4	6,7
O	108,8	324,2	594,4	51,6	1079,0
B	0,0	30,0	0,0	0,0	30,0
C	0,0	10,0	127,6	0,0	137,6
Mg	3,2	0,0	7,1	0,0	10,3
Al	6,4	6,3	5,6	0,0	18,3
Si	37,2	275,2	11,2	0,0	323,6
S	2,9	4,2	1,5	0,0	8,6
Cr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Активационно-опасные элементы					
Ca	123,3	0,0	458,7	0,0	582,0
Fe	7,7	0,0	5,0	0,0	12,7
Eu·10 ⁻⁴	5,79	7,32	0,6	0,0	13,71
Co·10 ⁻⁴	33,58	15,86	4,84	0,0	54,28
Cs·10 ⁻⁴	5,51	0,61	2,42	0,0	8,54
Ni·10 ⁻⁴	39,44	12,2	363,3	0,0	415,0
Nb·10 ⁻⁴	31,87	0,6	55,7	0,0	88,17
Li·10 ⁻⁴	46,4	91,5	60,55	0,0	198,45
Th·10 ⁻⁴	4,9	11,0	102,2	0,0	118,1
U·10 ⁻⁴	13,0	29,2	36,3	0,0	78,5
Всего	289,8	609,9 и 40,0	1211,1	58,0	2208,8

вне активной зоны [16]. Сечения активации взяты из библиотеки ORIGEN программного комплекса SCALE [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В общем виде информационная система данных по выводу из эксплуатации блока АС — это совокупность документально подтвержденных и упорядоченных сведений об эксплуатации блока АС, инженерных и радиационных обследованиях, результатах расчетных исследований, проектных дан-

ных, необходимых для планирования и проведения работ по выводу из эксплуатации блока АС.

В состав информационной системы АС в качестве самостоятельного блока должен входить банк данных по наведенной активности материалов радиационной защиты ядерных установок. В укрупненном виде банк данных по наведенной активности должен состоять из трех основных разделов, условно названных: физический, материаловедческий и справочно-экономический. Структурная блок-схема банка данных по активации представлена на рис. 1.

Рис. 1. Блок-схема банка данных по активации бетонов радиационной защиты ядерных установок

Рассмотрим основное содержание каждого из разделов. Физический раздел включает себя:

- геометрические схемы расчета (расчетные модели);
- коды расчета переноса излучения;
- коды и инженерные методы расчета активации конструкционных и защитных материалов;
- основные реакции активации и радиационно-физические характеристики долгоживущих радионуклидов;
- характеристики реакторных установок и их историю эксплуатации.

Материаловедческий раздел включает в себя:

- типы и виды сырьевых материалов, используемых в конструкциях радиационной защиты АС;
- данные по элементарному составу и концентрациям химических элементов, определяющих долгоживущую активность железобетонных конструкций радиационной защиты;
- данные о химическом составе конструкционных и защитных материалов действующих ядерно-технических установок;
- данные о месторождениях сырьевых материалов;
- данные о месторасположении действующих, проектируемых и сооружаемых АЭС.

Справочно-экономический раздел включает в себя:

- законы, нормы и правила в области нормирования и обращения с радиоактивными отходами;
- расчет технико-экономической эффективности выбора материала АС с учетом этапа ВЭ;
- оценку объемов РАО радиационной защиты и стоимости их транспортировки, хранения и захоронения при демонтаже блоков АС;
- методы, критерии и основы выбора малоактивируемых материалов радиационной защиты АЭС с учетом стадии вывода из эксплуатации.

В качестве примера приведена информация, разъясняющая алгоритм работы с банком данных и примеры входной и выходной информации.

Первым шагом является выбор технологического состава бетона из блока материалов для действующих ядерных установок, если известен его химический состав; аналога состава под определенным номером для действующих установок; имеющегося состава под определенным номером для прогнозных расчетов наведенной активности.

В табл. 2–3 показана входная информация и необходимые преобразования входных данных для расчета удельной активности долгоживущих радионуклидов для бетона (табл. 2 — примеры технологического состава бетонной смеси, табл. 3 — ядерная плотность химических элементов в конкретном бетоне). Все эти результаты получены с помощью данных материаловедческого раздела. Именно такие исходные данные (и никакие другие) позволяют проводить расчеты прохождения излучения че-

рез защитные экраны для определения необходимой толщины, реально спрогнозировать объемы РАО за счет наведенной активности и при необходимости провести поверочные расчеты с использованием других расчетных кодов.

Ядерная плотность химических элементов в бетоне № 3 следующая:

Элемент	Плотность · E+24
<i>Неактивационно-опасные элементы</i>	
H	0,00403
B	0,00167
Mg	0,00025
Si	0,00696
Cr	0,00000
O	0,04060
C	0,00069
Al	0,000416
S	0,00016
<i>Активационно-опасные элементы</i>	
Fe	0,00014
Eu	0,00000000543
Cs	0,0000000038
Nb	0,0000000057
Th	0,0000000306
Ca	0,00874
Co	0,0000000055
Ni	0,000000426
Li	0,00000172
U	0,0000000199

После выбора и преобразования исходных данных с использованием расчетных кодов, характеристик, параметров и информации физического раздела, возможно получение следующей информации:

- распределения удельной и суммарной активности бетонов в зависимости от времени выдержки лет для долгоживущих радионуклидов, определяющих наведенную активность бетонов;
- вклады различных радионуклидов в суммарную наведенную активность бетонов и их изменение в зависимости от времени выдержки;
- толшины активированного радиоактивного слоя для различных бетонов в зависимости от времени выдержки после останова реактора.

Далее, используя информацию физического и справочно-экономического разделов, можно получить данные по объемам и категориям РАО и материалов повторного использования за счет демонтажа радиационной защиты при выводе из эксплуатации блоков действующих АС и выбрать наименее активируемый защитный бетон для блоков нового поколения. Примеры таких результатов приведены на рис. 2 и в табл. 4.

ВЫВОДЫ

1. Для повышения надежности определения уровней активности и объемов радиоактивных отходов на момент вывода из эксплуатации действующих АЭС необходимо знать в каждом конкретном случае

Табл. 4. Максимальная удельная активность, толщина радиоактивного слоя и объемы радиоактивных отходов при демонтаже защиты ядерного реактора (при времени выдержки 1 год и 25 лет)

Номер состава бетона (крупный заполнитель)	Плотность материала, кг/м ³	Объем защиты, м ³	Максимальная удельная активность, Бк/г		Толщина радиоактивного слоя, см		Объем радиоактивных отходов, м ³	
			1 год	25 лет	1 год	25 лет	1 год	25 лет
Состав № 1 (гранит)	2200	1780	1,0E+05	1,0E+04	150	120	650	510
Состав № 22 (гематит)	3400	1177	6,0E+06	1,1E+03	105	50	440	200
Состав № 21 (стальной скрап)	4400	878	8,0E+05	2,0E+03	80	40	320	160
Состав № 57 (стеклобетон)	2280	1292	6,0E+03	8,0E+02	50	30	200	120

Рис. 2. График спада удельной активности долгоживущих радионуклидов для бетона защиты (время облучения 60 лет, время выдержки 1–100 лет)

элементный состав всех конструкционных и защитных материалов в приреакторном пространстве, которые подвергаются облучению потоками нейтронов.

2. На действующих ядерных установках необходимо отобрать образцы конструкционных и защитных материалов и определить содержание в них активационно-опасных элементов.

3. Существует возможность и необходимость оптимизировать составы бетонов радиационной защиты для АЭС с ВВЭР-ТОИ, используя банк дан-

ных по наведенной активности конструкционных и защитных материалов.

4. Информационная составляющая проектов АЭС нового поколения должна включать базу данных по активационным характеристикам защитных материалов, а данные о химическом составе материалов защиты должны быть отражены в проектных документах в форме Паспорта на химический состав с учетом содержания основных, примесных и следовых активационно-опасных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Decommissioning strategies for facilities using radioactive material. Vienna, 2007. (Safety Reports Series. No 50)
2. Иванов Е., Коротков А., Пырков И. Радионуклидный вектор // Росэнергоатом. 2015. № 1. С. 42–45.
3. Evans J.C., Lepel E.A., Sundens R.W. et al. 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.
4. Child C.L. Removal of the Yankee pressure vessel diary of a work in progress // ICONE-4: Nuclear engineering (Proceedings of the 4th JSME/ASME Joint International Conference, New Orleans, 1996), New York, 1996. Pp. 95–100.
5. May S., Piccot D., Bergemann L. et al. Activation of biological shields // Proceeding of European Conference on Decommissioning of Nuclear Power Plants. Luxembourg, 1984. Pp. 47–60.
6. Nazarov V.M., Frontyasyeva M.V., Stefanov N.I. et al. Activation studies of concrete binding agent ingredients used for nuclear radiation shielding // Kernenergie, 1991. Bd. 34. Pp. 7–8.
7. Engovatov I.A., Mashkovich V.P., Orlov Y.V. et al. Radiation safety assurance: decommissioning nuclear reactors at civil and military installations. Arlington, VA, 2005. (ISTC Science and Technology Series. Vol. 4)
8. Войткевич Г.А., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. Краткий справочник по геохимии. М.: Недра, 1977.
9. Енговатов И.А. Принципы построения информационно-формационной системы по выводу из эксплуатации блоков АС // Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях: тез. докл. конф. 17–19 сентября 2002 г. Обнинск. с. 280.
10. Енговатов И.А. Объемы радиоактивных отходов и активация радиационной защиты реакторных установок // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 325–330.
11. Bylkin B., Kozhevnikov A.N., Engovatov I.A., Sinushin D.K. Radioactivity category determination for radiation-protection concrete in nuclear facilities undergoing decommissioning // Atomic energy. March 2017. Vol. 121. Pp. 383–387.
12. Былкин Б.К., Енговатов И.А. Вывод из эксплуатации реакторных установок. М., 2014. С. 228.
13. Борисов С.Е., Крюков А.П., Машкович В.П., Черетин 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.
14. Bylkin B.K., Kozhevnikov A.N., Engovatov I.A. Selecting Concrete for Radiation Protection for New-Generation NPP // Atomic Energy. 2015. Vol. 118 (10). Pp. 436–441.
15. DOORS 3.2: One -two- and three dimensional discrete ordinates neutron/photon transport code system, ORNL-RSICC C-650, 1998.
16. 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.
17. SCALE: A modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation. NUREG/CR-200. Rev. 5, 1995.

Поступила в редакцию 10 марта 2017 г.

Принята в доработанном виде 22 сентября 2017 г.

Одобрена для публикации 2 октября 2017 г.

О Б А В Т О Р А Х: Былкин Борис Константинович — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ КИ), 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1; bbylkin@rambler.ru;

Енговатов Игорь Анатольевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eng46@mail.ru;

Кожевников Алексей Николаевич — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kozhevnikov_an@nrcki.ru;

Синюшин Дмитрий Константинович — заместитель начальника отдела, АО «Государственный специализированный проектный институт» (АО «ГСПИ»), 115088, г. Москва, Шарикоподшипниковская ул., д. 4; dimsин@bk.ru.

REFERENCES

1. *Decommissioning strategies for facilities using radioactive material. Vienna, 2007.* (Safety Reports Series. No 50).
2. Ivanov E., Korotkov A., Pyrkov I. Radionuklidnyy vektor [Radionuclide vector]. *Rosenergoatom* [Rosenergoatom]. 2015, no. 1, pp. 42–45.
3. Evans J.C., Lepel E.A., Sundens R.W. et al. 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.
4. Child C.L. Removal of the Yankee pressure vessel diary of a work in progress. *ICONE-4: Nuclear engineering (Proceedings of the 4th JSME/ASME Joint International Conference, New Orleans, 1996)*. New York, 1996, pp. 95–100.
5. May S., Piccot D., Bergemann L. et al. Activation of biological shields. *Proceeding of European Conference on Decommissioning of Nuclear Power Plants*. Luxembourg, 1984, pp. 47–60.
6. Nazarov V.M., Frontyasyeva M.V., Stefanov N.I. et al. Activation studies of concrete binding agent ingredients used for nuclear radiation shielding. *Kernenergie* [Atomic Energy]. 1991, Bd. 34, pp. 7–8.
7. Engovatov I.A., Mashkovich V.P., Orlov Y.V. et al. *Radiation safety assurance: decommissioning nuclear reactors at civil and military installations. Arlington, VA, 2005.* (ISTC Science and Technology Series. Vol. 4).
8. Voytkovich G.A., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S., Prokhorov V.G. *Kratkiy spravochnik po geokhimii* [Quick reference book on geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1977. (In Russian)
9. Engovatov I.A. Printsipy postroeniya informatsionnoy sistemy po vyvodu iz ekspluatatsii blokov AS [Principles of constructing an information system for decommissioning atomic plant units]. *Radiatsionnaya zashchita i radiatsionnaya bezopasnost' v yadernykh tekhnologiyakh: tez. dokl. konf. 17–19 sentyabrya 2002 g.* [Radiation protection and radiation safety in nuclear technologies: doc. Conf. September 17–19, 2002]. Obninsk. 280 p. (In Russian)
10. Engovatov I.A. Ob'emy radioaktivnykh otkhodov i aktivatsiya radiatsionnoy zashchity reaktornykh ustanovok [Volumes of radioactive waste and activation of radiation protection of reactors]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 8, pp. 325–330. (In Russian)
11. Bylkin B.K., Kozhevnikov A.N., Engovatov I.A., Sinushin D.K. Radioactivity category determination for radiation-protection concrete in nuclear facilities undergoing decommissioning. *Atomic energy*. March 2017, vol. 121, pp. 383–387.
12. Bylkin B.K., Engovatov I.A. *Vyvod iz ekspluatatsii reaktornykh ustanovok* [Decommissioning of reactor plants]. Moscow, 2014, p. 228. (In Russian)
13. Borisov S.E., Kryukov A.P., Mashkovich V.P., Neretin V.A. Dvumernye issledovaniya navedennoy aktivnosti v materialakh IRT MIFI pri vyvode iz ekspluatatsii ili rekonstruktsii [Two-dimensional studies of induced activity in the materials of the MEPhI Typical Research Reactor during decommissioning or reconstruction]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 1996, vol. 81, issue 4, pp. 277–281. (In Russian)
14. Bylkin B.K., Kozhevnikov A.N., Engovatov I.A. Selecting concrete for radiation protection for new-generation NPP. *Atomic Energy*. 2015, Vol. 118 (10), pp. 436–441.
15. DOORS 3.2: *One -two- and three dimensional discrete ordinates neutron/photon transport code system, ORNL-RSICC C-650, 1998.*
16. 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.*
17. SCALE: *A modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation. NUREG/CR-200. Rev. 5, 1995.*

Received on March 10, 2017.

Adopted in final form on September 22, 2017.

Approved for publication on October 2, 2017.

ABOUT THE AUTHORS: **Bylkin Boris Konstantinovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, **National Research Centre "Kurchatov Institute"** (NRC "Kurchatov Institute"), 1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123182, Russian Federation; bbylkin@rambler.ru;

Engovatov Igor' Anatol'yevich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Construction of Heat and Nuclear Power Facilities, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eng46@mail.ru;

Kozhevnikov Aleksey Nikolayevich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kozhevnikov_an@nrcki.ru;

Sinyushin Dmitriy Konstantinovich — Deputy Head of the Department, **AO "State Specialized Design Institute"** (AO "GSPI"), 4 Sharikopodshipnikovskaya str., Moscow, 115088, Russian Federation; dimsin@bk.ru.