

6. **Tong L., Tang Y.** Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow. Oxfordshire: Taylor & Francis, 1997.
7. **Nuclear Fuel Safety Criteria Review** (2nd ed.). OECD, 2012. 83 p.
8. **Шишков Л.К.** Обеспечение 95%-ной вероятности с 95%-ной надежностью выполнения проектных ограничений. — В сб.: Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Подольск, ОКБ «Гидропресс», 2009, с. 12—16.
9. **Нормы и правила атомной энергетики.** Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ПНАЭ Г-01-011—97 (ОПБ 88/97). М., Госатомнадзор России, 1998.
10. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. Учебн. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2004.
11. **Статистическое представление данных.** Определение статистических толерантных интервалов ГОСТ Р ИСО 16269-6—2005. М.: Стандартинформ, 2005.
12. **Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г.** Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004.
13. **Todreas N., Kazimi M.** Nuclear Systems II. Elements of Thermal Hydraulic Design. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2001.
14. **Chelemer H.** Improved Thermal Design Procedure. Westinghouse Electric Corp. WCAP-8568-A, 1989.
15. **Ray S., Friedland A., Novendstern E.** Westinghouse advanced statistical DNB methodology — the «Revised Thermal Design Procedure». — In: III Intern. Top. Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations. Seoul, 1988, p. 261—265.
16. **Robeyns J.** Application of a statistical thermal design procedure to evaluate the PWR DNBR safety analysis limits (INIS-FR-728). — In: ICONE-9, 2001, p. 21—36.
17. **Bourteele J., Greige J., Missaglia M.** The Framatome generalized statistical DNBR method (MSG). — In: NURETH-6, 1993, p. 355—363.
18. **Wakamatsu A.** Development of advanced fuel and core for high reliability and high performance. — Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Techn. Rev., 2006, v. 43, № 4, p. 1—5.
19. **Фальков А.А.** Уточнение методики учета отклонений локальных параметров при обосновании теплотехнической надежности активной зоны из ТВСА ВВЭР-1000. — Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева, 2010, № 4(83), с. 111—119.
20. **Han K.** Technical Review on Statistical Thermal Design of PWR Core. KAERI, 1983.
21. **Heller A.** Statistical Core Design Applied to BABCOCK-205 Core. BAW-10145-A, 1985.
22. **Blair S.** Thermal Hydraulic Performance Analysis of a Small Integral Pressurized Water Reactor Core. MIT, Master of Science in Nuclear Engineering Dissertation, 2003.
23. **Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А. и др.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 5, с. 252—257.

Поступила в Редакцию 16.06.2015

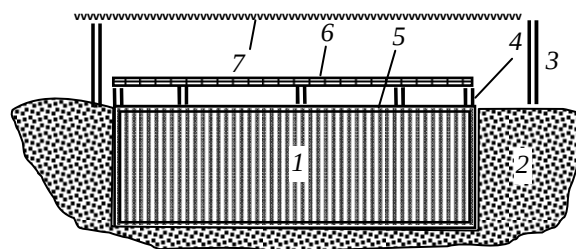
УДК 621.039.566

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА ОПТИМИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ В РАБОТАХ ПО НОРМАЛИЗАЦИИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В БСХ-ЗА

*Сухоручкин А.К., Степеннов Б.С., Федосеенков А.Н. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Куликов К.Н., Заочинский С.П., Иванов А.Б., Лесохин Б.М. (ОАО «НИПТБ Онега», г. Северодвинск)*

Блок сухого хранения (БСХ-ЗА) на территории береговой технической базы в губе Андреева Мурманской области был создан путем дооборудования имевшейся здесь железобетонной приземной емкости для временного хранения отработавшего ядерного топлива, выгруженного из судовых реакторов (рис. 1). Внутренний диаметр емкости хранения составляет 18,8 м, глубина ~6 м. В емкости выполнены ячейки хранения (каналы) из вертикально установленных стальных труб диаметром 325 мм, межтрубное пространство залито бетоном. В 1985 г. в БСХ-ЗА была размещена примерно 1000 чехлов с семью отработавшими ТВС в каждом. После установки чехла ячейку закрывали бетонной заглушкой толщиной 52 см. По окончании загрузки над емкостью соорудили укрытие: ем-

кость была перекрыта строительными железобетонными плитами, застланными рубероидом. В процессе многолетней эксплуатации рубероидное покрытие частично разрушилось, атмосферные осадки стали попадать в емкость хранения,



Р и с. 1. Вертикальный разрез (эскиз) БСХ-ЗА по диаметру С-Ю (север—юг) по состоянию на 2009 г.: 1 — емкость хранения; 2 — грунт; 3 — стена; 4 — опора; 5 — поверхность емкости; 6 — плиты перекрытия (1985); 7 — крыша (2004)

затем перетекать на поверхность емкости и в грунт. Поверхность емкости превратилась в мощный источник γ -излучения, что ухудшило радиационную обстановку внутри и в окрестности БСХ-ЗА.

В 2004 г. над емкостью соорудили герметичное укрытие с каркасным перекрытием и кровлей из металлического профнастила. Радиационная обстановка стабилизировалась, но излучение не соответствовало нормам радиационной безопасности: на плитном перекрытии мощность дозы достигала 3,2 мЗв/ч, на поверхности емкости — 42 мЗв/ч (здесь и далее имеется в виду мощность амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ [1]). При этом средняя по площади мощность в десятки—сотни раз превышала допустимую 12 мкЗв/ч, установленную для помещений постоянного пребывания персонала [2]. В таких условиях персонал мог находиться лишь короткое время, что препятствовало предстоящей выгрузке и вывозу отработавшего топлива с территории базы.

Основные проектные решения. Проект нормализации радиационной обстановки включал четыре этапа:

- создание инфраструктуры для размещения дистанционно управляемых механизмов и организации рабочих мест;

- демонтаж конструкций перекрытия, удаление строительного мусора и прочих твердых радиоактивных отходов;

- установка экрана сборной радиационной защиты непосредственно на поверхность емкости хранения;

- демонтаж оборудования и временных объектов инфраструктуры, реабилитация площадки и сооружение нового укрытия минимальных размеров.

Экран радиационной защиты состоит из стальных сегментов толщиной 15 см, конструкция которых исключает прямой прострел излучения по стыковочным швам [3—5].

В результате реализации проекта средняя мощность дозы на емкости хранения и в ее окрестности должна быть ниже уровня 12 мкЗв/ч.

В БСХ-ЗА основной фактор радиационного воздействия на персонал — внешнее облучение от источников, находящихся на поверхности емкости хранения. Конструкции укрытия БСХ-ЗА (плиты перекрытия, опорные элементы

и др.) выполняли также функцию радиационной защиты, хотя и недостаточно совершенной. Эти конструкции требовалось демонтировать, при этом радиационная обстановка временно ухудшалась, и персонал подвергался значительному облучению. Например, в модулях обслуживания дистанционно управляемых механизмов расчетная мощность дозы на основных этапах работ по проекту составляла 42,5—107 мкЗв/ч [6]. Радиационная обстановка в БСХ-ЗА оценивалась как опасная. До окончания монтажа экрана радиационной защиты выход персонала на емкость хранения запрещался. В аварийных ситуациях допускалось ограниченное пребывание в зоне работ в изолирующих костюмах с шланговой подачей воздуха дыхания.

Учитывая необходимость снижения радиационного воздействия на персонал, для демонтажа плит перекрытия, удаления твердых отходов и установки экрана радиационной защиты проектом были предусмотрены дистанционно управляемые механизмы: кран-манипулятор НИАВ 700 Е-9 (Швеция), машина (разрушитель бетона) Brokk 90N (Швеция), тележка для перемещения твердых отходов из технологического пролета в модуль обращения с ними. Рабочие места персонала располагались на расстоянии 20—30 м от центра емкости хранения, при этом в целях радиационной защиты элементы стальных конструкций рабочих модулей со стороны БСХ-ЗА имели повышенную до 50 мм толщину. Для обеспечения рабочего пространства крана НИАВ проект предусматривал наращивание стен БСХ-ЗА и подъем крыши на 180 см.

Анализ проекта на соответствие нормам радиационной безопасности. Обстановка в БСХ-ЗА затрудняла получение точных данных о радиационном и инженерном состоянии объекта. В этих условиях были приняты вынужденные консервативные допущения и завышенные оценки облучения персонала. Проектная коллективная доза составляла 1700 чел.·мЗв при относительно малой численности занятого персонала (от 6 до 20 человек). Индивидуальную дозу предлагалось снизить до уровня ниже годового предела путем замены персонала. Замена персонала означает увеличение числа облучаемых лиц — это не соответствует принципу оптимизации защиты [7] и положению МАГАТЭ о численности необходимого персонала [8]. По-

этому в соответствии с рекомендациями МКРЗ [9] в ходе реализации проекта провели неформальную оптимизацию защиты путем доступных изменений в технологии работ и порядке выполнения операций и без привлечения дополнительных ресурсов.

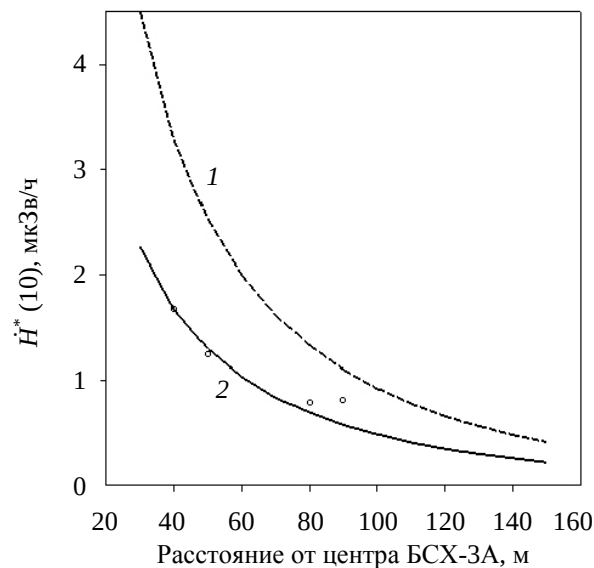
Снижение планируемой дозы облучения персонала: уточнение модели источника γ -излучения. Одна из причин высокой дозы облучения — излишне консервативный расчет, в котором завышена мощность дозы на рабочих местах персонала. Модели и данные, используемые для оптимизации, должны быть настолько реалистичными, насколько возможно [10], известно также, что переоценка риска обесценивает оптимизацию [11].

В проектных расчетах источник был задан в форме диска радиусом 940 см, толщиной 1 см. Толщину источника определили по результатам отбора проб (сколов) бетона с поверхности емкости хранения. Активность источника $5,22 \cdot 10^{12}$ Бк ^{137}Cs оценили по соответствию расчетной и измеренной мощности дозы на поверхности плитного перекрытия.

Дополнительный анализ показал, что имеется тенденция к завышению расчета относительно измерений за пределами емкости. Причина в том, что при малой толщине источника в расчетах не учитывается рельеф поверхности: заглубление ячеек, неровности, строительный мусор (рис. 2). Из визуальных представлений о шероховатости поверхности была выбрана толщина источника 10 см. Обоснованность такого выбора подтвердили последующие расчеты. На рис. 3 видно, что использование модели источника толщиной 10 см приводит к более реалистиче-



Р и с. 2. Вид на поверхность емкости и ячейки хранения БСХ-3А (2009)



Р и с. 3. Расчетная при толщине источника 1 (1), 10 см (2) и измеренная мощность дозы (○) на разном расстоянии от центра БСХ-3А на высоте 1 м от поверхности земли в 2009 г.

ким результатам, при этом расчетная мощность дозы на рабочих местах снижается в 2—3 раза.

Снижение фактической дозы облучения персонала. Изменение подъема крыши над БСХ-3А. Масса крыши превышала 32 т, ее подъем на 180 см по проекту должен был осуществляться с помощью гидравлических домкратов, установленных по периметру БСХ-3А. При этом рабочие места длительное время (~1 мес.) располагались непосредственно под стенами БСХ-3А в зоне относительно высокой мощности дозы ~60 мЗв/ч. К началу работ завершился ремонт portalного крана КПМ-40, поэтому было решено демонтировать и поднимать крышу с его помощью. Предварительно по условиям грузоподъемности конструкцию крыши разделили на две равные по массе части (рис. 4). По результатам измерений на линии реза крыши средняя мощность дозы составляла ~380 мЗв/ч, но вследствие небольшого времени (1 сут) выполнения операций это привело к существенному сокращению трудозатрат и дозы облучения персонала. Важно, что по принятой технологии подъема крыши был открыт доступ к перекрытию емкости хранения, что сделало возможной временную установку на него дополнительной горизонтальной защиты (рис. 5).

Установка дополнительной горизонтальной защиты на перекрытие БСХ-3А. Высокая мощность дозы на рабочих местах обусловлена γ -излучением, прошедшим через плиты пере-



Р и с. 4. Операции демонтажа крыши БСХ-3А: а — разделение конструкции на две части; б — перемещение одной из частей краном КПМ-40

крытия емкости хранения. В связи с неустановленной прочностью перекрытия в проектной технологии не рассматривалась возможность/целесообразность установки защитных экранов непосредственно на плиты перекрытия. Анализ нагрузок на перекрытие, технических параметров плит перекрытия, ресурсов и технологических возможностей показал:

перекрытие способно выдерживать дополнительную нагрузку не менее 300 кг/м^2 ;

подъем крыши с помощью крана КПМ-40 позволяет установить экраны сразу после демонтажа укрытия, т.е. в самом начале работ на площадке БСХ-3А;

в качестве экранирующего материала целесообразно использовать стальные листы технологического настила, складируя их на плитах перекрытия [6].

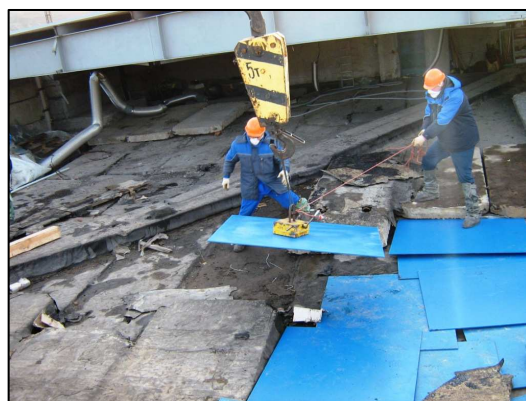
Лимитированная прочность плит перекрытия и небольшой запас материала (180 листов настила) накладывали ограничения на формирование дополнительной горизонтальной защиты: по массовой нагрузке максимальная толщина стальной защиты не должна была превышать



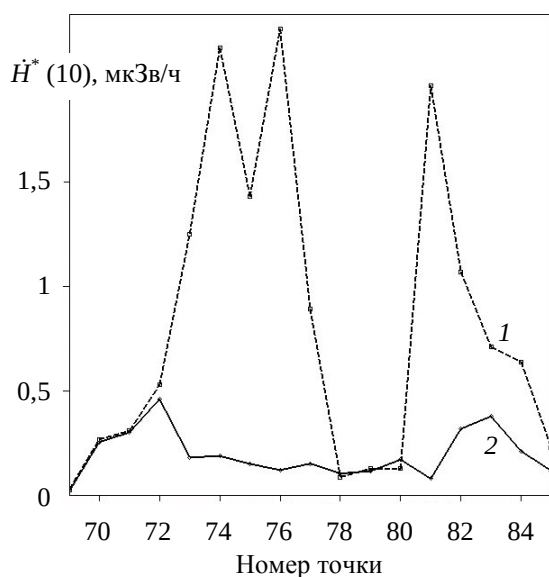
Р и с. 5. Вид на плитное перекрытие емкости хранения после снятия половины крыши с северной стороны БСХ-3А

4 см, запаса материала при его равномерном распределении хватало лишь на слой защиты толщиной 1 см. Кроме того, поле γ -излучения имело существенную пространственную неоднородность: мощность дозы на перекрытии различалась в десятки—сотни раз. Все это обусловило целесообразность оптимизации толщины защиты.

Из теоретических предпосылок [12] наибольший эффект от установки защиты на плоском источнике можно ожидать, если руководствоваться принципом выравнивания мощности дозы по поверхности источника. Действительно, если она выравнена, то любое перемещение защитного материала приводит к увеличению средней по поверхности источника мощности дозы: $P < 1/N(P \exp(a\delta) + P \exp(-a\delta) + (N-2)P)$, где P — мощность дозы при выравненном поле γ -излучения; N — число точек измерения вблизи поверхности источника, расположенных по регулярной сетке; δ — толщина материала, перемещенного из одной точки защиты в другую точку; $a = (\ln 2)/\Delta$; Δ — толщина слоя половинного ослабления мощности материалом защиты [6]. Правая часть неравенства — средняя мощность дозы по поверхности источника после перемещения защитного материала. По свойству экспоненциальной функции неравенство выполняется при любом $\delta > 0$. Поэтому на практике с помощью переносного дозиметра определяли место с высокой (наибольшей) мощностью дозы, на которое и укладывали очередной лист (рис. 6). Достигнутое выравнивание поля иллюстрирует рис. 7. Толщина листа составляла



Р и с. 6. Укладка очередного листа на плитное перекрытие на место с наибольшей мощностью дозы с помощью магнитного захвата крана КПМ-40



Р и с. 7. Мощность дозы над перекрытием на высоте 0,1 м вдоль диаметра В—З емкости хранения до (1) и после установки (2) дополнительной горизонтальной защиты

1 см, площадь 1,8 м², масса 141,5 кг. Всего было уложено 180 листов. Оптимизированная по толщине защита заняла 64% площади перекрытия, толщина защиты изменялась от 1 до 4 см. В результате установки дополнительной защиты средняя по площади мощность дозы снизилась в 3,75 раза — с 0,9 до 0,24 мЗв/ч. При равномерном распределении материала для достижения такого результата потребовалась бы сплошная защита толщиной 2 см. Для этого на плиточное перекрытие необходимо было бы уложить в два слоя 312 листов. Таким образом, в результате оптимизации толщины защиты экономия материала (стального листа) составила 18,7 т.

Изменение последовательности операций на основных этапах работ. По проекту на этапе 2 следовало разобрать и удалить все конструкции существующего перекрытия и установить технологический настил на поверхность емкости хранения, на этапе 3 — подготовить поверхность и установить экран радиационной защиты. При такой последовательности операций вся поверхность емкости хранения или ее большие участки длительное время находились бы под защитой только технологического настила. Толщина стального настила при его равномерном распределении по всей поверхности емкости хранения могла составлять 1 см на 83% площади и 2 см на 17% площади. По отношению к γ -излучению защитные свойства такого настила в несколько раз уступают свойствам

удаляемого железобетонного перекрытия толщиной 20—40 см. Поэтому было предложено этапы 2 и 3 объединить в один, при этом поочередно вскрывать небольшие участки перекрытия и сразу устанавливать сегменты экрана радиационной защиты. На практике чередование работ не удалось реализовать в полной мере, поскольку установка и конструкция экрана требовали освобождения больших площадей: сначала пришлось вскрыть полностью половину перекрытия, затем после установки экрана вторую часть. Но и в этом случае мощность дозы на рабочих местах была снижена примерно в 2 раза по сравнению с проектной (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Расчетная мощность дозы на высоте 1 м на рабочих местах при вскрытии перекрытия емкости хранения, мкЗв/ч

Состояние перекрытия	Расстояние от центра БСХ-3А, м			
	10	20	30	40
Вскрыто полностью	70	36,9	25,8	19,4
Вскрыта только половина со стороны:				
	южной	40,9	17,9	12
	северной	29,1	19	13,8

Закключение. В дополнение к проектным решениям дальнейшая оптимизация защиты выполнена на стадиях текущего планирования и фактического проведения работ. При этом уточнена модель источника γ -излучения, применена дополнительная защита, внесены некоторые изменения в технологию и последовательность выполнения операций. В результате трудозатраты снизились примерно в 2,6 раза, коллективная доза — примерно в 24 раза по сравнению с проектной (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Проектные и фактические трудозатраты и дозовые нагрузки на персонал на этапах нормализации радиационной обстановки в БСХ-3А

Этап	Трудозатраты, тыс. чел.·ч		Коллективная доза, чел.·мЗв	
	По проекту	Фактические	По проекту	Фактическая
1	30	10,75	810	22,4
2—3	28	8,11	857	36,1
4	8,62	6,41	36	12,6
Всего	66,62	25,27	1700	71,1



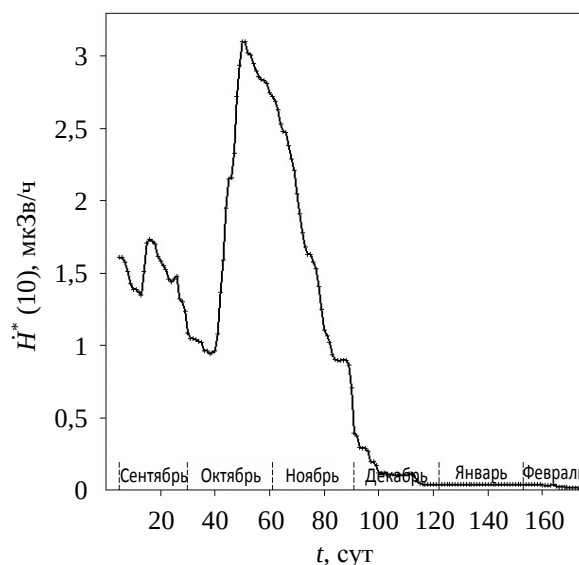
Р и с. 8. Измерения мощности дозы над поверхностью емкости хранения после установки экрана радиационной защиты (27.12.2011)

Удалось избежать случаев отстранения и замены персонала по причине достижения предела дозы, численность персонала определялась только технологией работ. Максимальная индивидуальная доза внешнего облучения за весь период работ составила 7,42 мЗв. С окончанием работ средняя мощность дозы над емкостью хранения уменьшилась до 7,44 мкЗв/ч, т.е. проектный уровень ниже 12 мкЗв/ч был достигнут (рис. 8, 9). Существенно снижен фон γ -излучения и на прилегающей территории — на расстоянии 40—60 м мощность дозы уменьшена в 2,5—3,4 раза.

В настоящее время радиационная обстановка вокруг и в БСХ-ЗА не препятствует планируемому строительству инженерных сооружений по обращению с отработавшим топливом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дозиметрический** контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования. МУ 2.6.1.25—2000. — В кн.: Методическое обеспечение радиационного контроля на предприятии, т. 1. М.: Минатом, 2001, с. 57—110.
2. **Обеспечение** радиационной безопасности при проведении работ по реабилитации территорий береговых технических баз. МУ 2.6.6.22—05. М., ФМБА России. 37 с.
3. **Селищев В.А., Варнавин А.П., Васильев А.И. и др.** Нормализация радиационной обстановки хранилища отработавшего ядерного топлива с использованием ди-



Р и с. 9. Мощность дозы над емкостью БСХ-ЗА с 5 сентября 2011 г. по 22 февраля 2012 г. (среднесуточная по данным АСКРО)

станционно управляемого оборудования. — Изв. РАН. Энергетика, 2015, № 1, с. 30—45.

4. **Журавлев Ю.С., Зайченко Н.И., Кузнецов И.Н. и др.** Сборная биологическая защита ядерно- и (или) радиационно-опасного объекта. Патент РФ № 2446491. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2012, № 9.
5. **Иванов А.Б., Кузнецов И.Н., Куликов К.Н.** Способ установки экрана биологической защиты. Патент РФ № 2467418. — Там же, № 32.
6. **Сухоручкин А.К., Степеннов Б.С., Селищев В.А. и др.** Решение проблем обеспечения радиационной безопасности при нормализации радиационной обстановки в хранилище ОЯТ БСХ-ЗА в губе Андреева Мурманской области: Препринт ИАЭ-6749/3, 2013. 68 с.
7. **Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).** Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
8. **Вопросы радиационной защиты в проектах атомных электростанций.** Руководство по безопасности. STI/PUB/687. Вена: МАГАТЭ, 1988.
9. **Публикация 60 МКРЗ.** Ч. 1. Рекомендации МКРЗ 1990 г. М.: Энергоатомиздат, 1994. 191 с.
10. **Optimization and Decision-Making in Radiological Protection.** ICRP Publication 55, 1989.
11. **Радиационная защита.** Публикация 26 МКРЗ. М.: Атомиздат, 1978. 87 с.
12. **Лисочкин Г.А.** Условие оптимума для биологической защиты от нескольких источников излучения. — Атомная энергия, 1963, т. 15, вып. 1, с. 67—68.

Поступила в Редакцию 11.09.15