



РАДОН
РОСАТОМ

Объединённый эколого-технологический
и научно-исследовательский центр по обезвреживанию
РАО и охране окружающей среды (ФГУП «РАДОН»)

ТРУДЫ

Второй международной научно-практической
конференции, посвященной 60-летию ФГУП «РАДОН»

**«ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ
НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРОВ.
ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯРОО»**

Сергиев Посад,
23-24 сентября 2020





RADON
ROSATOM

United Ecological and Technological Research Centre for
Radioactive Waste Treatment and Environmental Protection,
Federal State Unitary Enterprise (RADON FSUE)

BOOK OF ABSTRACTS

II International Scientific and Practical Conference,
dedicated to the 60th anniversary of RADON FSUE

**«ENVIRONMENTAL PROTECTION AND RADIOACTIVE WASTE
MANAGEMENT OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL CENTERS.
DECOMMISSIONING OF NUCLEAR AND RADIATION
HAZARDOUS FACILITIES»**

Sergiev Posad,
September 23-24, 2020



Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров: Труды Второй научно-практической конференции, 23-24 сентября 2020 г. / Под общей редакцией профессора Е.А. Ваниной; М.: Изд-во «Полиграф», 2020 — 160 с: ил. 69, табл. 34.

ISBN 978-5-6045207-0-3

Рецензенты:

Баринов А.С., кандидат технических наук
Воронов С.И., доктор биологических наук, профессор

В сборнике трудов представлены основные результаты второй международной научно-практической конференции ФГУП «РАДОН» в области разработки и совершенствования способов переработки твердых и жидких радиоактивных отходов, реабилитации территорий, хранения радиоактивных отходов, обеспечения безопасности хранилищ радиоактивных отходов, радиологического мониторинга и контроля, вывода из эксплуатации. Сборник предназначен для специалистов в области обращения с радиоактивными отходами и охраны окружающей среды.

Редакционная коллегия:

Цейтин К.Ф., доктор технических наук, профессор,
Савкин А.Е., кандидат технических наук,
Ильин В.А., кандидат технических наук

**Environmental protection and radioactive waste management of scientific and industrial centers.
Decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities: II International Scientific and Practical
Conference. Book of Abstracts, September 23-24, 2020** / Under general editorship of E.A. Vanina, Professor;
M.: Polygraf Publishing, 2020 – 160 p: drawings. 69, tables. 34.

ISBN 978-5-6045207-0-3

Editors:

A.S. Barinov, PhD
S.I. Voronov, Doctor of Biological Science

The book of abstracts presents the main results of II International Scientific-Practical Conference of RADON FSUE, in the field of research and development of liquid and solid radioactive waste treatment, territories rehabilitation, radioactive waste storage, safety ensuring of radioactive waste storage facilities, radiological monitoring and control, decommissioning. The book of abstracts is intended for specialists in the field of radioactive waste management and environmental protection.

Editorial Board:

K.F. Tseytin, Doctor of Engineering Science, Professor,
A.E. Savkin, PhD,
V.A. Ilyin, PhD.

Содержание

<i>Ашрапов У.Т., Садиков И.И., Маликов Ш.Р., Аминжанов М., Нестеров В.П.</i> Радиационный мониторинг естественных радионуклидов на предприятиях нефтегазодобычи и упаковка для хранения радиоактивных отходов, содержащие естественные радионуклиды.	
<i>U.T. Ashrapov, I.I. Sadikov, Sh.R. Malikov, M. Aminzhanov, V.P. Nesterov</i> Radiation monitoring of natural radionuclides in oil and gas production enterprises and packaging for storage of radioactive waste containing natural radionuclides.	10
<i>Ашрапов У.Т., Садиков И.И., Маликов Ш.Р., Миндерлен Э.Р., Васидов А.</i> Реабилитация специальной вегетационной площадки института генетики и экспериментальной биологии растений.	
<i>U.T. Ashrapov, I.I. Sadikov, Sh.R. Malikov, E.R. Minderlen, A. Vasidov</i> Rehabilitation of special vegetation area of Institute of Experimental Plant and Biology.	16
<i>Барышев А.В., Александров В.В., Коновалов В.Ю., Нешта И.Н., Джамавов А.А., Дерябина Л.А.</i> Программное средство для автоматизации процедур ведения учета и контроля поступивших на захоронение радиоактивных отходов.	
<i>A.V. Barishev, V.V. Alexandrov, V.Y. Kononov, I.N. Neshta, A.A. Dzhamavov, L.A. Deryabina</i> Software tool for automation of accounting and control procedures for solid radioactive waste received for disposal.	23
<i>Ведерникова М.В., Самойлов А.А., Шпиньков В.И.</i> О комплексе работ по выбору стратегии обращения с накопленными радиоактивными отходами ФГУП «Радон».	
<i>M.V. Vedernikova, A.A. Samoylov, V.I. Shpinkov</i> Selection of strategy for accumulated radioactive waste management based on long-term safety assessment for storage facilities of RADON FSUE.	27
<i>Горбачева Н.В.</i> Вероятностная оценка долговременной безопасности приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов.	
<i>N. Harbachova, N. Kuzmina, Kulich N., S. Yatsko, J. Korchova</i> Long-term probabilistic safety assessment of the near surface disposal facility for radioactive waste.	31
<i>Гордеев С.К., Пташкин А.Г., Светличный Ю.А., Цейтин К.Ф., Чистовский Ю.В.</i> Мониторинг радиоактивности в окружающей среде московского региона.	
<i>S.K. Gordeev, A.G. Ptashkin, Y.A. Svetlichny, K.F. Tseytin, Y.V. Chistovsky</i> Monitoring of radioactivity in the environment of the Moscow Region.	36
<i>Данилов В.В.</i> Опыт постановки внешних барьеров безопасности на Сибирском химическом комбинате.	
<i>V.V. Danilov</i> Experience of safety external barriers creation at Siberian Chemical Combine.	42

<i>Доильницын В.А., Акатов А.А., Коряковский Ю.С.</i> Деактивация металла при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов. <i>V.A. Doilnitsyn, A.A. Akatov, Yu.S. Koryakovskiy</i> Metal decontamination during decommissioning of radiation hazardous facilities.	46
<i>Ильин В.А.</i> МАГАТЭ: Руководство по безопасности при выводе из эксплуатации медицинских, промышленных и исследовательских объектов. <i>Vadim A. Ilyin</i> IAEA: Safety guide for medical, industrial and research facilities decommissioning.	51
<i>Ильина О.А.</i> Современные материалы на основе бентонитовой глины для создания и восстановления инженерных барьеров безопасности. <i>O.A. Ilyina</i> Advanced bentonite clay based materials for construction and recovery of engineering safety barriers.	58
<i>Ильясов Д.Ф., Иванов А.Ю., Кузнецова Е.О, Овчинников И.Д., Будунова А.С.</i> Разработка информационно-аналитических систем для повышения эффективности деятельности в сфере обращения с РАО. <i>D. Ilyasov, A. Ivanov, E. Kuznetsova, I. Ovchinnikov, A. Budunova</i> Development of information-analytical systems to improve efficiency of activities in the field of radioactive waste management.	62
<i>Капустин В.В., Варлакова Г.А., Варлаков А.П., Германов А.В., Жеребцов А.А., Петров В.Г., Калмыков С.Н.</i> Цементный компаунд как матрица для ВАО. <i>V.V. Kapustin, G.A. Varlakova, A.P. Varlakov, A.V. Germanov, A.A. Zherebtsov, V.G. Petrov, S. N. Kalmykov</i> Cement compound as matrix for HLRW.	66
<i>Князев И.А.</i> Концепция развития плазменной технологии в ФГУП «РАДОН». <i>N.D. Kuzmina, M.L. Zhemzhurov</i> Concept of development of plasma technology at RADON FSUE.	69
<i>Кокорев О.Н., Носков М.Д., Щипков А.А.</i> Применение системы гидродинамического мониторинга для обеспечения экологической безопасности пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. <i>O.N. Kokorev, M.D. Noskov, A.A. Shchipkov</i> Application of the hydrodynamic monitoring system to ensure the environmental safety of the deep geological liquid radioactive waste facility.	74
<i>Кузьмина Н.Д., Жемжуров М.Л.</i> Проблемы обеспечения радиационной безопасности при долговременном централизованном хранении радиоактивных отходов в Республике Беларусь. <i>N.D. Kuzmina, M.L. Zhemzhurov</i> Problems of radiation safety ensuring during long-term centralized storage of radioactive waste in the Republic of Belarus.	77

<p><i>Магомедбеков Э.П., Растунова И.Л.</i> Концепция обращения с тритийсодержащими водными отходами. <i>E.P. Magomedbekov, I.L. Rastunova</i> Concept of tritium-containing water waste treatment.</p>	81
<p><i>Милютин В.В., Некрасова Н.А., Каптаков В.О.</i> Современные сорбционные материалы для очистки жидких радиоактивных отходов от радионуклидов цезия и стронция. <i>V.V. Milyutin, N.A. Nekrasova, V.O. Kartakov</i> Modern sorption materials for purification of liquid radioactive waste from cesium and strontium radionuclides.</p>	85
<p><i>Мартынов Д.Ю., Стрижников О.А.</i> Применение микроводорослей хлореллы в системах очистки сточных вод от токсичных и радиоактивных загрязнений. <i>D.Yu. Martynov, O.A. Strizhnikov</i> Application of chlorella microalgae in systems of wastewater treatment from toxic and radioactive contamination.</p>	89
<p><i>Маряхин М.А., Варлакова Г.А., Варлаков А.П., Германов А.В.</i> Технология очистки радиоактивно загрязненного грунта методом гидросепарации с реагентной обработкой выделенной фракции. <i>M.A. Mariakhin, G.A. Varlakova, A.P. Varlakov, A.V. Germanov</i> Technology of purification of radioactively contaminated soil by hydroseparation method with reagent treatment of the selected fraction.</p>	93
<p><i>Муратов О.Э.</i> Иммобилизация жидких тритий содержащих отходов. <i>O.E. Muratov</i> Immobilization of liquid tritium-containing waste.</p>	96
<p><i>Неуважаев Г.Д., Григорьев Ф.В., Аракелян А.А.</i> Трехмерное моделирование геомиграции радионуклидов в районе расположения промплощадки ФГУП «РАДОН» для оценки долговременной безопасности пунктов хранения РАО. <i>A.Yu. Romanchuk, A.V. Rzhavskaia, I.E. Vlasova, S.N. Kalmykov</i> 3D Modeling of radionuclides migration at RADON FSUE site for safety assessment of near surface storage facilities.</p>	100
<p><i>Осташкина Е.Е., Савкин А.Е., Слостенников Ю.Т., Суменко А.В.</i> Опытно-промышленное кондиционирование отработавших ионообменных смол. <i>E.E. Ostashkina, A.E. Savkin, Yu.T. Slastennikov, A.V. Sumenko</i> Pilot-industrial conditioning of spent ion-exchange resins.</p>	104
<p><i>Романчук А.Ю., Ржевская А.В., Власова И.Э., Калмыков С.Н.</i> Определение форм нахождения радионуклидов для предсказания их миграционного поведения. <i>A.Yu. Romanchuk, A.V. Rzhavskaia, I.E. Vlasova, S.N. Kalmykov</i> Definition of radionuclides speciation for predicting of their migration behavior.</p>	108

Савкин А.Е.

Совершенствование технологии очистки кубовых остатков Кольской АЭС от радионуклидов с использованием сорбентов «Термоксид».

A.E. Savkin

Improving of cleaning technology for Kola NPP evaporator concentrate from radionuclides using «Thermoxide» sorbents.

111

Семенкова А.С., Лехов В.А., Крупская В.В., Романчук А.Ю., Калмыков С.Н.

Сорбционные и миграционные свойства глинистых минералов по отношению к различным радионуклидам.

A.S. Semenkova, V.A. Lekhov, V.V. Krupskaya, A.Yu. Romanchuk, S.N. Kalmykov

Sorption and migration properties of clay minerals in relation to various radionuclides.

115

Серебряков В.В., Мамонов А. В., Давыдов В. В., Разживин С. Г. Гордеев В. П.

Оценка эффективности переработки радиоактивных отходов на установке сжигания.

V.V. Serebryakov, A.V. Mamonov, V.V. Davydov, S.G. Razzhivin, V.P. Gordeev

Assessment of the efficiency of radioactive waste processing at the incineration plant.

120

Торопова В.В., Нагула П.К., Радкевич А.В., Зарубо А.М., Коренькова О.Б.

Переработка жидких радиоактивных отходов, образующихся при электролитно-плазменной дезактивации металлических поверхностей.

V.V. Toropova, P.K. Nagula, A.V. Radkevich, A.M. Zaruba, O.B. Korenkova

Treatment of liquid radioactive waste producing in the result of metal surfaces decontamination by electrolyte-plasma processing.

124

Тюпина Е.А., Крупская В.В.

Применение бентонита в качестве буферного материала в хранилищах РАО.

E.A. Tyupina, V.V. Krupskaya

Application of bentonite as a buffer material at radioactive waste repositories.

129

Фролова Т.Н., Поникаровских Д.В., Матвеев А.Н., Ейбогина А.А.

Оценка нормируемых показателей качества водных (технологических) сред водо-водяных реакторов транспортных ядерных энергетических установок. Уменьшение образования жидких радиоактивных отходов.

T.N. Frolova, D.V. Ponikarovskih, A.N. Matveev, A.A. Eybogina

Characterization of standardized quality indicators of water (technological) mediums of water-cooled nuclear reactors. Decrease of liquid radioactive waste formation.

133

Шайдуллин С.М., Козлов П.В., Ремизов М.Б., Мелентьев А.Б., Вербицкий К.В., Бендасов Д.И.

Разработка малогабаритного плавителя с донным сливом на боросиликатном стекле в рамках создания на ФГУП «ПО МАЯК» нового комплекса остекловывания ВАО.

S.M. Shaidullin, P.V. Kozlov, M.B. Remizov, A.B. Melentyev, K.V. Verbitsky

Development of a small-size melter with a bottom drain for borosilicate glass as part of the creation of a new HLW vitrification complex at PA MAYAK FSUE.

137

- Юрченко А.Ю., Николаев А.Н., Баринов А.С.*
Мобильная установка для электрохимической дезактивации металлических поверхностей.
A.Yu. Yurchenko, A.N. Nikolaev, A.S. Barinov
Mobile facility for electro-chemical decontamination of metal surfaces. 141
- Arthur S. DiGiovine, Bob Manseill, Per Lidar.*
Studsвик's Advanced Innovations for Environmentally Safe and Efficient Waste Treatment Technologies for Decommissioning.
ДиДжиовини Артур, Мансейл Боб, Лидар Пэр
Передовые инновационные технологии Studsvik для экологически безопасного и эффективного обращения с радиоактивными отходами при выводе из эксплуатации. 145
- Jean-Michel Boniface*
CIRES, an optimized route for radioactive waste produced by decommissioning of nuclear facilities.
Бонифас Ж-М
Оптимизация схемы обращения с РАО, образующимися при выводе из эксплуатации в ПЗРО Cires. 149
- Hellenberg Timo.*
Finnish experiences in securing nuclear and radiation hazardous facilities during exceptional situations: case 2005 flooding at the Gulf of Finland.
Тимо Хелленберг
Опыт Финляндии в обеспечении безопасности ядерных и радиационно опасных объектов в исключительных ситуациях: случай наводнения 2005 года в Финском Заливе. 153

Вероятностная оценка долговременной безопасности приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов

Горбачева Н.В., Н.Д. Кузьмина, Кулич Н.В., Яцко С.Н., Корчева Ю.А.

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований — Сосны

Национальная Академия наук Беларуси

г. Минск, Беларусь

email: harbachova.nv@gmail.com

Аннотация. Данная работа посвящена развитию вероятностных методов оценки долговременной безопасности приповерхностного пункта захоронения РАО, разработке программных средств для расчета вероятностей отказа системы захоронения РАО. Для базового варианта хранилища выполнен тестовый расчет вероятностей отказов для 8 сценариев эволюции системы захоронения, показано, что наиболее уязвимым звеном системы захоронения является хранилище РАО. Оценки значимости и вкладов в надежность элементов инженерных барьеров хранилища РАО показали, что важнейшее значение для долговременной безопасности ПЗРО имеют гидроизоляция ячейки и элементы плиты основания.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, защитные барьеры, деградация, приповерхностные пункты захоронения РАО, модели надежности, логико-вероятностная модель, вероятность отказа, анализ чувствительности и значимости.

Long-term probabilistic safety assessment of the near surface disposal facility for radioactive waste

N. Harbachova, N. Kuzmina, Kulich N., S. Yatsko, J. Korchova

Joint Institute for Power and Nuclear Research — Sosny

National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Belarus

email: harbachova.nv@gmail.com

Abstract. This study is dedicated to the development of probabilistic methods for safety assessment of the near surface disposal facilities and software for calculation of failure probabilities of RW disposal system. A test calculation of failure probabilities for 8 scenarios of the disposal system evolution was performed, it was shown the radioactive waste storage facility is the most vulnerable part of the disposal system. The reliability assessments by means of sensitivity and significancy indicated that the cell waterproofing and the base plate of the RW storage facility are of crucial importance for the long-term safety of disposal facility.

Keywords: radioactive waste, near surface disposal facilities, protective barriers, degradation, reliability modes, fault-tree, fault probability, sensitivity and significancy analysis.

Введение

При создании приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) главной задачей является получение обоснованных гарантий того, что система захоронения обеспечит достаточный уровень экологической безопасности в течение нескольких сотен и даже до тысячи лет после изоляции объекта. В связи с этим, в поддержку предпроектных работ по созданию ПЗРО актуальным является научно обоснованное формирование требований к структуре, составу и качеству защитных барьеров системы захоронения, обеспечивающих за счет длительной стабильности их свойств и работоспособности конструкций приемлемый уровень защищенности окружающей среды от вредного радиационного воздействия РАО.

Общепринятой во всем мире методологией оценок долговременной безопасности приповерхностных ПЗРО является методология МАГАТЭ ISAM (Improvement of Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities) [1]. Практический опыт применения сценарного подхода ISAM [2] показал, что при имеющем место необратимом характере процессов деградации, приводящих к снижению прочностных, фильтрационных и сорбционных свойств инженерных барьеров, временные закономерности их разрушения весьма условны, а, следовательно, выводы относительно приемлемой безопасности ПЗРО не всегда достаточно обоснованы.

Ранее авторами на основе эмпирических зависимостей времени и глубины деградации стальных и бетонных контейнеров предложены модели надежности элементов инженерных барьеров, а также созданы компьютерные программы для нахождения интервалов времени, на которых инженерные барьеры с оцененной вероятностью могут не сохранять защитные свойства, и статистических характеристик, необходимых для оценки вероятностей отказов элементов системы ПЗРО [2,3]. В данной работе разработана интегральная вероятностная модель системы захоронения РАО и выполнены расчеты вероятностей отказов для различных сценариев эволюции системы.

Вероятностный подход к оценке долговременной безопасности ПЗРО

В основе метода лежит системный подход к прогнозированию эксплуатационных свойств надежности и безопасности ПЗРО, функционирование которого протекает как единая взаимосвязанная сложная система [4-5]. На данном этапе будем представлять систему ПЗРО, состоящую из трех основных функционально взаимосвязанных между собой подсистем.

Система 1 – матрица с иммобилизованными в ней РАО, отказ которой может быть предопределен процессом диффузии (элемент 1) либо процессом выщелачивания (элемент 2), размещенная в металлической бочке (элемент 3), которая помещается в железобетонный контейнер (элемент 4). Функции данной системы – препятствовать выходу из матрицы за границу системы 1. При расчете времени жизни матрицы, контролируемого диффузией (элемент 1), рассчитывается время, при котором отношение активности радионуклида, вышедшего за пределы матрицы, к начальному значению превышает заданный критерий, а для элемента 2 – интервал для возможного времени выхода радионуклида за границу матрицы за счет процесса, контролируемого выщелачиванием.

Система 2 – инженерно-строительный комплекс (хранилище РАО) ПЗРО, конструкции которого выполняют локализующие, прочностные и защитные функции на пути миграции радионуклидов из хранилища в окружающую среду, защиту матрицы РАО от проникновения в хранилище атмосферной влаги или грунтовых вод, элементами которого могут быть стены, перекрытия, основания, глиняные замки, гидроизоляция. Схема хранилища РАО представлена на рисунке 1. – *Дерево отказов хранилища РАО*. Физическим представлением отказа хранилища РАО является выход радионуклидов из хранилища в ближнюю зону.

Система 3 – геологическая среда, в которой размещено хранилище РАО, представляет естественный защитный барьер, препятствующий горизонтальной миграции радионуклидов в направлении границы санитарно-защитной зоны (элемент 1), и вертикальной миграции в направлении водоносного горизонта (элемент 2). Отказ системы 3 наступит в случае выхода радионуклидов за границу санитарно-защитной зоны, либо попадания в водоносный горизонт в результате миграции через зону аэрации.

Вероятностный подход к анализу полного набора сценариев эволюции во времени системы ПЗРО основан на построении дерева аварийных событий и деревьев отказов. Учитывая, что состояние каждого элемента, каждой системы описывается бинарным соотношением отказ-работа, множество всех последовательностей, которые могут привести к нежелательному аварийному событию, определяется числом $M=2^N$, где N – число подсистем; M – число сценариев. Множество всех сценариев обладает свойством полноты и сумма вероятностей их равна единице. Для поиска вероятностей отказов систем 1-3 использованы методы построения дерева отказов, представляющего собой логическую цепочку событий отказов элементов, соединенных логическими символами «И», «ИЛИ».

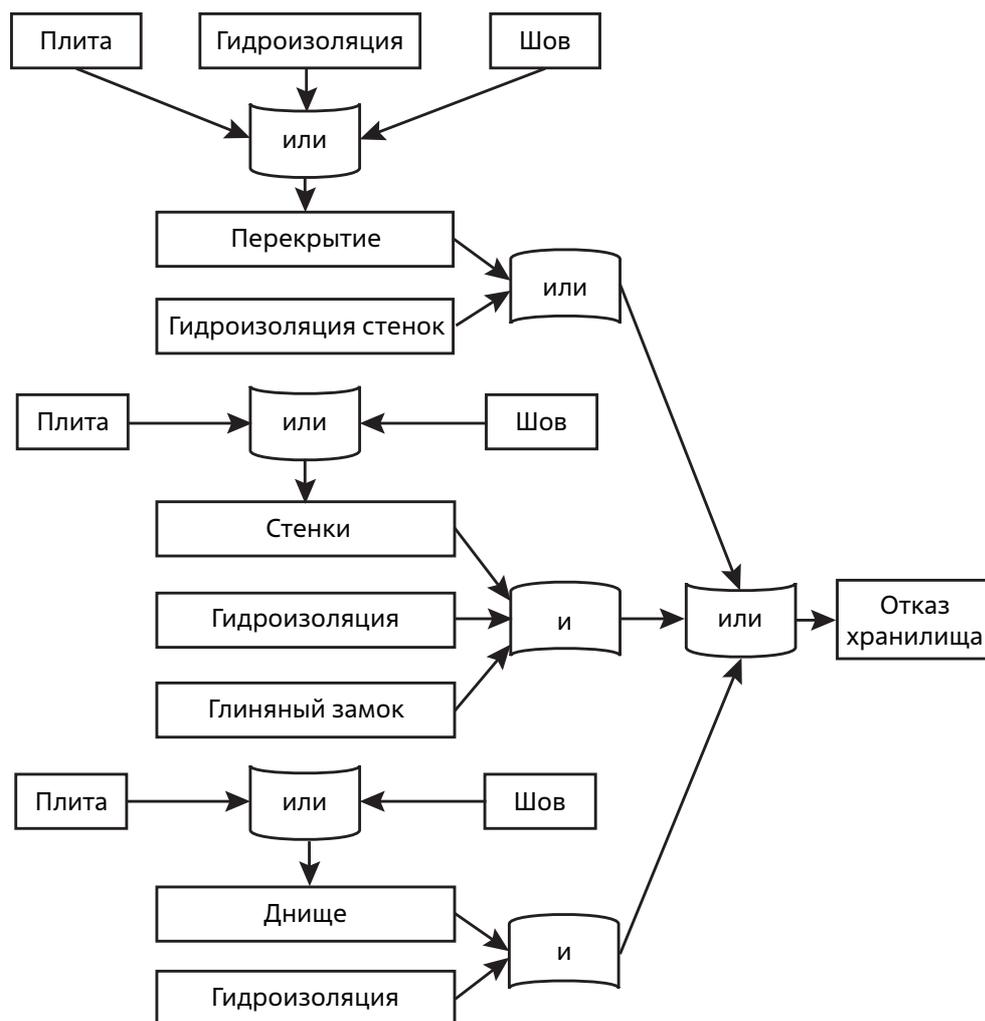


Рис. 1. Дерево отказов хранилища РАО

В качестве исходных данных для расчета вероятностей отказов элементов использованы интенсивности отказов, время после закрытия объекта.

Модели надежности систем 1–3 ПЗРО, обеспечивающие расчет плотности распределения времени транзита радионуклидов до границы защитного барьера и оценку вероятностей отказов, интегрированы в разработанную логико-вероятностную модель ПЗРО. С помощью разработанного программного комплекса Proba_3 выполнен расчет вероятностей сценариев, описывающих варианты эволюции системы захоронения РАО.

В качестве примера для иллюстрации возможностей разработанного методического подхода рассмотрена система захоронения РАО, описанная выше. В качестве источника рассматривались РАО с удельной активностью радионуклида ^{90}Sr , равной $1 \cdot 10^{10}$ Бк/м³, активность которого равномерно распределена по объему цементной матрицы. Вероятности отказов элементов системы 2 получены при нормативных интенсивностях отказов элементов перекрытия (бетонная плита – 0,02 год⁻¹, шов между плитами – 0,07 год⁻¹, гидроизоляция перекрытия – 0,02 год⁻¹), элементов основания (бетонная плита – 0,007 год⁻¹, шов между плитами – 0,02 год⁻¹, гидроизоляция основания – 0,02 год⁻¹), элементов ячейки (бетонная плита стенок – 0,02 год⁻¹, шов между плитами – 0,07 год⁻¹, гидроизоляция стенок – 0,02 год⁻¹, глиняный замок – 0,21 год⁻¹) [4]. В качестве исходных данных для оценки вероятности отказа системы 3 использованы результаты оценки интервала времени жизни естественного барьера для конкурентной площадки для размещения ПЗРО Белорусской АЭС (площадки №2), полученные с помощью компьютерной программы Unsut_Kvantil в работе [3]. Значения гидравлических параметров зоны аэрации и коэффициентов распределения представлены вероятностными функциями распределения из созданной базы данных для 12 типов грунтов и 68 основных радиационно опасных радионуклидов эксплуатационных отходов АЭС.

По результатам моделирования и оценки вероятностей отказов элементов хранилища проведено ранжирование сценариев по вкладу в вероятность отказа системы ПЗРО. На временном интервале 0–50 лет после закрытия ПЗРО в порядке убывания вероятности реализации (приведены в скобках) следуют сценарии, в которых имеют место отказ хранилища РАО (S_6 , $p=0,62$), совместный отказ матрицы с РАО и хранилища РАО (S_2 , $p=0,24$), совместный отказ хранилища РАО и зоны аэрации (S_5 , $p=0,05$), отказ матрицы с РАО (S_4 , $p=0,025$), совместный отказ всех систем 1–3 (S_1 , $p=0,02$), отказ естественного барьера (S_7 , $p=0,01$); совместный отказ матрицы с РАО и зоны аэрации S_3 (p менее $0,001$). Заметим, что сценарий №8 (S_8 , $p=0,04$) не является аварийным, так как системы 1–3 выполняют функции. Полученные оценки показали, что на временном интервале 50–300 лет после изоляции объекта наиболее вероятностными являются сценарии, связанные с отказом системы 2 (хранилище РАО). Следовательно, можно заключить, что наиболее уязвимым местом ПЗРО, как сложной системы функционально взаимосвязанных между собой объектов, являются конструкции инженерно-технического сооружения. Суммарная вероятность сценариев с отказом хранилища после закрытия объекта составляет величину 0,98, в то время как на временном интервале 0–50 лет – 0,93.

Вероятностный анализ безопасности хранилища РАО проведен с помощью стандартных процедур оценки «значимости» и «чувствительности». «Значимость» i -го элемента или отдельной конструкции в структуре системы хранилища РАО представлена в виде разности вероятностей отказа системы, полагая вероятность отказа i -го элемента, равной соответственно 1 и 0. Полная вероятность работоспособности системы, определяемая i -м элементом, является «вкладом» i -го элемента в надежность системы. «Вклад» i -го элемента в надежность системы определяется через произведение вероятности безотказной работы элемента и его «значимости».

Расчет вкладов в надежность анализируемой системы захоронения РАО элементов хранилища РАО выполнен с помощью разработанной математической программы Proba_03. Результаты анализа структурной надежности хранилища РАО методами чувствительности, значимости приведены в табл. 1. Проведенный анализ показал, что важнейшее значение в структуре хранилища РАО имеют гидроизоляция ячейки, а также элементов плиты основания.

Таблица 1

Показатели значимости, вклады в надежность, чувствительность элементов/конструкций в структуре хранилища РАО

Элемент/ конструкция	Показатель значимости элемента	Вклад в показатель значимости, %	Чувствительность вероятности отказа хранилища к отказу i -го элемента
Гидроизоляция ячейки/верх	0,662	51,0	1,649
Гидроизоляция ячейки/низ	0,454	35,0	1,587
Шов стен/ячейки	0,115	8,86	1,127
Плита стен/ячейки	0,066	5,08	1,038
Глиняный замок	0,099	9,2	1,136
Плита основания	0,119	10,8	1,031
Шов плиты	0,137	10,5	1,01
Гидроизоляция	0,193	14,8	1,545

Заключение

В данной работе выполнено развитие сценарного методического подхода ISAM МАГАТЭ, обеспечивающего вероятностный анализ долговременной безопасности ПЗРО в условиях деградации защитных барьеров. Разработана логико-вероятностная модель отказов ПЗРО, представленная деревом аварийных событий. Эволюция объекта представлена полным набором из 8 сценариев, расчет вероятностей реализации которых выполнен с помощью ПК Proba_3.

Проведенный анализ показал, что на временном интервале свыше 50 лет после закрытия объекта наибольший вклад в вероятность отказа системы ПЗРО вносят сценарии, связанные с отказом инженерных конструкций хранилища РАО.

Результаты анализа структурной надежности хранилища РАО показали, что важнейшее значение для долговременной безопасности ПЗРО имеют гидроизоляция ячейки, а также элементы плиты основания, обеспечивающие функции ограничения поступления влаги к РАО и изоляции радионуклидов.



Список литературы

1. *Safety Assessment Methodologies for Near–Surface Disposal Facilities*. Vol. 1. – Vienna: IAEA, 2004. – 413 p.
2. Оценка защитных характеристик инженерных барьеров в системе приповерхностного захоронения радиоактивных отходов / Н.М. Ширяева [и др.]. – Минск, 2016. – 64 с. – (Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ-71)
3. Ранжирование конкурентных площадок по степени влияния на защищенность и безопасность водопользования при размещении пункта захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС / Н.М. Ширяева [и др.]. – Минск, 2019. – 44 с. – (Препринт / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; ОИЭЯИ-74).
4. Пузанов, Ю.В. Рифы безопасности / Ю.В. Пузанов. – М.: Научтехлитиздат, 2010. – 68 с.
5. А.П. Белоусова [и др.] Экологическая гидрогеология: учебник для вузов. – М.: ИЦК «Академкнига», 2006. – 397 с.

УДК 621.039.743

Проблемы обеспечения радиационной безопасности при долговременном централизованном хранении радиоактивных отходов в республике Беларусь

Кузьмина Н.Д., Жемжуров М.Л.

Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси

e-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Аннотация. В данной работе изложены проблемы обеспечения радиационной безопасности при долговременном хранении радиоактивных отходов на спецпредприятии по обращению с радиоактивными отходами УП «Экорес» и предложены пути их решения.

Ключевые слова: радиационная безопасность, комплексное инженерное и радиационное обследование, хранилище РАО приповерхностного типа, извлечение РАО.

Problems of radiation safety ensuring during long-term centralized storage of radioactive waste in the Republic of Belarus

N.D. Kuzmina, M.L. Zhemzhurov

The state scientific institution «The joint institute for power and nuclear research – Sosny» of NAS of Belarus

e-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Abstract. This paper describes the problems of ensuring radiation safety during the long-term storage of radioactive waste at the special enterprise for radioactive waste management, Unitary Enterprise «Ecores», and suggests ways to solve them.

Keywords: safety, comprehensive engineering and radiation survey, near surface type radioactive waste storage, radioactive waste recovery.

Спецпредприятие по обращению с радиоактивными отходами УП «Экорес» (далее – Спецпредприятие) расположено вблизи города Минска и создано в 1963 году для обеспечения безопасной эксплуатации исследовательского реактора ИРТ-2000 бывшего Института ядерной энергетики АН БССР. В дальнейшем, являясь единственным предприятием такого рода, объект обеспечил прием широкой номенклатуры радиоактивных отходов (далее – РАО), образующихся при использовании радиоактивных изотопов на территории Республики Беларусь. Ежегодно Спецпредприятие принимает до 3 тонн твердых РАО и до 3 тыс. отработавших свой ресурс закрытых радионуклидных источников (далее – ЗРНИ), в том числе радиоизотопные извещатели дыма, калибровочные и контрольные источники для дозиметрических приборов [1].

В первоначальный период размещение РАО осуществлялось в приповерхностных хранилищах траншейного типа, а затем – в специальных сооружениях заглубленного вида, представляющих собой монолитные конструкции (резервуары) из железобетона. Размещение РАО в хранилищах производилось в упаковке производителя без предварительной сортировки и переработки. С 1997 года с целью приведения объекта в состояние, соответствующее современным требованиям безопасности, осуществлялась его реконструкция.

На текущий момент на площадке объекта расположены:

- два приповерхностных хранилища РАО заглубленного типа «первого поколения» (каньон №1 и каньон №2; эксплуатация с 1963 по 1978 гг., в 1979 законсервированы);
- два приповерхностных хранилища РАО заглубленного типа «второго поколения» (хранилище №1 и хранилище №2; подземные монолитные блоки из 8 емкостей каждый, эксплуатация с 1978 по 2013 годы, сейчас одно из них законсервировано, второе находится на стадии вывода из эксплуатации), в которых находятся четыре законсервированных хранилища колодезного типа (по 2 в каждом) для размещения отработавших свой ресурс ЗРНИ;
- хранилище отработавших ЗРНИ с 11 емкостями колодезного типа (эксплуатируется с 2003 г.);
- хранилище кондиционированных твердых РАО наземного типа (эксплуатируется с 2013 г.);
- корпус переработки РАО с лабораториями (эксплуатируется с 2013 г.).

В настоящее время введенные в эксплуатацию на Спецпредприятии новые корпус переработки РАО, хранилище кондиционированных твердых РАО наземного типа и хранилище отработавших ЗРНИ обеспечивают безопасное обращение РАО в соответствии с международными требованиями. Вместе с тем, дальнейшее хранение РАО в старых законсервированных и выводимых из эксплуатации приповерхностных хранилищах типа «Радон» Спецпредприятия может явиться причиной ухудшения радиоэкологической обстановки в регионе [2].

В связи с изложенным, планируется разработка проекта вывода из эксплуатации Спецпредприятия, что, в соответствии с современными нормативными требованиями [3], вызвало необходимость выполнения работ по комплексному инженерному и радиационному обследованию (далее – КИРО) хранилищ РАО Спецпредприятия.

В 2016 г. межведомственной рабочей группой с участием специалистов научного учреждения «ОИЭЯИ–Сосны» было разработано техническое задание на оказание услуг по КИРО законсервированных и выводимых из эксплуатации хранилищ РАО Спецпредприятия, которое утверждено решением Мингорисполкома от 25.11.2016 №3495. В соответствии с техническим заданием целью проведения КИРО являлась оценка фактического технического и радиационного состояния хранилищ и сбор необходимой информации для разработки проекта извлечения и кондиционирования РАО. Работы по КИРО были выполнены в период с августа по декабрь 2019 года АО «Логистический центр ЯТЦ» с привлечением АО «ОДЦ УТР», ООО АП «КВАРК», ФГУП «РАДОН» (РФ).

Научным учреждением «ОИЭЯИ–Сосны» НАН Беларуси осуществлялось научно-методическое сопровождение указанных работ по КИРО.

Следует отметить, что использованные при проведении КИРО радиометрические методы не позволили дать объективную оценку качественного и количественного состава РАО, содержащихся в полостях обследованных хранилищ [4]. Это обусловлено, в частности, несовершенством спектрометрических методик, не позволяющих учесть активность источников ионизирующего излучения (далее – ИИИ), заключенных в защитную упаковку. Поэтому требуемая оценка суммарной и удельной активности захороненных РАО была получена по результатам такой оценки, выполненной специалистами научного учреждения «ОИЭЯИ–Сосны» в работе [5], исходя из архивных данных о заполнении хранилищ РАО. По экспертным оценкам суммарный запас активности РАО в законсервированных и выводимых из эксплуатации хранилищах Спецпредприятия составил $1,27 \cdot 10^{16}$ Бк, около 27% из которого приходится на хранилища отработавших ЗРНИ колодезного типа.

По результатам КИРО также проведена оценка остаточных ресурсов строительных конструкций хранилищ РАО, которые составляют от 18 до 27 лет. Установлено, что монолитные железобетонные стены и дно хранилищ находятся в удовлетворительном состоянии и имеют защитное гидроизоляционное покрытие. Целостность инженерных барьеров хранилищ подтверждается результатами исследования проб подстилающих и прилегающих грунтов.

В настоящее время хранилища «первого» и «второго поколения» обеспечивают радиационную безопасность населения и окружающей среды, так как строительные конструкции и инженерные барьеры хранилища обладают достаточным ресурсом надежности для предотвращения миграции радионуклидов в окружающую среду.

На ближайший период (в пределах остаточного ресурса строительных конструкций хранилищ 18-27 лет) существенного изменения радиационной обстановки в хранилищах РАО и в близлежащей к ним зоне, которое может повлиять на дозовые нагрузки на персонал, население и безопасность окружающей среды, не прогнозируется. При этом можно ожидать незначительное расширение ареалов распространения $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Po}$, а также ^3H , ^{14}C и ^{90}Sr рядом с местами их локализации в пристеночных участках внутри хранилищ РАО. За указанный период, в соответствии с требованиями нормативных документов, должен быть разработан проект вывода хранилищ РАО из эксплуатации и проведены соответствующие мероприятия по подготовке к началу реализации проекта; подготовлены необходимые ресурсы [4].

В качестве прогноза на долгосрочный период в Техническом отчете по результатам КИРО [4] был использован прогнозный расчет оценки безопасности, выполненный специалистами научного учреждения «ОИЭЯИ-Сосны» для консервативного сценария (наиболее быстрой миграции радионуклидов из системы захоронения в окружающую геосферу и потенциально в источники водоснабжения при полной деградации барьеров) [5]. Указанные консервативные оценки показали, что в рассматриваемых объектах хранения РАО (хранилища «первого» и «второго поколения») в результате миграционных процессов через 100 лет после их консервации активность из хранилищ может поступить в зону аэрации, и тогда сама зона аэрации станет источником радиоактивного загрязнения воды, и реабилитировать загрязненную область будет весьма проблематично.

Проведенное КИРО является одним из основных этапов подготовки к выводу из эксплуатации Спецпредприятия, позволяющим объективно оценить текущий уровень безопасности «исторических» хранилищ РАО. Результаты КИРО станут информационной основой для разработки проектной документации вывода из эксплуатации Спецпредприятия, в том числе проекта технологии извлечения РАО из хранилищ, и обоснования безопасности планируемой деятельности по реализации этих проектов.

Разработка технологий извлечения и переработки РАО из хранилищ Спецпредприятия усложняется необходимостью проведения работ в напряженных радиационных условиях при обращении с самой разнообразной номенклатурой радиоактивных веществ, представляющих собой конгломерат из различных материалов (пластмасса, стекло, металл, ветошь и т.д.), загрязненных как короткоживущими, так и долгоживущими радионуклидами, включая закрытые источники гамма- и нейтронного излучения, радиоизотопные извещатели дыма, содержащие ^{239}Pu , соли ^{226}Ra и т.д.

Предполагается, что ожидаемые реальные уровни мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (далее – МЭД) в ходе работ по извлечению РАО из хранилищ Спецпредприятия в основном будут лежать в диапазоне 1 мкЗв/ч – 1 мЗв/ч и сопоставимы с таковыми для хранилища РАО ядерной установки в г. Палдиски, Эстония, а учитывая отсутствие высокоактивных реакторных стержней и открытых ИИИ, могут быть существенно ниже [6]. Поэтому при разработке концептуальных решений по технологиям извлечения РАО авторами была принята аналогичная использованной в Палдиски схема организации работ. Данный подход включает в себя проведение периодического дистанционного радиационного мониторинга «вскрытой» поверхности РАО в ячейке хранилища с целью определения радиационных полей и обнаружения высокоактивных ИИИ, их извлечение с использованием дистанционно управляемых механизмов (например, небольшого крана-манипулятора «Palfinger», робототехнических средств «Brokk») и системы видеонаблюдения, и извлечение РАО «вручную» при достижении приемлемых (ниже установленных пороговых) уровней МЭД.

С точки зрения дальнейшего обращения с РАО и обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении, их необходимо разделить на классы 1-4 в соответствии с документом [7]. При извлечении РАО из хранилищ Спецпредприятия будут образовываться все возможные категории РАО: очень низкоактивные (ОНАО), низкоактивные (НАО), среднеактивные (САО) и высокоактивные (ВАО) [4]. По экспертной оценке, распределение объемов РАО, размещенных в обследованных хранилищах Спецпредприятия по категориям можно оценить следующим образом: для каньона №1 (ОНАО – 60 ÷ 65 %; НАО – 30 ÷ 35%; САО – 5 ÷ 10%); для каньона №2 (ОНАО – 80 ÷ 85%; НАО – 10 ÷ 15%; САО – 5 ÷ 7%); для хранилища №1 (ОНАО – 70 ÷ 75 %; НАО – 20 ÷ 25%; САО – 5 ÷ 7%; ВАО – менее 1%); для хранилища №2 (ОНАО – 60 ÷ 70 %; НАО – 30 ÷ 35%; САО – 5 ÷ 10%; ВАО – 1 ÷ 2%); для хранилищ отработавших ЗРНИ: (инв. №№369,423, 424 ВАО – 100%), (инв. №422 САО – 100%).

При извлечении РАО из ячеек хранилищ сортировку рекомендуется производить с учетом морфологических признаков по следующим основным потокам: а) радиоизотопные приборы – подлежат цементированию в бочках при соблюдении предельных значений по активности на упаковку; б) отработавшие ИИИ – подлежат идентификации и перегрузке в контейнеры с донной разгрузкой с последующим помещением в хранилища отработавших ЗРНИ колодезного типа, либо, при невозможности таковой, кондиционированию в бочках при соблюдении предельных значений по активности на упаковку; в) металлические отходы – подлежат фрагментации и цементированию в бочках; г) прессуемые отходы – подлежат прессованию и цементированию в бочках.

Первичная категоризация РАО и выявление точечных ИИИ, локальных участков с повышенным загрязнением радиоактивными веществами должна производиться локально в хранилище в зоне работы с РАО с помощью дистанционно-управляемого инструмента, снабженного техническим зрением, коллимированными датчиками контроля радиационных параметров среды.

Наиболее трудноразрешимой задачей являются технологии извлечения из четырех хранилищ колодезного типа, размещенных в хранилищах «второго поколения» Спецпредприятия. Отдельные проектные решения потребуются для дальнейшего обращения с корпусом ядерного реактора АЭС «Памир-630Д», гамма-установки «Ставрида» и других крупногабаритных РАО, для кондиционирования которых неприменимы унифицированные контейнеры типа КМЗ или НЗК. Также перед началом проведения работ по выгрузке РАО рекомендуется проведение научно-исследовательских работ для обоснования проектных решений по обнаружению, безопасной локализации, извлечению и кондиционированию источников загрязнения ^{222}Rn (барботеров с остатками радиевой соли, светосоставов и т.д.) и его дочерними продуктами (изотопами $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Bi}/^{210}\text{Po}$), что позволит значительно снизить ингаляционные дозовые нагрузки на персонал.

Рекомендуемым вариантом вывода из эксплуатации Спецпредприятия является вариант его отложенной ликвидации, который предполагает, что имеются отклонения от проектных решений и требований нормативных правовых актов, при этом хранилища РАО находятся в удовлетворительном состоянии и обеспечат радиационную безопасность населения и окружающей среды в краткосрочной перспективе. При этом, для обеспечения радиационной безопасности хранилищ РАО в среднесрочной перспективе, необходимо разработать и осуществить комплекс мероприятий по укреплению, замене и ремонту инженерных конструкций и оборудованию хранилищ, обеспечивающих дополнительную защиту размещенных в хранилище РАО от контакта с водой, воздействия отрицательных температур и других потенциально опасных факторов, а также совершенствованию системы радиационного мониторинга.

После проведения комплекса мероприятий по извлечению, сортировке, переупаковке, кондиционированию и классификации твердых РАО и отработавших ИИИ потенциально существует возможность использовать конструкции хранилищ «второго поколения» для упорядоченного хранения РАО и ИИИ в контейнерах до момента отправки для размещения на объект окончательного удаления РАО. В этом случае необходима разработка проекта, включающего дооснащение и замену технологического оборудования, коммуникаций, инженерных сетей, установку дополнительных инженерных барьеров (внутренние – из нержавеющей стали, внешние – из слабопроницаемых грунтов с добавкой сорбентов).

Решение о концепции использования и окончательном выводе хранилищ Спецпредприятия из эксплуатации имеет комплексный характер и должно быть увязано с мероприятиями в рамках Стратегии по обращению с РАО в Республике Беларусь.

Список литературы

1. Шестой национальный доклад Республики Беларусь О выполнении объединённой конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами – Минск, 2017. – 89 л.
2. Жемжуров М.Л. Республиканский пункт захоронения радиоактивных отходов: состояние и перспективы / М.Л. Жемжуров, В.В. Скурат. // Международная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.В. Тимофеева-Ресовского: материалы междунар. конф, Минск, 17-18 октября 2000 г. / МЭУ им. А.Д. Сахарова. – С. 18-20.
3. Требования к обеспечению безопасности при выводе из эксплуатации пунктов хранения радиоактивных отходов: утв. Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 22.02.2019 №25.
4. Технический отчет по результатам комплексного инженерного и радиационного обследования законсервированных и выводимых из эксплуатации хранилищ радиоактивных отходов УП «Экорес» / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», АО «Логистический центр ЯТЦ». – Москва, 2019. – 469 л.
5. Отчет по обоснованию безопасности объекта «специализированное предприятие по обращению с радиоактивными отходами УП «Экорес» / Коммунальное унитарное предприятие по обращению с отходами «Экорес». – Минск, 2013. – 273 с.
6. Жемжуров М.Л. Проблемы организации радиационного мониторинга и дозиметрического контроля в ходе планируемых работ по извлечению твердых РАО из республиканского ПЗРО // В сб.: Материалы III международного симпозиума «Актуальные проблемы дозиметрии», 2001.– Минск, 2001. – С. 160-163.
7. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения: утв. Постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 28 сентября 2010 г. №47 (в редакции от 24.07.2017 №33).