



УДК 621.039.58

ОЦЕНКА ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, СОЗДАВАЕМОГО ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО УРАН-ГРАФИТОВОГО РЕАКТОРА

Талицкая А.В. (avtalitskaya@norao.ru) (ФГУП «НО РАО»),
Захарова Е.В., к.х.н. (zakharova@ipc.rssi.ru),
Андрющенко Н.Д. (nataliarchem@gmail.com) (ИФХЭ РАН),
Бочкарев В.В. (bochkarev@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

В статье приводятся основные результаты оценки долговременной безопасности объекта окончательной изоляции РАО, создаваемого при выводе из эксплуатации промышленного уран-графитового реактора на месте его размещения. Описана методика проведения оценки долговременной безопасности, ее основные этапы и результаты проведения прогнозных расчетов.

► **Ключевые слова:** промышленный уран-графитовый реактор, вывод из эксплуатации, оценка долговременной безопасности.

LONG-TERM SAFETY ASSESSMENT OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITY FORMED DURING DECOMMISSIONING URANIUM-GRAPHITE PRODUCTION REACTOR

Talitskaya A. (NO RWM), Zaharova E., Ph. D.,
Andruschenko N. (IPCE), Bochkarev V. (SEC NRS)

The paper presents the main results of the long-term safety assessment of the Radioactive Waste Disposal Facility formed during Decommissioning Uranium-Graphite Production Reactor at the site of its location. The methodology of the long-term safety assessment, its main stages and the results of the estimates are described.

► **Key words:** uranium-graphite production reactor, decommissioning, Long-term Safety Assessment.

В настоящее время на предприятиях Госкорпорации «Росатом» остановлено, но не выведено из эксплуатации более 120 ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО), число которых в дальнейшем будет только увеличиваться [1]. К остановленным для вывода из эксплуатации ЯРОО относятся 13 промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР), размещенных на трех площадках (ОАО «Сибирский химический комбинат», ФГУП «Горно-химический комбинат» и ФГУП «Производственное объединение «Маяк»), предназначавшихся во время эксплуатации для наработки плутония. Все ПУГР после останова и приведения в ядерно-безопасное состояние подлежат выводу из эксплуатации. Вывод из эксплуатации ПУГР отличается определенной спецификой и требует особого подхода, поскольку для реакторных установок первого поколения при проектировании и строительстве не предусматривались технические решения по выводу их из эксплуатации, а обеспечение безопасного вывода из эксплуатации реакторов в значительной степени определяется особенностями конструкции, размещения и эксплуатации, присущими ПУГР. Ранее, в одобренной в 2004 г. Концепции вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов в качестве базового варианта предусматривалось долговременное хранение в пределах шахты на срок не менее 100 лет. В 2009 г. эта концепция была пересмотрена и одобрена новая Концепция вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов по варианту безопасного захоронения на месте, которая в качестве базового варианта предусматривает создание объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов (РАО) [2]. Выбор такого варианта вывода из эксплуатации должен проводиться с учетом не только экономических и социальных факторов, но и, в первую очередь, на основании прогнозной оценки долговременной безопасности объекта окончательной изоляции РАО [3]. При этом должны рассматриваться характерные для района размещения ПУГР явления, процессы и факторы природного и техногенного происхождения, а также геолого-гидрогеологические, топографические, гидрографические, инженерно-геологические, сейсмические, тектонические и климатические условия [4, 5]. На создаваемый объект будут распространяться требования федеральных норм и правил, регламентирующих захоронение РАО. Безопасность пунктов приповерхностного захоронения РАО (ППЗРО) должна обеспечиваться в течение всего периода потенциальной опасности

размещенных РАО, что необходимо обосновать в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, с учетом результатов оценки долговременной безопасности [9, 10, 11].

Прогноз долговременной безопасности создаваемого ППЗРО выполняется для оценки его радиационного воздействия на население после закрытия в период потенциальной опасности захороненных РАО, с учетом подходов к расчетному периоду обоснования, изложенных в [6], и специфики радионуклидного состава РАО ПУГР. Данная оценка необходима для обоснования соответствия создаваемого ППЗРО критериям, принципам и требованиям безопасности, установленным нормативными правовыми актами в области использования атомной энергии.

В соответствии с [7], при проведении оценки долговременной безопасности ППЗРО выделяются следующие основные этапы:

- разработка основных положений (включая цель проведения оценки безопасности, определенные критерии и показатели безопасности);
- сбор и подготовка исходных данных;
- разработка и обоснование сценариев эволюции системы захоронения РАО, миграции радионуклидов в окружающей среде и воздействия на человека и окружающую среду;
- разработка и обоснование концептуальных и математических моделей и их реализация с помощью программных средств;
- проведение прогнозных расчетов распространения радионуклидов в окружающей среде и оценка радиационного воздействия на население и окружающую среду;
- анализ неопределенностей и погрешностей результатов расчетов;
- представление и анализ результатов оценки безопасности, сравнение их с установленными критериями и показателями безопасности ППЗРО.

Оценка долговременной безопасности выполняется с использованием итерационного подхода, блок-схема которого приведена на рис. 1. Итерационный подход подразумевает проведение повторной оценки с целью уточнения результата по мере накопления и конкретизации исходных данных об объекте, уточнения сценариев поведения системы захоронения, усовершенствования разработанных моделей.

Результат оценки долговременной безопасности всегда сопряжен с неопределенностями, имеющими различные источники происхождения.

Основные подходы к созданию модельно-независимых средств для анализа чувствительности расчетных моделей к изменению их параметров и оценке неопределенности результатов расчетно-прогностического моделирования подробно рассмотрены в [8].

Авторами выполнены оценки долговременной безопасности объектов окончательной изоляции РАО, создаваемых при выводе из эксплуатации ПУГР по варианту безопасного захоронения на месте, на основе представленной выше методики с применением итерационного подхода. На каждой из последующих итераций по результатам анализа чувствительности модели уточнялись значения исходных данных для некоторых параметров, тем самым уменьшался консерватизм полученных результатов.

В качестве исходных данных, описывающих территорию размещения ПУГР, принимались реальные значения, в том числе данные многолетних

измерений уровня подземных вод. Учитывалось наличие двух инженерных барьеров безопасности: существующего (из железобетонных конструкций) и сооружаемого (из измельченной глины путем максимального заполнения свободного пространства барьерным материалом в шахте реактора и приреакторных помещениях).

В соответствии с методологией проведения оценки долговременной безопасности были разработаны так называемые сценарий нормальной эволюции и альтернативные сценарии. Под сценарием понимают одну из возможных в течение жизненного цикла ППЗРО последовательностей логически связанных между собой событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения и физико-химических процессов, определяющих эволюцию системы захоронения, характеристики миграции радионуклидов из ППЗРО в окружающую среду и потенциальные уровни облучения человека.

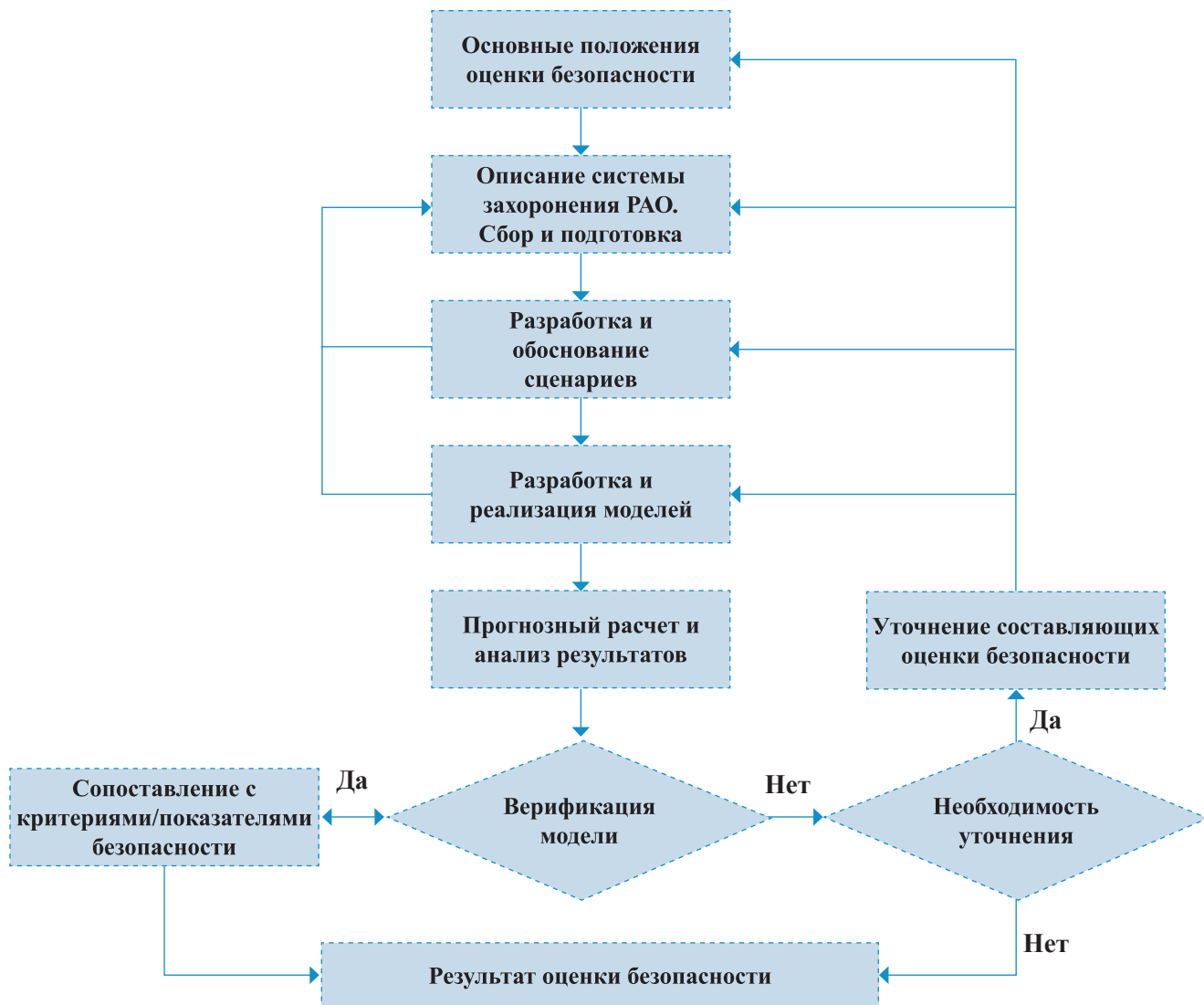


Рис. 1. Блок-схема итерационного подхода к оценке долговременной безопасности

Далее описаны общие подходы к формированию сценариев, имеющих существенные отличия, обусловленные спецификой расположения ПУГР.

В сценарии нормальной эволюции рассматривалась следующая цепочка поступления радионуклидов из ПУГР в окружающую среду. В процессе эксплуатации ПУГР, в том числе после останова для вывода из эксплуатации до заполнения свободных полостей природным материалом (глиной), учитываются процессы выхода радионуклидов вследствие коррозии алюминиевых деталей и выщелачивания радионуклидов из облученного графита. Вышедшие радионуклиды начинают диффундировать через инженерный барьер (железобетон) в геосферу за счет наличия влаги. При этом предполагается, что бетон не меняет своих прочностных и фильтрационных свойств на протяжении первых 100 лет после завершения строительства. По данным [12] в приповерхностном слое (первые 20 – 50 м от поверхности земли) через 100 лет начинается постепенная деградация бетона и к 300 годам с момента начала эксплуатации коэффициент фильтрации бетона примерно соответствует коэффициенту фильтрации песка. В период времени от 100 до 300 лет миграция радионуклидов через бетон возможна за счет процессов диффузии и фильтрации, свыше 300 лет она определяется преимущественно фильтрацией. Миграция радионуклидов через глиняный барьер безопасности после его создания определяется процессом

диффузии. После выхода за пределы барьеров безопасности ПУГР радионуклиды попадают в ненасыщенную зону и далее в водоносный горизонт, где перемещаются с потоком подземных вод в сторону дрены. Миграция радионуклидов в водоносном горизонте осуществляется путем их распространения с подземными водами. При этом учитывалась задержка радионуклидов вмещающими породами и продольная дисперсия за счет неоднородности порового пространства. Поперечная дисперсия не учитывалась, что добавило консерватизм в результаты прогнозных расчетов.

Для рассмотрения возможных последствий от событий, которые могут вызвать значительные отклонения от сценария нормальной эволюции, в том числе ускорить выход радионуклидов из пунктов захоронения, разрабатываются так называемые альтернативные сценарии. В ходе обоснования выбора альтернативных сценариев были проанализированы требования федеральных норм и правил [9, 13]. На их основе разработаны следующие альтернативные сценарии:

- частичное разрушение железобетонного и глиняного инженерных барьеров безопасности ПУГР за счет возможных внутренних и внешних воздействий;
- поднятие уровня грунтовых вод в районе расположения ПУГР.

На рис. 2 приведена концептуальная модель для разработанных сценариев.

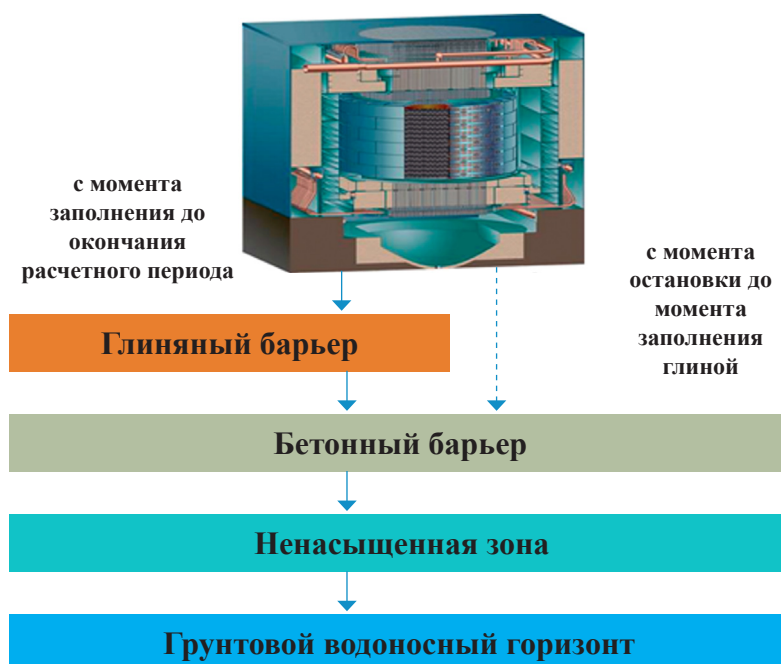


Рис. 2. Концептуальная модель

Для прогнозных расчетов поступления радионуклидов из ПУГР в окружающую среду, их накопления и перераспределения применялся метод конечных объемов (МКО) [14], реализуемый на программе Ecologo [15].

Для определения параметров модели, наибольшим образом влияющих на конечный результат оценки долговременной безопасности, проводился анализ чувствительности модели. Значения параметров, влияющих в большей степени, уточнялись путем проведения лабораторных исследований. Далее проводились расчеты на разработанной модели с уточненными исходными значениями параметров.

В ходе оценки долговременной безопасности были проведены три итерации оценки долговременной безопасности. Параметры, уточненные на каждой из них, приведены в таблице.

Результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными на программе ModFlow [19]. Сравнение показало близость полученных результатов.

По результатам оценки долговременной безопасности при нормальном и альтернативном сценариях не прогнозируется превышение уровня вмешательства [20] продуктов активации, деления и актинидов, находящихся в облученном графите ПУГР, на расчетный период моделирования (10000 лет) в месте разгрузки водоносного горизонта в дренаж.

Полученные результаты могут быть использованы для оценок радиационного воздействия объектов окончательной изоляции РАО, создаваемых при выводе из эксплуатации ПУГР по варианту безопасного захоронения на месте, на население и окружающую среду. Кроме того, полученные результаты можно использовать при оценке долговременной безопасности групп объектов окончательной изоляции РАО, то есть совокупности всех ПУГР, выведенных из эксплуатации, в границах каждого комбината и других объектов захоронения, уже существующих или планируемых в районе размещения ПУГР.

Параметры, уточняемые в рамках итераций оценки безопасности

Итерация	Содержание радионуклидов в графите	Скорость выщелачивания из графита	Содержание ^{14}C и ^{36}Cl в мобильной форме	Коэффициенты распределения в инженерных барьерах безопасности
1	Реальные значения*	-	-	Литературные данные [16]
2	Реальные значения*	-	-	Реальные значения*
3	Реальные значения*	Реальные значения*	Реальные значения*	Реальные значения*

*Значения, полученные в ходе лабораторных исследований [17, 18].

Список литературы

1. Концепция вывода из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.decomatom.org.ru/documents/concept_rosatom_rus.pdf.
2. Проблемы ядерного наследия и пути их решения // Т. 2. Развитие системы обращения с радиоактивными отходами в России. Под общей редакцией Большова Л. А., Лаврова Н. П., Линге И. И. — М., 2013.
3. On-site disposal as a decommissioning strategy. IAEA-TECDOC-1124. – IAEA, 1999.
4. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Volume 1. Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. – IAEA, 2004.
5. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Volume 2. Test cases. – IAEA, 2004.
6. Развитие подходов к обоснованию отнесения РАО к особым РАО // Препринт ИБРАЭ РАН. № ИБРАЭ-2014-06. – М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2014.
7. Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов: РБ-117-16 : утв. Ростехнадзором 14 декабря 2016 г. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ».
8. Савельева Е. А. Концепция программного комплекса для оценки неопределенности при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО // Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – № 4 (82).

9. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности : НП-055-14: утв. Ростехнадзором 22 августа 2014 г. : введ. с 14 февраля 2015 г. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ».
10. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения : НП-058-14: утв. Ростехнадзором 05 августа 2014 г. : введ. с 17 февраля 2015 г. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ».
11. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности : НП-069-14: утв. Ростехнадзором 6 июня 2014 г. : введ. с 28 ноября 2014 г. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ».
12. Coordinated Research Program on the Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities. Specification for Test Case 2c // IAEA, NSARS, 1995.
13. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии : НП-064-05: утв. Ростехнадзором 20 декабря 2005 г. : введ. с 1 мая 2006 г. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ».
14. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities // Vol. 1 and 2. – Vienna: IAEA, 2004.
15. Ecolego 3 // User Guide. – Bromma: Facilia, 2007.
16. Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jnc.go.jp/kaihatu/tisou/zh12>.
17. Гаврилов П. М., Устинов А. А., Сиренко А. Г., Антоненко М. В., Жирников Д. В., Захарова Е. В. Обоснование вывода из эксплуатации ПУГР ФГУП «ГХК» по варианту захоронения на месте [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/presentations/30266>.
18. Измestьев А. М. Опыт работы АО «ОДЦ УГР» по выводу из эксплуатации уран-графитовых реакторов // Презентация на «Атомэкспо-2015» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Izmestiev.pdf>.
19. McDonald M. G., Harbaugh A. W. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model: US Geological survey, Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, 1988.
20. Санитарные правила и нормативы. Нормы радиационной безопасности: НРБ-99/2010. СанПиН 2.6.1.2523-09.

References

1. The concept of nuclear facilities, radiation sources and storage facilities decommissioning [Electronic source]. – Access mode: http://www.decomatom.org.ru/documents/concept_rosatom_rus.pdf.
2. Nuclear legacy issues and their solutions // Vol. 2. Development of RW management system in Russia. Under general editorship of Bolshov L. A., Laverov N. P., Linge I. I. — М., 2013.
3. On-site disposal as a decommissioning strategy. IAEA-TECDOC-1124. – IAEA, 1999.
4. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Volume 1. Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. – IAEA, 2004.
5. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Volume 2. Test cases. – IAEA, 2004.
6. Development of approaches to justify RW categorization as special RW // Preprint IBRAE RAS. № IBRAE-2014-06. – М.: Nuclear safety institute of the Russian Academy of Sciences, 2014.
7. Assessment of the long-term safety of RW near-surface disposal facilities: RB-117-16 : approved by Rostechнадzor in December 14, 2016 – М.: SEC NRS.
8. Saveljeva E. A. The concept of a software system to assess uncertainty in the course of RW disposal facilities safety demonstration // Nuclear and radiation safety. – 2016. – № 4 (82).
9. Disposal of Radioactive Waste. Principles, Criteria and General Safety Requirements.: NP-055-14: approved by Rostechнадzor in August 22, 2014: introduced into force in February 14, 2015. – М.: SEC NRS.
10. Safety in Radioactive Waste Management. General Provisions.: NP-058-14: approved by Rostechнадzor in August 05, 2014 : introduced into force in February 17, 2015 – М.: SEC NRS.
11. Near-Surface Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements.: NP-069-14: approved by Rostechнадzor in June 6, 2014: introduced into force in November 28, 2014 – М.: SEC NRS.
12. Coordinated Research Program on the Safety Assessment of Near Surface Radioactive Waste Disposal Facilities. Specification for Test Case 2c // IAEA, NSARS, 1995.
13. Accounting of External Natural and Man-Induced Impacts on Nuclear Facilities.: NP-064-05: approved by Rostechнадzor in December 20, 2005 : introduced into force in May 1, 2006 – М.: SEC NRS.
14. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities // Vol. 1 and 2. – Vienna: IAEA, 2004.

15. Ecolego 3 // User Guide. – Bromma: Facilia, 2007.

16. Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan [Electronic source]. – Access mode: <http://www.jnc.go.jp/kaihatu/tisou/zh12>.

17. Gavrilov P. M., Ustinov A. A., Sirenko A. G., Antonenko M. V., Zhirnikov D.V., Zakharova E. V. “Demonstration of FSUE «MCC» uranium-graphite production reactor decommissioning (option ‘disposal in-situ’)” [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.atomic-energy.ru/presentations/30266>.

18. Izmetstjev A. M. “Experience accumulated by “PDC UGR” JSC on uranium-graphite reactors decommissioning”// Presentation to «Atomexpo-2015» [Electronic source]. – Access mode: <http://2015.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/6/Izmetstjev.pdf>.

19. McDonald M. G., Harbaugh A. W. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model: US Geological survey, Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, 1988.

20. Sanitary rules and standards. Radiation safety norms: NRB-99/2010. SanPiN 2.6.1.2523-09.

