

Ж. С. Ажажа, Л. Н. Ледовская,
А. В. Пилипенко, С. Ю. Саенко,
Г. А. Холомеев

ННЦ «Харьковский физико-технический институт»
НАН Украины, г. Харьков, Украина

Теплофизические аспекты выбора параметров глубинного хранилища высокоактивных отходов и отработанного ядерного топлива

Для определения параметров глубинного хранилища радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива разработана математическая модель теплофизических процессов, протекающих в канистрах, туннелях и вмещающем гранитном массиве. Выбрана схема геологического хранилища и рассчитаны его параметры.

Ключевые слова: мощность остаточного энерговыделения, буферный слой бентонитовой глины, математическое моделирование, тепловой режим глубинного хранилища.

**Ж. С. Ажажа, Л. М. Ледовська, О. В. Пилипенко,
С. Ю. Саенко, Г. О. Холомєєв**

Теплофізичні аспекти вибору параметрів глибинного сховища високоактивних відходів та відпрацьованого ядерного палива

Для визначення параметрів глибинного сховища радіоактивних відходів і відпрацьованого ядерного палива розроблено математичну модель теплофізичних процесів, що протікають у канистрах, тунелях та в гранітному масиві, що вміщує сховище. Вибрано схему геологічного сховища й розраховано його параметри.

Ключові слова: потужність залишкового енерговиділення, буферний шар бентонітової глини, математичне моделювання, тепловий режим глибинного сховища.

© Ж. С. Ажажа, Л. Н. Ледовская, А. В. Пилипенко, С. Ю. Саенко,
Г. А. Холомеев, 2011

Развитие мировой атомной энергетики породило глобальную проблему накопления значительных количеств отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), которые образуются при функционировании АЭС. В настоящее время среди стран, развивающих атомную энергетику, существует два основных направления в сфере обращения с ОЯТ: его прямое захоронение в глубинные геологические формации после промежуточной выдержки в поверхностных хранилищах и переработка ОЯТ с захоронением высокоактивных отходов. Некоторые страны еще не выбрали окончательно путь решения данной проблемы. Интересно отметить, что США, ранее декларировав принцип захоронения ОЯТ энергетических реакторов в Юкка Маунтин без переработки, теперь объявили о разработке технологий нового топливного цикла («Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI)» [1]), которые направлены на минимизацию количества отходов, подлежащих захоронению, на выделение долгоживущих и среднеживущих РАО с последующей их трансмутацией и на рециклирование урана и плутония.

Украина имеет значительные запасы урановых руд и является одной из ведущих стран мира по их добыче и переработке, а также по производству электроэнергии на АЭС. В связи с этой проблемой накопления РАО и ОЯТ стоят перед Украиной чрезвычайно остро. Обращение с ОЯТ украинских АЭС традиционно включает два основных этапа: временное хранение в приреакторных бассейнах и отправку ОЯТ реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 на химическую переработку в Россию. После этого остеклованные высокоактивные отходы (ВАО) от переработки ОЯТ будут переданы Украине на хранение и захоронение. Отработанное топливо РБМК и часть топлива ВВЭР-1000 предполагается подвергнуть длительному промежуточному хранению в сухих хранилищах наземного размещения в зоне Чернобыльской АЭС и на площадке Запорожской АЭС, соответственно.

Общепризнанная концепция безопасного захоронения ВАО в геологические формации основана на принципе многобарьерной защиты, которая предполагает наличие на пути миграции радионуклидов нескольких искусственных барьеров (твердая матрица, стенка канистры и буферный материал, например уплотненная бентонитовая глина) и естественного барьера — геологической среды, вмещающей хранилище.

ВАО и ОЯТ, обладая остаточным энерговыделением, оказывают при захоронении радиационное и тепловое воздействие на материалы инженерных сооружений и на горные породы вмещающего геологического массива. Ограничение температуры эксплуатации бентонитовой глины в качестве гидроизолирующего материала приводит к ограничению допустимой плотности расстановки канистр с ядерными материалами в геологическом хранилище. В связи с этим для прогнозирования теплового режима подземных инженерных сооружений и оптимизации параметров глубинного геологического хранилища ВАО и ОЯТ, которые будут накоплены в Украине к 2050 г., выполнено математическое моделирование теплофизических процессов и проведены предварительные компьютерные расчеты некоторых параметров хранилища, обеспечивающих допустимый уровень температур. Основной целью теплового расчета является определение оптимальной плотности размещения канистр с ОЯТ и ВАО в хранилище (из условия предотвращения перегрева материалов), а также необходимой общей длины тоннелей хранения и размеров хранилища.

В качестве исходных данных для расчета приняты параметры проекта глубинного хранилища ВАО и ОЯТ Украины, предложенного для сооружения в зоне отчуждения ЧАЭС [2], [3]. Рассматриваемый проект предполагает размещение канистр на глубине около 500 м в горизонтальных выработках, пройденных невзрывным механизированным способом с помощью машин горизонтального бурения (рис. 1).

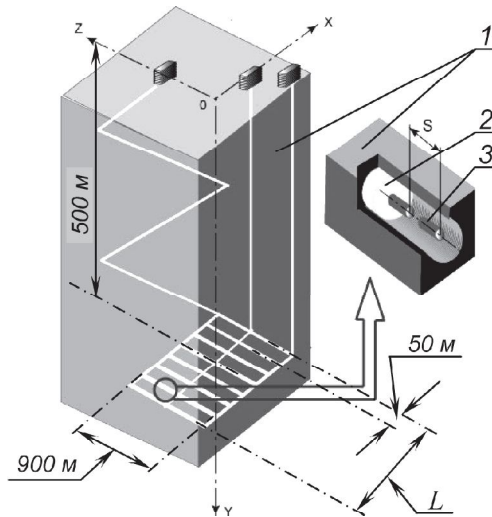


Рис. 1. Схема глубинного хранилища, используемая в расчетах:

1 — гранитный массив; 2 — буферный материал (уплотненная бентонитовая глина); 3 — канистра; s — шаг размещения канистр в тоннеле; L — длина хранилища

Состав и основные параметры хранилища [2]: наклонный съезд длиной 3,5 км (уклон 1:7); главный транспортный тоннель диаметром 5,5 м, длиной около 900 м;

два транспортных тоннеля для бурения из них горизонтальных тоннелей, в которых будут захоронены канистры с ВАО и ОЯТ;

перегрузочный тоннель диаметром 5,5 м для перегрузки канистр на специальную тележку для перемещения их в тоннелях захоронения;

система параллельных тоннелей захоронения (диаметр 2,4 м), расположенных на расстоянии 50–120 м друг от друга, в зависимости от остаточного тепловыделения отходов.

На основе литературных данных принято, что:

к 2046 г. в Украине будет наработано ОЯТ реакторов ВВЭР-440 в количестве 935 т (U); ВВЭР-1000 — 10711 т (U); РБМК-1000 — 2447 т (U)[4];

после переработки 1 т ОЯТ образуется 400 л остеклованных ВАО [5];

из топлива в ВАО переходят все продукты деления (за исключением частично йода) и не более 1 % урана, плутония и йода [6];

радионуклидный состав и изменение мощности остаточного энерговыделения (МОЭ) ОЯТ и ВАО рассчитываются исходя из исходных радионуклидных составов ОЯТ на момент выдержки 10 лет [7], а также известных цепочек и энергетических спектров α -, β - и γ -распада радионуклидов [8];

уплотненная бентонитовая глина при разогреве выше 120 °С теряет свои гидроизоляционные свойства, поскольку из бентонита удаляется до 90 % связанной воды и буферный слой перестает служить гидравлическим барьером [9].

На разогрев материалов и элементов хранилища влияют следующие факторы:

выгорание топлива;

время выдержки топлива после извлечения из реактора до размещения в хранилище;

количество ВАО и ОЯТ в канистрах;

плотность расстановки канистр в хранилище;

размеры хранилища;

теплофизические свойства материалов.

В данной работе рассматривается вариант неветилируемого глубинного хранилища, т. е. все тепло остаточного энерговыделения ОЯТ сбрасывается в окружающий геологический массив. При этом плотность теплового контакта между канистрами и геологической средой будет обеспечена буферным слоем, в котором, вследствие набухания бентонита при пропитке его водой, возникает значительное внутреннее давление.

Для прогнозирования динамики теплового режима хранилища и вмещающего геологического массива авторами разработана математическая модель, основанная на решении численными методами [10] двух типов дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности:

1) уравнения в прямоугольных координатах — для моделирования температурного режима вмещающего гранитного массива в целом;

2) уравнения в цилиндрических координатах — для определения теплового режима «ближнего поля» хранилища (в канистрах, буферном слое и в прилегающих к тоннелям слоях гранита).

Первое уравнение — трехмерное дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности — решается методом конечных разностей по явной схеме на трехмерной равномерной прямоугольной сетке [10], для чего расчетная область разбита на расчетные ячейки размером $\Delta x \Delta y \Delta z$. При этом принято допущение, что средняя температура массива в приповерхностном слое Земли в течение всего расчетного времени постоянна и равна 0 °С, а вертикальный геотермический градиент составляет 10 °С на 1 км [11]. Размеры расчетной области определены из условия, что на протяжении всего расчетного времени температура на границах области не меняется.

Таблица 1. Параметры аппроксимации зависимости мощности остаточного энерговыделения ВАО и ОЯТ от времени на интервале от 30 до 10000 лет

Ядерный материал	Выгорание, МВт·сут/кгU	q_0 , Вт/кгU	b	Среднее квадратичное отклонение, Вт/кгU
ОЯТ ВВЭР-1000	40,5 [7]	0,8978	0,7892	0,0137
ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР-1000	40,5 [7]	0,7533	1,1325	0,0184
ОЯТ РБМК-1000	24,9 [7]	0,4985	0,8018	0,0090

Удельное энерговыделение, Вт/м³, в расчетных ячейках в момент времени τ рассчитывается по формулам

$$q(x, y, z, \tau) = q_U(\tau) \cdot Z(x, y, z) \cdot M_U Z_A \quad (1)$$

$$q_U(\tau) = q_0 \cdot [30 / (\tau + \tau_{пр})]^b, \quad (2)$$

где $q_U(\tau)$ — удельное остаточное энерговыделение в момент времени τ , Вт/кг U; τ — время содержания ОЯТ и РАО в глубинном хранилище, лет; $\tau_{пр}$ — время предварительной выдержки после выгрузки из реактора, лет; $Z(x, y, z)$ — плотность размещения канистр в расчетной ячейке, м⁻³; M_U — масса урана в одной ТВС, кг; Z_A — число ОТВС в канистре (при захоронении ОЯТ без переработки) или число ОТВС, от переработки которых остеклованными ВАО заполняют одну канистру; q_0 и b — параметры аппроксимации мощности остаточного энерговыделения в зависимости от времени.

Значения параметров q_0 и b , определенные по методу наименьших квадратов для интервала времени от 30 лет до 10⁴ лет, приведены для некоторых видов ОЯТ и ВАО в табл. 1. Изменение мощности остаточного энерговыделения некоторых видов ОЯТ и ВАО и результаты аппроксимации по формуле (2) МОЭ остеклованных ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР-1000 приведены на рис. 2.

Для реализации описанной модели разработана в системе Mathcad программа «Granite-3D-Tunnel», результатами расчетов по которой являются графики зависимости температуры от времени в любой точке расчетной области и изотермы температурных полей во вмещающем массиве в выбранные моменты времени.

Для математического моделирования теплофизических процессов, протекающих в «ближнем поле» хранилища, создана программа «Cylinder-Tunnel». В модели принято допущение об осевой симметрии теплофизических процессов в многослойной системе «канистра — бентонит — слои гранита», которое соответствует конфигурации хранилища на подавляющей длине тоннелей хранения (кроме концевых участков). В связи с этим, в настоящей работе применена математическая модель нагрева и охлаждения системы «канистра — бентонит — прилегающие к тоннелю слои гранита», которая основана на решении численным методом одномерного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах для многослойного цилиндра бесконечной длины [10].

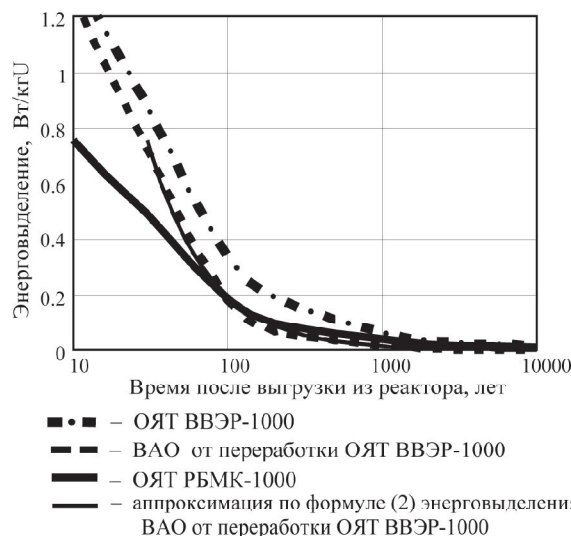


Рис. 2. Остаточное энерговыделение ОЯТ и ВАО (в расчете на содержание урана в необлученном топливе) и результаты аппроксимации для ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР-1000 по формуле (2)

Число слоев, их радиусы, теплофизические свойства материалов каждого слоя (плотность, теплопроводность, теплоемкость, объемное энерговыделение) и теплофизические свойства газовой среды, заполняющей цилиндрические зазоры между слоями, в данной модели могут быть заданы в произвольном сочетании. Результатами расчетов по программе «Cylinder-Tunnel» являются графики зависимости температуры от времени в любой точке на радиусе системы и профили изменения температуры вдоль радиуса «ближнего поля» хранилища в заданные моменты времени. Влияние тепловыделения в соседних тоннелях на температуру в исследуемом тоннеле в данной математической модели учитывается по методу суперпозиций.

По разработанной модели рассчитана динамика теплового режима глубинного хранилища, схематически изображенного на рис. 1. Расстояние между тоннелями принято равным 50 м.

Параметры канистр с радиоактивными материалами, которые, как предполагается, будут захоронены в глубинном хранилище, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры канистр, принятые в качестве исходных данных для теплового расчета геологического хранилища ОЯТ и ВАО

Параметры канистр	Ядерные материалы	
	ОЯТ РБМК	Остеклованные ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР
Тип канистры	Канистра для захоронения ОЯТ [2]	Бочка ГОСТ 13950—91 в пенале из углеродистой стали
Содержание стекла	—	200 л
Содержание ОЯТ в одной канистре	27,5 ОТВС (≈3162 кг U)	Остеклованные ВАО от переработки 500 кг (по U) ОЯТ ВВЭР-1000
Размеры канистры	Наружный диаметр	0,75 м
	Длина	3,80 м
	Толщина стенки	30 мм
Время выдержки ОЯТ после выгрузки из реактора	57 лет	52 года
Шаг размещения в тоннеле	4,2 м	0,9 м

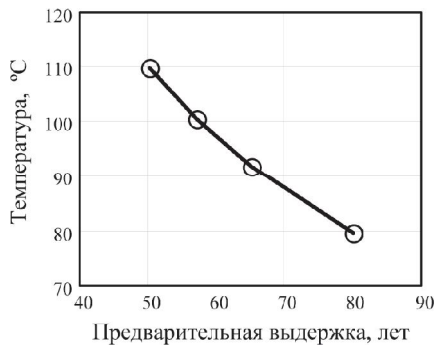
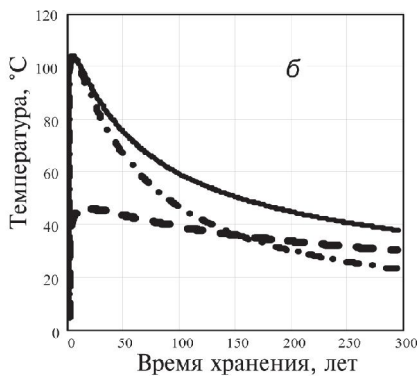
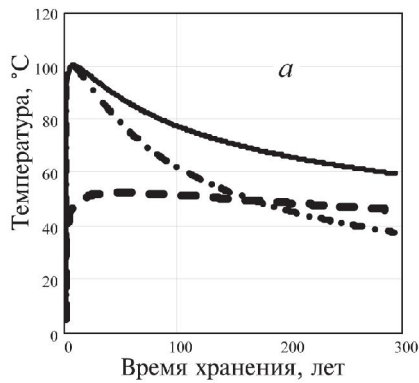


Рис. 3. Максимальная температура бентонитовой глины вблизи канистр с ОЯТ РБМК-1000 в зависимости от времени предварительной выдержки топлива (параметры канистр см. табл. 2)



- ⋯ Максимальная температура бентонита в одиночном тоннеле, °C
- Максимальная температура бентонита в хранилище, °C
- - - Максимальная температура гранита в хранилище, °C

Рис. 4. Изменение температуры в различных точках глубинного хранилища по результатам расчета по программе «Cylinder-Tunnel» (параметры канистр см. табл. 2):
а — ОЯТ РБМК;
б — ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР

Теплофизические параметры гранита, геологической среды, вмещающей глубинное хранилище, и бентонитовой глины в состоянии насыщения водой, принятые при расчетах, приведены в табл. 3.

Расстояние между тоннелями, шаг размещения канистр в тоннелях, время предварительной выдержки топлива

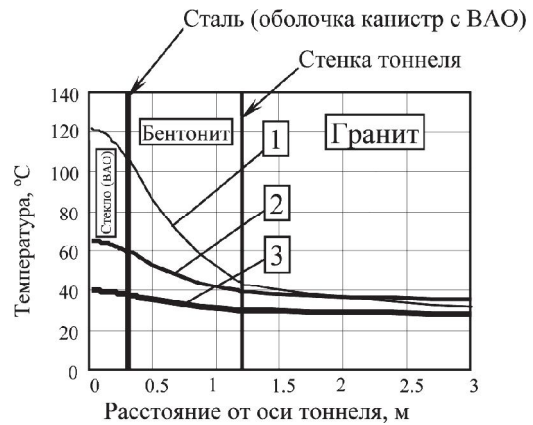


Рис. 5. Профиль температур в «ближнем поле» хранилища остеклованных ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР-1000 через различные промежутки времени после захоронения: 1 — через 5 лет; 2 — через 100 лет; 3 — через 300 лет

Таблица 3. Теплофизические параметры основных материалов, принятые при расчетах

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
Гранит	2700	2,5	900
Бентонит	1900	0,7	2000

и некоторые другие параметры получены нами в результате предварительных расчетов по описываемой модели из условия недопущения в бентоните температуры выше 100 °C. Пример зависимости максимальной температуры бентонитовой глины вблизи канистр с ОЯТ РБМК-1000 от времени предварительной выдержки топлива (при неизменном значении прочих исходных параметров) приведен на рис. 3.

Результаты теплового расчета глубинного хранилища ОЯТ РБМК и остеклованных ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР приведены на рис. 4—6.

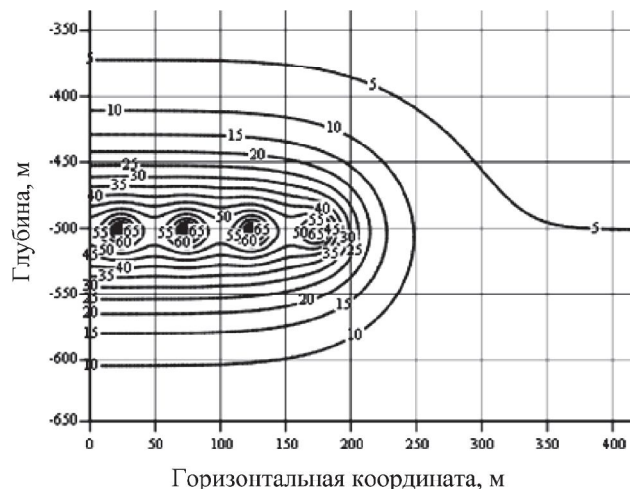


Рис. 6. Изотермы (°C) в гранитном массиве, вмещающем глубинное хранилище, через 60 лет после размещения ОЯТ РБМК и остеклованных ВАО ВВЭР

Проведен анализ чувствительности результатов расчета к значению некоторых исходных параметров системы: на рис. 7 показаны зависимости максимальной температуры бентонита вблизи канистр с остеклованными ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР-1000 при вариации значений теплопроводности гранита и бентонита, а также остаточного энерговыделения ВАО.

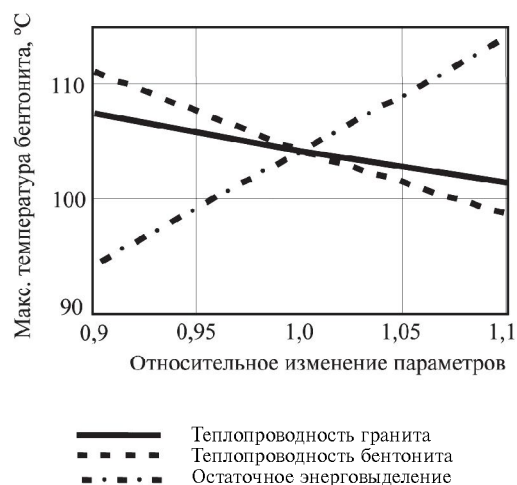


Рис. 7. Чувствительность максимальной температуры бентонита вблизи канистр с остеклованными ВАО к изменению значений некоторых исходных параметров: теплопроводности гранита, теплопроводности бентонита и уровня остаточного энерговыделения

Выводы

Проведено математическое моделирование теплофизических процессов, протекающих в канистрах с ВАО и ОЯТ, в буферном слое и вмещающем гранитном массиве, а также выполнены предварительные компьютерные расчеты некоторых параметров хранилища, которые обеспечат допустимый уровень температур, необходимый для нормального функционирования всех элементов хранилища.

При предварительно выбранных исходных параметрах хранилища результаты проведенного теплового расчета показали:

1. Температура в хранилище сравнительно быстро (за первые 5–10 лет хранения) достигает максимума, затем медленно падает и через 1000 лет после захоронения незначительно превышает свои первоначальные значения.
2. Максимальная температура бентонитовой глины вблизи канистр с ОЯТ РБМК не превышает 100 °C и через 90 лет снижается до 80 °C.
3. Максимальная температура бентонита в слоях, прилегающих к стенкам канистр с ВАО, некоторое время (около 10 лет) незначительно превышает 100 °C, затем быстро падает и через 40 лет снижается до 80 °C, а через 250 лет — до 40 °C.
4. Максимальная температура остеклованных ВАО в процессе хранения не превышает 125 °C.

5. Максимальная температура гранита не превышает 55 °C.

6. При наличии на ЧАЭС 2447 т ОЯТ [4], исходя из выбранной плотности размещения канистр с шагом 4,2 м (см. табл. 2) при упаковке 27,5 ОТВС (около 3162 кг У) в одной канистре, необходимая длина тоннелей для захоронения ОЯТ РБМК составляет 3250 м. Соответственно, для захоронения остеклованных ВАО от переработки ОЯТ ВВЭР (при выбранной схеме захоронения) к 2050 г. будет необходимо приблизительно 21 км тоннелей. При шаге между тоннелями 50 м и ширине хранилища 900 м общая длина хранилища L (см. рис. 1) составит примерно 1350 м.

Анализ чувствительности результатов расчета к вариации исходных теплофизических параметров показал значительное влияние уровня остаточного энерговыделения ВАО на температуру бентонита в буферном слое.

Список использованной литературы

1. Kaminski, M. D. Engineering product storage under the advanced fuel cycle. Part I: An iterative thermal transport modeling scheme for high-heat-generating radioactive storage forms // Journal of Nuclear Materials. — 347 (2005). — P.104–110.
2. Авдеев, О. К. Радиоактивные отходы Украины: состояние, проблемы, решения: Монография / О. К. Авдеев, А. А. Кретинин, А. И. Леденев и др. Под ред. акад. НАНУ Соботевича Э.В.). — К.: Изд. центр «Друк», 2003. — 400 с.
3. Кедровский, О. Л. Научно-техническое предложение о создании долговременного хранилища отработавшего топлива и высокоактивных отходов в горизонтальных выработках, пройденных бурением в геологических формациях (для условий Украины). — М., 2000. — (Фонды НТЦ КОРО).
4. Афанасьев, А. А. Оценка и сравнение вариантов ЯТЦ с переработкой и прямым захоронением ОЯТ АЭС Украины с учетом существующей кооперации в области ЯТЦ и развития новых подходов в других странах // Ядерні та радіаційні технології. — 2005. — Т. 5, № 1. — С. 4–14.
5. Ажажа, В. М. Ядерная энергетика: обращение с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами / В. М. Ажажа, В. А. Белоус, С. В. Габелков и др.; Под ред. акад. И. М. Неклюдова. — К.: Наук.думка, 2006. — 253 с.
6. Kimura, H. Sensitivity Analysis of Geologic Disposal of High-level Radioactive Waste for Conceptual Geologic Media/ H. Kimura, T. Takahashi, S. Shima et al. // Journal of Nuclear Science and Technology. — V. 32, No. 5. — Pp. 439–449 (May 1995).
7. Колобашкин, В. М. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник / В. М. Колобашкин, П. М. Рубцов, П. А. Ружанский и др. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 384 с.
8. Hacker, Charles. Radiation Decay.Version 3.6//Интернетресурс Free Ware, May 2001.
9. Гольдберг, В. М. Проницаемость и фильтрация в глинах / В. М. Гольдберг, Н. П. Скворцов. — М.: Недра, 1986. — 160 с.
10. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. — М.: Наука, 1978.
11. Справочник физических констант горных пород / Под ред. С. Кларк мл.; перевод с англ. // Науки о земле. — Т. 21.— М.: Мир, 1969. — С. 452.

Получено 25.06.2011.