

УДК 621.039.7 : 536.2 : 519.6

## Обоснование предложения по компоновке объекта подземной изоляции шведского ОЯТ с позиции теплового фактора

П.В. Амосов<sup>1,2</sup>, А.А. Хотмиров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Горный институт КНЦ РАН

<sup>2</sup> Физико-энергетический факультет КФ ПетрГУ, кафедра теплофизики

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования (с позиций теплового фактора) по обоснованию компактного размещения контейнеров со шведским ОЯТ в подземном объекте окончательной изоляции. Приведены доказательства обеспечения безопасного теплового режима объекта в новой компоновке и оценки потенциального экономического эффекта, достигаемого за счет сокращения объема строительных работ.

**Abstract.** The results of research (from positions of the thermal factor) on substantiation of compact placing of containers with Swedish spent nuclear fuel (SF) in an underground object of final isolation have been presented. Proofs of maintenance of safe thermal mode of the object in new configuration and estimations of the potential economic benefit achieved due to reduction of construction work volume have been given.

**Ключевые слова:** окончательная изоляция ОЯТ, компактность размещения, безопасность

**Key words:** final isolation of the SF, compactness of placing, safety

### 1. Постановка задачи

Шведские специалисты рассматривают для конечной стадии обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) возможность его захоронения в геологических формациях (типа гранита) на глубине порядка 500 м (*Long-term safety...*, 2006). Согласно данным проекта SR-Cap, для захоронения ОЯТ предполагается использовать медные контейнеры диаметром 1,05 м и высотой 4,83 м. Такие контейнеры, окруженные бентонитом, предполагается размещать в вертикальных скважинах туннелей сечением около 15 м<sup>2</sup>. Параметры скважин следующие: диаметр 1,75 м и высота 7,83 м (рис. 1). Канистры предполагается размещать на подложке из бентонита толщиной 0,5 м. Сверху толщина бентонита составляет 1,5 м. В хранилище планируется разместить 6000 канистр в 38 туннелях общей протяженностью 37 км, с проектным расстоянием между контейнерами  $\Delta_1=6$  м.

В шведском проекте предполагается, что при указанных геометрических размерах, значениях теплофизических параметров компонент системы и обоснованной мощности остаточного энерговыделения (МОЭ) обеспечивается тепловая безопасность объекта.

Авторы поставили задачу: опираясь на данные отчета (*Long-term safety...*, 2006), определить минимально допустимое расстояние между контейнерами вдоль туннеля исключительно с позиций теплового фактора. В качестве критерия оценки выбрана максимально допустимая температура вмещающего массива, которая не должна превышать 373 К (*Сорокин и др.*, 1989).

### 2. Параметры модели

В основе математической модели лежит уравнение нестационарной теплопроводности, решаемое с помощью пакета численного моделирования COMSOL Multyphysics (*Егоров*, 2006), предназначенного для имитации физических процессов в рамках PDE в 3-х мерной постановке.

Принятая авторами модель состоит из четырех областей: источник (ОЯТ), медная оболочка контейнера, защитный барьер (бентонит) и вмещающий массив (гранит) (рис. 1). Поскольку тепловое состояние материалов модели рассматривается для контейнера с максимальной тепловой нагрузкой (центральный контейнер), то граничные условия на внешних границах следующие: на боковых гранях – нулевые тепловые потоки, а на верхней и нижней гранях – условие Дирихле (температура массива). Необходимая константная информация по областям модели представлена в табл. 1.

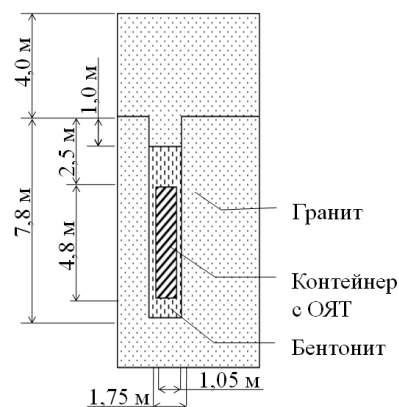


Рис. 1. Геометрические параметры ближней зоны захоронения контейнеров с ОЯТ

Таблица 1. Значения начальных температур и теплофизических параметров\* областей модели

Параметры модели	Источник	Медь	Бентонит	Гранит
Начальная температура, К	341	322	297	286
Теплопроводность, Вт/мК	7,7	390,0	1,3	3,1
Теплоемкость, Дж/кг К	452	260	850	740
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7567	8906	2000	2653

\*Примечание. Значения параметров приведены для температуры 293 К.

Временная зависимость МОЭ шведского ОЯТ была проанализирована авторами и представлена в работе (Хотмиров, Амосов, 2009). Временной интервал для исследования выбран 200 лет, хотя максимумы температур в материалах модели наступают существенно раньше (до 5 лет).

### 3. Результаты расчетов и их анализ

Предметами интереса данного исследования являются: динамика температуры в материалах модели, пиковые температуры, зависимости максимальной температуры массива от расстояния между контейнерами.

В первую очередь была промоделирована ситуация с проектным значением расстояния между контейнерами. В качестве примера на рис. 2 и 3 представлены пространственное распределение и динамика температуры для проектной модели  $\Delta_1=6$  м.

Сравнение максимальных значений температуры в областях авторской модели с данными шведского проекта (Long-term safety..., 2006) показало, что имеется достаточно хорошее согласие. Отличия в значениях максимальных температур в различных материалах таковы: область источника  $\Delta T=10,4$ К (2,8 %); область стенок контейнера  $\Delta T=0,15$  К (0,04 %); область бентонита  $\Delta T=5,3$  К (1,54 %); область гранита  $\Delta T=4,8$  К (1,44 %). При этом прогнозируемое значение максимальной температуры в граните не превышает 340 К, что заметно уступает рекомендуемому критериальному значению.

Выполненное сравнение позволило убедиться в достаточности построенной модели и рассмотреть ситуации с более компактным размещением контейнеров. Другими словами, промоделировать тепловой режим при новых конструктивных решениях, сравнить результат по критерию тепловой безопасности и оценить потенциальный экономический эффект за счет более плотного расположения контейнеров.

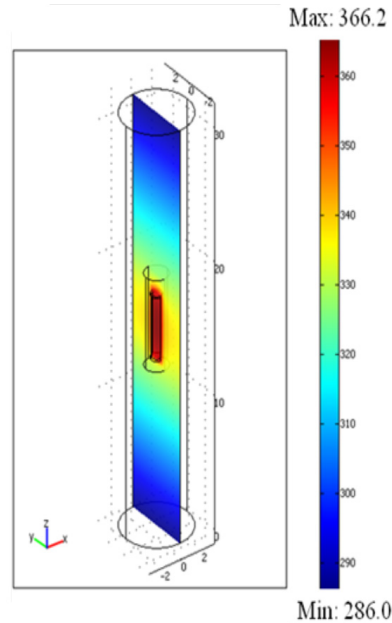


Рис. 2. Распределение температур по центральному сечению модели в источнике и защитных барьерах на 3,1 года для модели  $\Delta_1=6$  м

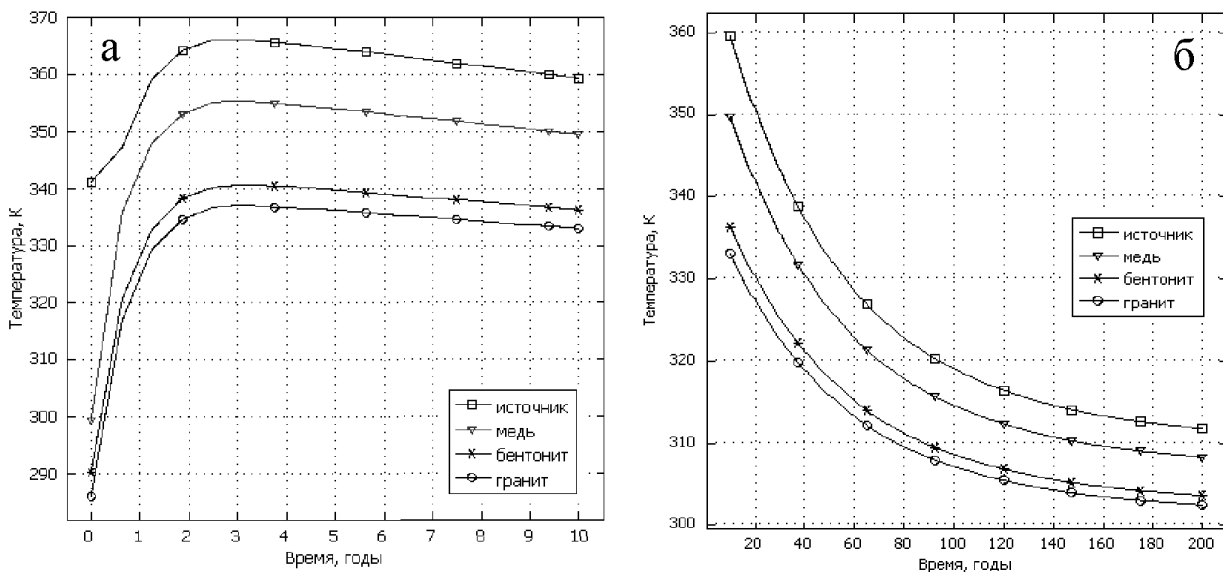


Рис. 3. Динамика температур в защитных барьерах модели с  $\Delta_1=6$  м: а) 0-10 лет; б) 10-200 лет

Таблица 2. Значения максимальных температур\* в областях моделей при вариации расстояния между контейнерами

Область модели		$T_{3,1}$ , К	$T_{10}$ , К	$T_{50}$ , К	$T_{100}$ , К	$T_{200}$ , К
$\Delta_1=6$ м	Источник	366,2	359,4	332,4	318,9	311,6
	Медь	363,0	356,5	330,6	317,6	310,6
	Бентонит	349,9	344,7	323,1	312,3	306,4
	Гранит	337,8	333,6	316,1	307,3	302,6
$\Delta_2=5$ м	Источник	388,0	379,9	345,0	327,9	318,7
	Медь	385,0	377,0	343,2	326,5	317,6
	Бентонит	372,6	365,7	336,0	326,5	313,7
	Гранит	361,2	355,4	329,5	316,8	310,1
$\Delta_3=4$ м	Источник	432,8	421,0	369,5	345,0	332,0
	Медь	430,4	418,7	367,7	343,7	331,0
	Бентонит	420,0	408,8	361,0	338,9	327,3
	Гранит	410,4	400,0	355,3	334,9	324,1

\*Примечание. Нижние индексы символа температуры соответствуют времени расчета (в годах)

По отработанной методике были построены модели с шагом размещения контейнеров  $\Delta_2=5$  м и  $\Delta_3=4$  м, выполнены численные эксперименты и проанализированы результаты расчетов. В табл. 2 представлены значения максимальных температур в источнике и защитных барьерах для рассмотренных ситуаций:  $\Delta_1=6$  м;  $\Delta_2=5$  м и  $\Delta_3=4$  м.

Как видно из данных табл. 2, для предложенной проектом SR-Can модели (шаг  $\Delta_1=6$  м), максимальное значение температуры в области вмещающего массива составляет 338 К, т.е. имеется температурный запас в 35 К. Для второй модели с шагом  $\Delta_2=5$  м максимальная температура массива увеличивается до 361 К. Но это значит, что по-прежнему имеется определенный температурный запас (около 12 К), и превышение критериального значения не прогнозируется. Попытка предложить более плотную компоновку контейнеров оказалась неудачной, поскольку для модели с шагом  $\Delta_3=4$  м расчетная максимальная температура гранита достигает 410 К. Такое значение температуры вмещающего массива не удовлетворяет предельно допустимой величине (Сорокин и др., 1989).

Основываясь на результатах решения только тепловой задачи (но не геомеханической!), авторы предлагают: с точки зрения тепловой безопасности есть возможность уменьшить расстояние между контейнерами с  $\Delta_1=6$  м до  $\Delta_2=5$  м. Тем самым существенно сокращается длина туннелей. Если протяженность одного туннеля уменьшается на 160 м, то общая протяженность туннелей объекта окончательной изоляции снизится практически на 6000 м. Зная стоимость строительства единицы объема выработки сечением до 40 м<sup>2</sup> в кристаллических породах (около 100 долл. США на 1 м<sup>3</sup> (Концептуальный проект..., 1998)), можно оценить потенциальный экономический эффект, достигаемый за счет более компактного размещения контейнеров: порядка 9 млн. долларов США.

#### 4. Заключение

На основании выполненного анализа результатов численных экспериментов по моделированию (на базе программного продукта COMSOL) теплового состояния шведского ОЯТ, материалов инженерных барьеров и вмещающего массива авторами (с позиции теплового фактора) сделан вывод о принципиальной возможности размещения контейнеров с ОЯТ с шагом  $\Delta_2=5$  м.

Указанное утверждение основано на демонстрации безопасности прогнозируемых температур для вмещающих пород при указанном расстоянии между контейнерами. При переходе на более плотную компоновку контейнеров достигается (за счет уменьшения объемов строительства) экономический эффект порядка 9 млн долларов США.

#### Литература

Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. TR-06-09. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 621 p., 2006.

Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие. СПб., СПб ГУ ИТМО, 77 с., 2006.

Концептуальный проект регионального могильника для радиоактивных отходов, нарабатываемых в северо-западной России. Отчет по задаче 2 проекта TACIS R.4.10/95. "Повышение безопасности обращения с радиоактивными отходами в Северо-Западном регионе России. Размещение

радиоактивных отходов. Этап 2". *Апатиты-Париж, Горный институт КНЦ РАН (Россия), ANDRA (Франция), 147 с., 1998.*

**Сорокин В.Т., Козлов А.Е., Пучкова О.К.** Теплотехнические аспекты захоронения отвержденных радиоактивных отходов в геологических формациях. Препринт. *Л., ВНИПИЭТ, 42 с., 1989.*

**Хотмиров А.А., Амосов П.В.** Оценка мощности остаточного энерговыделения отработавшего ядерного топлива контейнера проекта SR-Sap. *Тезисы докладов на 9 региональной научной студенческой конференции, Мурманск, 12 мая 2009. Мурманск, с.42-43, 2009.*