

УДК 536.2 : 519.6

## Моделирование теплового режима подземного объекта хранения тепловыделяющих радиационно опасных материалов

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

<sup>1</sup> Горный институт Кольского научного центра РАН

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

**Аннотация.** В статье представлены результаты численного моделирования теплового режима объекта долговременного хранения отработавшего ядерного топлива в варианте встроенной железобетонной конструкции. Приведены доказательства по обеспечению безопасного теплового режима объекта в условиях выбранной компоновки для широкого диапазона параметров модели.

**Abstract.** The results of numerical modeling of a thermal mode of object of long-term storage of the spent nuclear fuel in a variant of the built in ferro-concrete design have been presented. Proofs on maintenance of a safe thermal mode of object in the conditions of the chosen configuration for a wide range of parameters of model have been set.

**Ключевые слова:** тепловыделяющие материалы, ОЯТ, моделирование, тепловой режим, безопасность  
**Key words:** heat-producing materials, SF, modeling, a thermal mode, safety

### 1. Введение

В качестве модельного примера исследования авторами выбрана теоретическая разработка специалистов Горного института КНЦ РАН по конструктивно-компоновочной схеме (Мельников и др., 2003) подземного хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Объект предлагается создать в скальном массиве на глубине 100 м с использованием искусственных (железобетонные контейнеры, встроенная железобетонная конструкция) и естественных (горная порода) защитных барьеров. Время хранения топлива около 50 лет, поэтому необходимо обеспечить не только надёжность и долговечность хранилища, но и отвод остаточных тепловыделений ОЯТ. Отвод тепла должен быть организован так, чтобы исключить возможность перегрева (поверхность источника 358 К, гранит 373 К (Сорокин и др., 1989)), а также гарантировать отсутствие высоких температурных градиентов в защитных конструкциях.

Целями работы являются: 1) демонстрация возможности моделирования теплового режима чрезвычайно важного объекта с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics (Егоров, 2006); 2) определение степени влияния теплофизических параметров модели и значения расхода воздуха на тепловой режим объекта долговременного хранения ОЯТ.

### 2. Геометрические параметры модели и исходные данные

В данном исследовании модуль представляет собой камерную выработку для хранения ОЯТ во встроенной железобетонной конструкции. Необходимые для построения 2-мерной модели геометрические параметры приведены на рис. 1. В модели выделены области: источник тепловыделения (встроенная железобетонная конструкция), воздух помещения и окружающий вмещающий массив.

При выборе численных значений у авторов имелись определенные сомнения в отношении двух параметров: 1) коэффициент теплопроводности области источника  $\lambda_{ист}$ , состоящего из нескольких разнородных материалов с большим разбросом значений этого параметра (ОЯТ, железобетон, воздух);

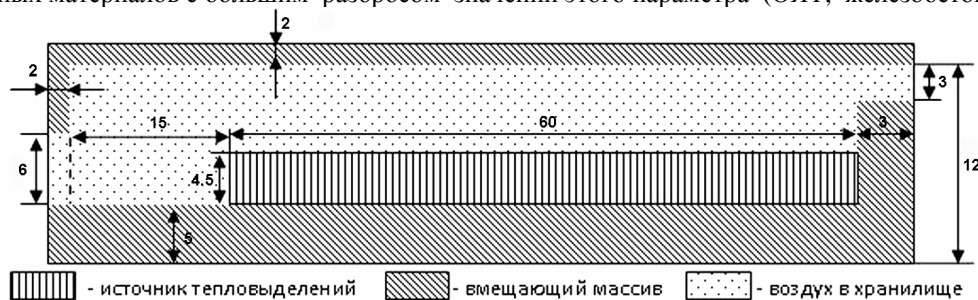


Рис. 1. Геометрические параметры модели подземного объекта хранения тепловыделяющих материалов (размеры в метрах)

Рис. 2. Распределение температурных полей в областях модели при размещении тепловыделяющих материалов во встроенной железобетонной конструкции на расчетное время 5 лет ( $\lambda_{ист}=1$  Вт/(м·К),  $Q = 0.06$  м<sup>3</sup>/с)

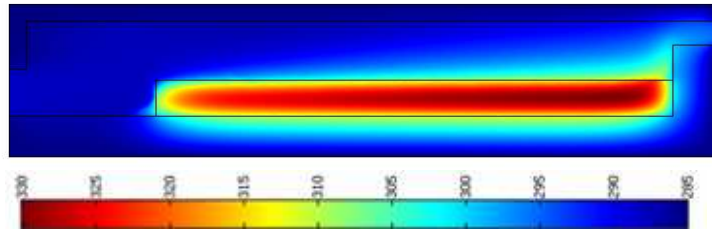


Таблица 1. Начальные температуры и физические параметры областей модели

	$T_0$ , К	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , Па·с
Воздух	288	1000	0.0239	1.22	$1.79 \cdot 10^{-5}$
Гранит	285	740	3	2490	
Источник	300	580	1-7	5860	

Примечание.  $T_0$  – начальная температура,  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\rho$  – плотность,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

2) расход подаваемого воздуха  $Q$ . В принципе, значения теплофизических параметров сложных гетерогенных систем могут быть вычислены с помощью соотношений, приведенных в работе (Ржевский, Новик, 1978). Именно так авторы и поступили по отношению к плотности и теплоёмкости области источника. Значение коэффициента теплопроводности решено проварьировать в широком диапазоне – от 1 до 7 Вт/(м·К). Для расхода подаваемого в модуль воздуха приняты значения: 0.06; 0.18 и 0.30 м<sup>3</sup>/с. При указанных выше геометрических размерах модуля (рис. 1) выбранные значения расхода обеспечивают ламинарный режим движения воздуха.

Математическая модель основана на уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости Навье-Стокса и уравнении конвективного теплообмена. Начальные температуры областей модели и значения теплофизических параметров, заимствованные авторами в работах (Наука о Земле, 1969; Варгафтик, 1972; Ржевский, Новик, 1978), приведены в табл. 1.

Кривая мощности остаточных энерговыделений, приведенная в отчете (Научное обоснование..., 2008), аппроксимирована с помощью программы MathCAD в виде полинома третьего порядка:

$$W(t) = 2.882 \cdot 10^4 - 707.262 \cdot t + 8.714 \cdot t^2 - 0.052 \cdot t^3,$$

где  $W(t)$  – мощность остаточных энерговыделений (Вт),  $t$  – время (в годах).

### 3. Результаты исследования и их анализ

В качестве примера на рис. 2 представлено распределение температурного поля в областях модели при  $\lambda_{ист}=1$  Вт/(м·К) и  $Q = 0.06$  м<sup>3</sup>/с на расчетное время 5 лет. На цветном рисунке хорошо видна неравномерность распределения температуры в области источника, вмещающего массива в подошве выработки и воздуха (особенно на выходе из модуля).

Для построения графиков динамики температуры были проанализированы распределения температур в узлах сетки исследуемых областей (источник, поверхность источника, гранит и воздух на выходе из модуля). Обнаружено, что координаты точек с максимальными значениями температуры изменяются при вариации значений указанных выше параметров ( $\lambda_{ист}$  и  $Q$ ). Графики динамики температур в областях модели при фиксированном минимальном расходе и вариации коэффициента теплопроводности области источника приведено на рис. 3. В легенде рис. 3 отмечен факт изменения пространственных координат точек с максимальными температурами в источнике и на его поверхности.

В табл. 2 представлены максимальные температуры в различных областях модели при вариации коэффициента теплопроводности источника и расхода подаваемого воздуха.

В качестве примера анализа динамики и численных значений максимальной температуры в областях модели приведем некоторые интересные моменты:

а) область источника:

- при минимальном значении коэффициента теплопроводности максимальная температура оказывается выше, чем при более высоких значениях  $\lambda_{ист}$ . Физически это правильно, поскольку с ростом коэффициента теплопроводности тепло более интенсивно уходит в окружающие области модели;
- при фиксированном значении  $\lambda_{ист}$  с увеличением расхода воздуха "ножницы" в значениях максимальной температуры сохраняются и находятся в интервале 11-14 К;
- время, за которое достигается максимум температуры области источника, уменьшается как при увеличении расхода воздуха (кроме минимального значения коэффициента теплопроводности), так и при увеличении коэффициента теплопроводности.

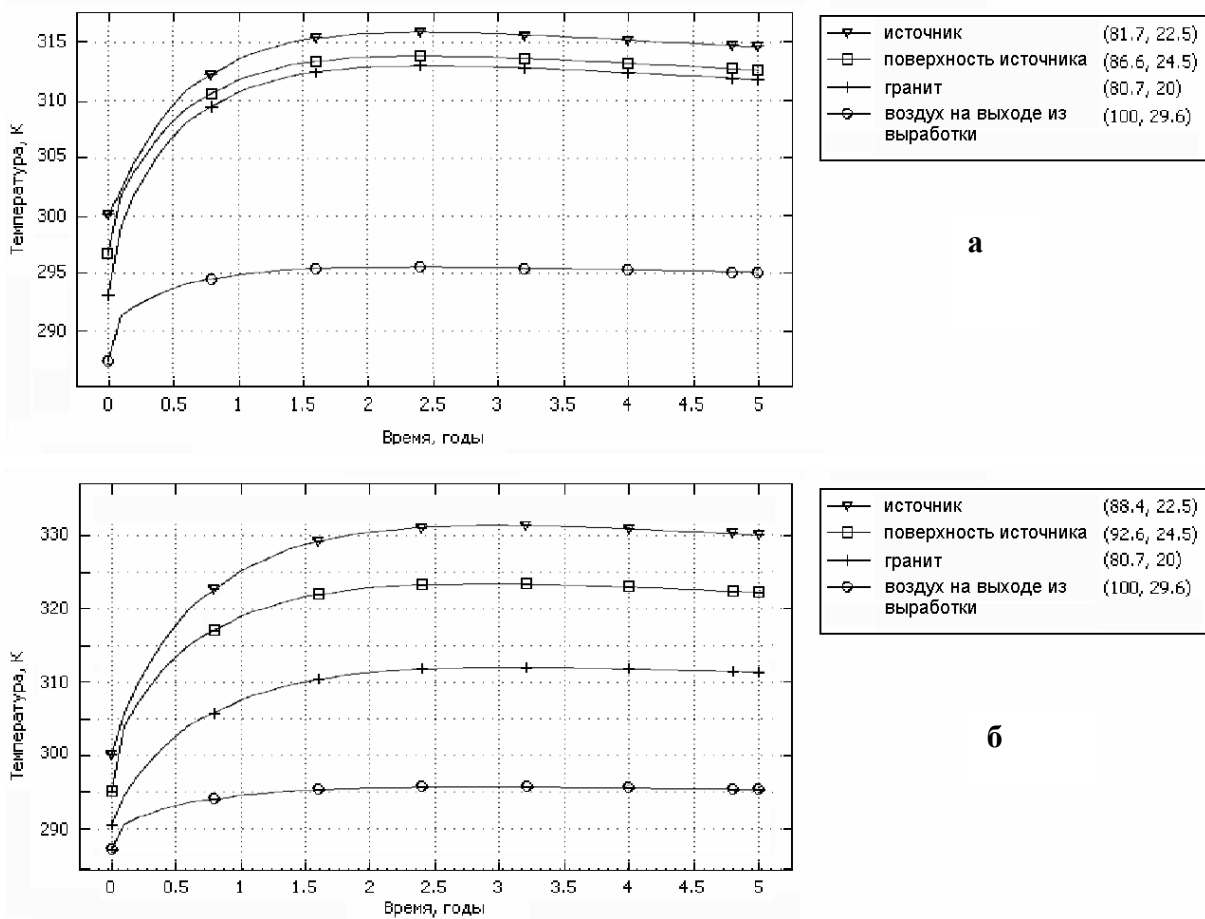


Рис. 3. Динамика температур областей модели при размещении тепловыделяющих материалов во встроенной железобетонной конструкции (расход воздуха  $Q=0,06 \text{ м}^3/\text{с}$ ):

а)  $\lambda_{ист}=1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; б)  $\lambda_{ист}=7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

(пары чисел в легенде указывают координаты точек модели с максимальными температурами)

Таблица 2. Значения максимальных температур ( $T_{max}$ ) и время их достижения ( $t_{max}$ ) в различных областях модели при размещении тепловыделяющих материалов во встроенной железобетонной конструкции при вариации значений  $\lambda_{ист}$  и  $Q$

Параметры вариации		Контролируемые области модели							
$\lambda_{ист}$ Вт/(м·К)	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	Источник		Поверхность		Гранит		Воздух	
		$T_{max}$ , К	$t_{max}$ , Г	$T_{max}$ , К	$t_{max}$ , Г	$T_{max}$ , К	$t_{max}$ , Г	$T_{max}$ , К	$t_{max}$ , Г
1	0.06	331.4	2.9	323.5	2.9	312.0	3.0	295.7	2.9
	0.18	320.3	3.0	309.0	2.0	308.0	3.0	291.3	2.5
	0.30	317.8	3.0	303.8	2.0	307.0	2.5	290.1	2.0
3	0.06	319.6	2.5	316.1	2.5	312.8	2.5	295.7	2.4
	0.18	308.6	2.0	305.2	2.0	305.4	2.0	291.8	1.6
	0.30	305.3	1.5	301.4	1.6	303.3	1.6	290.5	1.5
5	0.06	317.1	2.4	314.5	2.4	313.0	2.5	295.9	2.4
	0.18	306.1	1.6	304.1	1.6	304.4	1.6	292.0	1.5
	0.30	302.8	1.4	300.6	1.4	301.7	1.4	290.7	1.4
7	0.06	315.9	2.4	313.9	2.4	313.0	2.4	295.6	2.4
	0.18	305.0	1.5	303.6	1.5	303.8	1.5	292.1	1.4
	0.30	301.6	1.4	300.2	1.4	300.9	1.4	290.8	1.0

б) поверхность источника:

- как и в области источника максимальная температура принимает наибольшее значение при минимальном значении коэффициента теплопроводности. Это обусловлено тем, что чем выше значение  $\lambda_{ист}$ , тем интенсивнее происходит теплоотдача от источника к воздуху и граниту и поэтому температура поверхности уменьшается;
- разница между максимальными температурами при  $\lambda_{ист}=1$  Вт/(м·К) и  $\lambda_{ист}=3$  Вт/(м·К) составляет всего 1 К при  $Q=0.06$  м<sup>3</sup>/с, тогда как при расходах воздуха 0.18 м<sup>3</sup>/с и 0.30 м<sup>3</sup>/с – около 3-4 К;
- время достижения максимума температуры уменьшается с ростом расхода воздуха и при увеличении  $\lambda_{ист}$ .

в) вмещающий массив:

- при минимальном значении расхода воздуха увеличение  $\lambda_{ист}$  приводит к небольшому росту максимальных значений температуры массива, т.е. преобладает перенос тепла в массив. Однако с увеличением расхода тепло более интенсивно "стекает" в движущийся воздух, что приводит к снижению абсолютных значений максимальных температур массива;
- время достижения максимальных значений температуры уменьшается с ростом расхода воздуха и при увеличении  $\lambda_{ист}$ .

г) воздух на выходе из выработки:

- при вариации  $\lambda_{ист}$  и фиксированном значении расхода воздуха  $Q$  максимальная температура меняется, но весьма незначительно (в пределах 1 К);
- увеличение  $Q$  приводит к уменьшению как максимальной температуры воздуха, так и времени её достижения, что можно объяснить более интенсивным выносом тепла из выработки воздухом.

Данные табл. 2 позволяют построить области прогнозируемых максимальных температур для всего диапазона изменения коэффициента теплопроводности источника и расхода воздуха. На рис. 4 приведены такие области для источника и вмещающего массива.

Как видно из представленных графиков, максимальные температуры источника (его поверхности) и вмещающего массива не превышают предельно допустимые значения, указанные выше, что позволяет утверждать о тепловой безопасности объекта.

В дополнение к представленным результатам весьма интересным является анализ чувствительности максимальных температур в областях модели к вариации значений теплофизических параметров. В качестве параметров варьирования выбраны плотность, теплоемкость и теплопроводность области источника. Значения нормализованных коэффициентов чувствительности рассчитаны посредством известного соотношения:

$$k_j = [(T_{max}^* - T_{max}^0) / T_{max}^0] / [(p_j^* - p_j^0) / p_j^0],$$

где  $T_{max}^0$  – значение максимальной температуры в какой-либо области модели при базовом наборе параметров  $p_j^0$ ;  $T_{max}^*$  – значение максимальной температуры в той же области модели при изменении единственного параметра  $p_j^*$ . При этом весьма удобно изменение параметра выбирать на уровне 1 %.

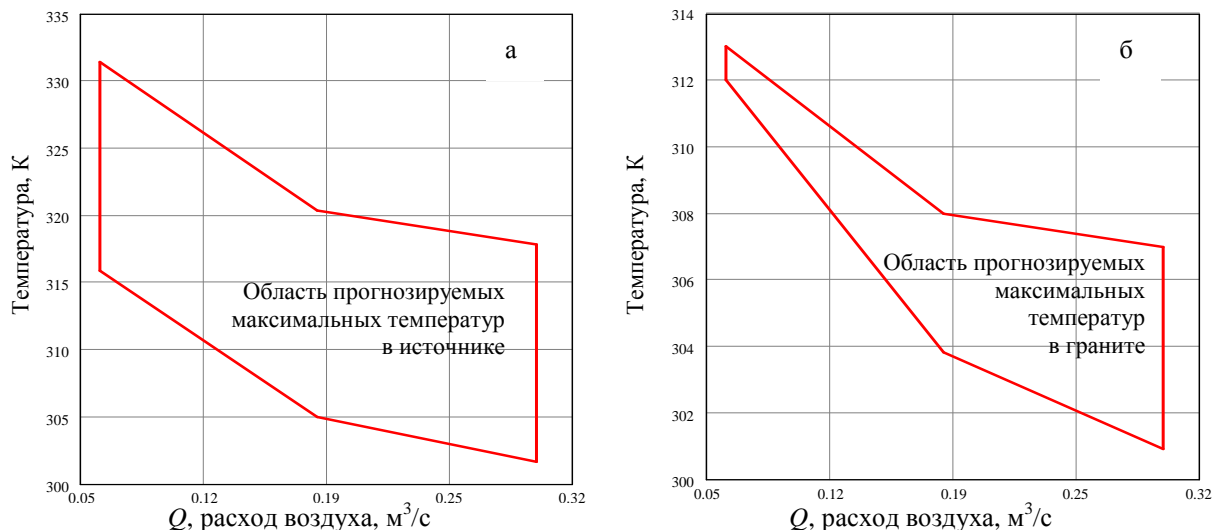


Рис. 4. Зависимость прогнозируемых максимальных температур в источнике (а) и граните (б) при размещении тепловыделяющих материалов во встроенной железобетонной конструкции от расхода воздуха при вариации коэффициента теплопроводности источника

В табл. 3 приведены вычисленные нормализованные коэффициенты чувствительности для  $\lambda_{ист} = 1$  Вт/(м·К),  $Q = 0.06$  м<sup>3</sup>/с. Как видно из данных табл. 3. коэффициенты чувствительности максимальной температуры к вариации значений плотности и теплоёмкости области источника абсолютно идентичны (оказывают одинаковое влияние на коэффициент теплопроводности) и почти на порядок меньше коэффициентов чувствительности для теплопроводности. Но указанный факт справедлив только для области источника и его поверхности. Для вмещающего массива прогнозируется двойное изменение: более влиятельными становятся плотность и теплоемкость, а по параметру теплопроводности происходит изменение знака коэффициента чувствительности. Указанный физический факт ранее был отмечен при анализе данных табл. 2. Менее чувствительной к изменениям значений теплофизических параметров является максимальная температура воздуха на выходе из выработки, что также отмечалось ранее при анализе результатов.

Таблица 3. Значения нормализованных коэффициентов чувствительности максимальной температуры в различных областях модели к вариации плотности, теплоёмкости и теплопроводности области источника

Область модели	Плотность	Теплоемкость	Теплопроводность
Источник	-0.00573	-0.00573	-0.05189
Поверхность	-0.00401	-0.00401	-0.03091
Гранит	-0.00384	-0.00384	+0.00288
Воздух	-0.00101	-0.00101	0

#### 4. Заключение

На основании проведённого исследования можно сформулировать следующие выводы:

- продемонстрированы возможности моделирования теплового режима объекта долговременного хранения ОЯТ в 2-х мерной постановке с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics;
- доказана тепловая безопасность функционирования объекта для режима вынужденной конвекции при ламинарном потоке воздуха: разогревы поверхности области источника и самого вмещающего массива не превышают общепринятых критериальных значений;
- выполнен анализ максимальных значений температуры в различных областях модели для широкого диапазона значений коэффициента теплопроводности области источника и расхода воздуха, подаваемого в выработку. Отмечены физические особенности влияния указанных параметров на максимальные температуры областей модели;
- спрогнозированы нормализованные коэффициенты чувствительности максимальной температуры в исследуемых областях модели к вариации значений теплофизических параметров области источника. Обнаружена разнонаправленность влияния пары параметров (плотность и теплоемкость) и параметра теплопроводности на максимальные температуры в области вмещающего массива и однонаправленность действия параметров для других областей модели.

#### Литература

- Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Наука, 720 с., 1972.
- Егоров В.И.** Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие. СПб., СПбГУ ИТМО, 77 с., 2006.
- Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Катков Ю.Р.** Отработавшее ядерное топливо судовых энергетических установок на Европейском Севере России. Ч.II. Апатиты, КНЦ РАН, 209 с., 2003.
- Наука о Земле. Т.21: Справочник физических констант горных пород. М., Мир, 543 с., 1969.
- Научное обоснование и совершенствование методологии проектирования и технологий строительства подземных хранилищ и могильников радиационно опасных материалов (РОМ) в геологических формациях Европейского Севера России: отчет о НИР. Книга 1. Апатиты, Горный институт КНЦ РАН, 125 с., 2008.
- Ржевский В.В., Новик Г.Я.** Основы физики горных пород. М., Недра, 390 с., 1978.
- Сорокин В.Т., Козлов А.Е., Пучкова О.К.** Теплотехнические аспекты захоронения отвержденных радиоактивных отходов в геологических формациях. Препринт. Л., ВНИПИЭТ, 42 с., 1989.