

# ПРОГНОЗ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНОГО ОБЪЕКТА ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ

**П.В. Амосов**

*Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ Кольского научного центра РАН,  
184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14а*



Представлены результаты исследования методами численного моделирования теплового режима подземного объекта долговременного хранения отработавшего ядерного топлива в варианте встроенной железобетонной конструкции. Компьютерная модель в двумерной постановке построена в программе COMSOL. Математическая модель основывается на уравнениях неразрывности, Навье-Стокса и общем уравнении теплопереноса. Учет условий смешанной конвекции реализован в приближении «несжимаемого идеального газа», в котором теплофизические параметры воздуха являются функцией только температуры. Для двух параметров модели приняты следующие значения: расход воздуха, который обеспечивает скорость на входной границе 0,01, 0,03 и 0,05 м/с, и эффективный коэффициент теплопроводности материала встроенной конструкции – 1,0 и 2,0 Вт/(м·К). Численные эксперименты выполнены на срок до пяти лет хранения топлива. Подчеркнуто принципиальное отличие нестационарной структуры прогнозируемых в модели «несжимаемого идеального газа» скоростных полей от «застывшей» картины аэродинамических параметров в модели несжимаемой жидкости. Выполнен анализ динамики пространственных распределений температурных полей в различных областях модели. Показано соблюдение требований по неперевышению критериальных значений температуры при функционировании объекта в консервативных условиях проветривания по величине расхода воздуха и значению коэффициента теплопроводности материала встроенной конструкции. Проанализирована динамика тепловых потоков, направленных в скальный массив через основание и с поверхности встроенной конструкции в воздушную среду. Отмечено доминирование теплового потока с поверхности конструкции. Продемонстрировано влияние эффективного коэффициента теплопроводности материала встроенной конструкции и расхода воздуха на величину тепловых потоков в воздушную среду и скальный массив.

**Ключевые слова:** тепловыделяющие материалы, отработавшее ядерное топливо, объект хранения, численное моделирование, смешанная конвекция, тепловая безопасность.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из результатов исследований, выполненных специалистами Горного института КНЦ РАН по проблеме безопасного обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) судовых энергетических установок на Европейском Севере России, явилась разработка концептуальной конструктивно-компоновочной схемы подземного хранилища ОЯТ [1, 2]. Подземное хранилище ОЯТ предлагалось создать в скальном массиве на глубине 100 м. Время хранения ОЯТ около 50-ти лет. Наряду с ядерной и радиационной безопасностью одним из основных факторов, определяющих условия эксплуатации хранилища ОЯТ, является температурный режим модуля хранения облученного топлива [3 – 5]. Для сухого хранилища ОЯТ наряду с общими требованиями ко всем типам хранилищ ОЯТ предъявляется требование обеспечения безопасного температурного режима хранения топлива [3, 5]. По требованиям температурного режима необходимо обеспечить отвод остаточных тепловыделений ОЯТ, который должен быть организован так, чтобы исключить возможность перегрева (поверхность встроенной конструкции 358 K (85°C), скальный массив 373 K (100°C) [5]).

Прогнозные расчеты теплового состояния материалов подземного хранилища ОЯТ на столь длительные сроки принято выполнять на базе методов численного моделирования. Известен ряд современных верифицированных компьютерных программ – COMSOL, FlowVision или ANSYS [8 – 10] (полное описание доступно на английском языке из меню *Help* во время работы с программой), которые могут быть использованы в подобных оценках. Результаты исследований теплового режима подземного хранилища ОЯТ в вариантах либо встроенной железобетонной конструкции, либо железобетонных контейнеров и естественных (горная порода) защитных барьеров представлены в работах [11, 12]. В указанных исследованиях моделирование теплового режима объекта выполнялось с помощью программы COMSOL [8, 13]. Математическая модель основывалась на уравнениях неразрывности, Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости и общем уравнении теплопереноса. В реализованной постановке отсутствовал важный член уравнений Навье-Стокса, который учитывает эффект изменения плотности воздуха с температурой, что безусловно снизило ценность выполненных исследований. Как отметили авторы работы [12], их попытки включить в уравнения Навье-Стокса влияние силы тяжести в приближении Буссинеска для указанного ниже начального значения мощности остаточных тепловыделений оказались неудачными.

Исправляя указанный момент с учетом накопленного за прошедшие годы опыта моделирования аэротермодинамических процессов [14, 15], в представляемом материале излагаются результаты исследования теплового режима и особенности аэротермодинамики атмосферы подземного объекта долговременного хранения ОЯТ (вариант встроенной железобетонной конструкции) в условиях смешанной конвекции.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ, УПРАВЛЯЮЩИЕ УРАВНЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Рассматривается модуль, представляющий собой камерную выработку для хранения ОЯТ во встроенной железобетонной конструкции [11]. Необходимые для построения двумерной модели геометрические параметры приведены на рис. 1. Выделены области (встроенная железобетонная конструкция, воздух выработки и окружающий вмещающий массив), различающиеся как механизмами переноса тепла, так и значениями теплофизических параметров.

С учетом конвективного и кондуктивного механизмов переноса тепла уравнение записывается следующим образом [8, 13]:

$$\rho \cdot c_p \cdot (\partial T / \partial t) - \nabla \cdot (-k \cdot \nabla T + \rho \cdot c_p \cdot T \cdot \mathbf{u}) = q_w, \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор скорости воздуха;  $\rho$  – плотность;  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $q_w$  – источник или сток тепла;  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\nabla$  – оператор Гамильтона.

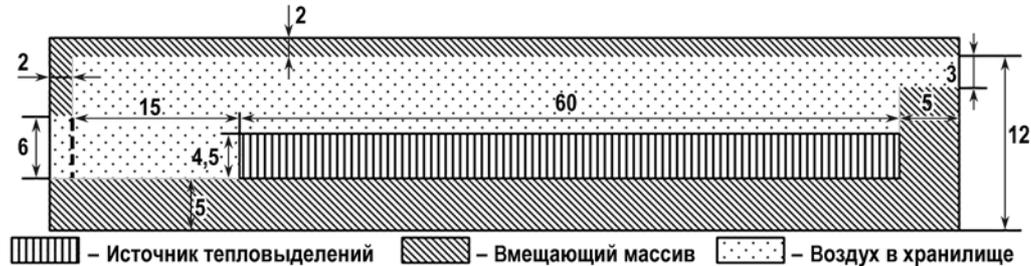


Рис. 1. Геометрические параметры модели подземного объекта хранения тепловыделяющих материалов (размеры в метрах) [11]

Режим неизоэнтальпического потока моделируется с помощью уравнений неразрывности и Навье-Стокса, описывающих связь скорости движения воздуха и давления [8, 13]:

$$\rho(\nabla\mathbf{u})\mathbf{u} = \nabla[-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] - (2\eta/3 - k)(\nabla\mathbf{u})\mathbf{I} + (\rho - \rho_0)\mathbf{g}, \quad \nabla(\rho\mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость;  $\mathbf{g}$  – вектор ускорения свободного падения;  $p$  – давление;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица. Из-за нагрева воздуха происходят отклонения локальной плотности  $\rho$  по сравнению с плотностью воздуха на входе  $\rho_0$ . В результате появляется выталкивающая сила, выраженная как  $(\rho - \rho_0)\mathbf{g}$ . Помимо общеизвестного подхода, применяемого для решения подобных задач, так называемого приближения Буссинеска, в ряде программных продуктов (ANSYS FLUENT, COMSOL, FlowVision) возможно использование модели «несжимаемого идеального газа». В обозначенной модели некоторые свойства воздуха рассматриваются зависящими исключительно от температуры. Например, пользователям программы COMSOL рекомендуют следующие соотношения [13]:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \mu / (R \cdot T), \\ \lg k &= 0,865 \cdot \lg T - 3,723, \\ \eta &= 6,0 \cdot 10^{-6} + 4,0 \cdot 10^{-8} \cdot T, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\rho_0 = 101325$  Па;  $\mu = 0,0288$  кг/моль;  $R = 8,314$  Дж/(моль·К).

Подробное описание используемых переменных в моделях нестационарного переноса тепла дается в документации COMSOL и в справочных файлах [8, 13].

Начальные температуры областей модели и принятые в расчетах значения теплофизических параметров [15 – 23] указаны в табл. 1.

Таблица 1  
**Начальные температуры  $T_0$  и физические параметры областей модели**

	$T_0$ , К	$C_p$ , Дж/(кг·К)	$k$ , Вт/(м·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , Па·с
Воздух	288	1000	$k(T)$	$\rho(T)$	$\eta(T)$
Гранит	285	740	3	2490	
Область тепловыделений	300	580	1,0 и 2,0	5860	

В выполненных численных экспериментах «вручную» менялись значения двух параметров, в отношении которых у авторов работы [11] имелись определенные обоснованные сомнения: 1) эффективный коэффициент теплопроводности области тепловыделений  $k_w$ , состоящей из нескольких разнородных материалов с большим разбросом значений этого параметра (ОЯТ, железобетон, воздух); 2) расход подаваемого воздуха  $Q$ .

В принципе, значения теплофизических параметров сложных гетерогенных систем могут быть вычислены с помощью соотношений, приведенных в работах [18, 19, 23]. Именно так авторы публикаций [11, 12] и поступили по отношению к плотности и теплоёмкости области тепловыделений. С учетом ранее сделанного вывода о безусловном соблюдении критериальных значений температуры при высоких значениях эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений [11] значения этого параметра в области встроенной конструкции в численных экспериментах принимали значения 1,0 и 2,0 Вт/(м·К). Для расхода воздуха, подаваемого в объект, по-прежнему использовались значения 0,06, 0,18 и 0,30 м<sup>3</sup>/с.

Кривая объемной мощности остаточных тепловыделений  $q_w$  как функция времени принята прежней [11]:

$$q_w = 9,149 - 0,224 \cdot t + 0,00277 \cdot t^2 - 1,651 \cdot 10^{-5} \cdot t^3,$$

где  $t$  – годы.

Для численной реализации модели использовалась треугольная расчетная сетка типа «Extremely fine». Общее число элементов составило более 6100 (число степеней свободы почти 25000). При площади области воздушной среды 657 м<sup>2</sup> (см. рис. 1) число треугольных элементов сетки составило 2609, что соответствует среднему значению стороны треугольника около 0,75 м. При решении нестационарной задачи использовалась временная опция FREE [8, 13] с нижней границей интервала шага по времени, равном 3,15 с, что с запасом обеспечивает выполнения критерия Куранта при задаваемых расходах воздуха. Отметим, что устойчивыми оказались расчеты с величиной нижней границы интервала шага по времени на порядок больше. При этом отличия в значениях максимальной температуры на одни и те же моменты расчетного времени были незначительными (третий знак после запятой). В качестве решателя объединенной системы уравнений (1) – (3) использован высокоэффективный прямой решатель UMFPACK. Для обеспечения устойчивости вычислений потребовалось подключение методики искусственной вязкости Isotropic Diffusion с параметром подстройки на уровне 0,25 – 0,35 для уравнений Навье-Стокса и 0,6 для уравнения переноса тепла. Многочисленные попытки получить устойчивые решения с помощью других методик (Streamline Diffusion, Crosswind Diffusion) по борьбе с численной неустойчивостью к успеху не привели [8, 13].

Используемые при численном решении системы уравнений (1) – (3) граничные условия являются стандартными [13] и представлены в табл. 2. Продолжительность времени моделирования во всех расчетах составила пять лет.

Таблица 2

**Граничные условия при численном решении системы уравнений (1) – (3)**

Граница	Уравнения аэродинамики	Уравнение теплопереноса
Вход	Горизонтальный компонент скорости	Температура поступающего воздуха
Выход	Отсутствие напряжений	Конвективный поток
Стенки модуля хранения	Отсутствие скольжения	Условие неразрывности
Внешние границы модели	–	Условие нулевого потока

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ**

**Аэродинамические характеристики потоков**

Первое принципиальное отличие в результатах численных экспериментов 2010 г. [11, 12] и представляемых в статье заключается в структуре воздушных потоков объекта хранения. Если в модели несжимаемой жидкости (рис. 2) структура воздушных потоков при рассмотренных расходах воздуха идентична на всем протяжении решения нестационарной задачи теплопереноса (отличие только в значениях компонентов скорости для разных расходов), то учет влияния тепла на аэродинамику делает проблему по настоящему нестационарной.

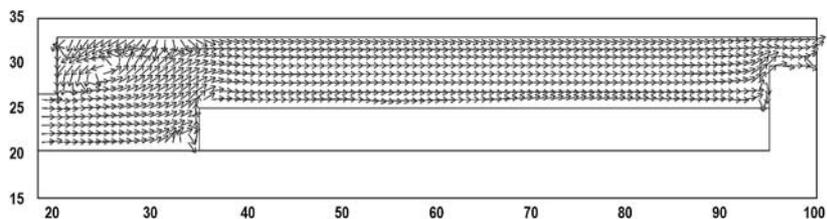


Рис. 2. Структура поля скорости в численных экспериментах 2010 г. [9]

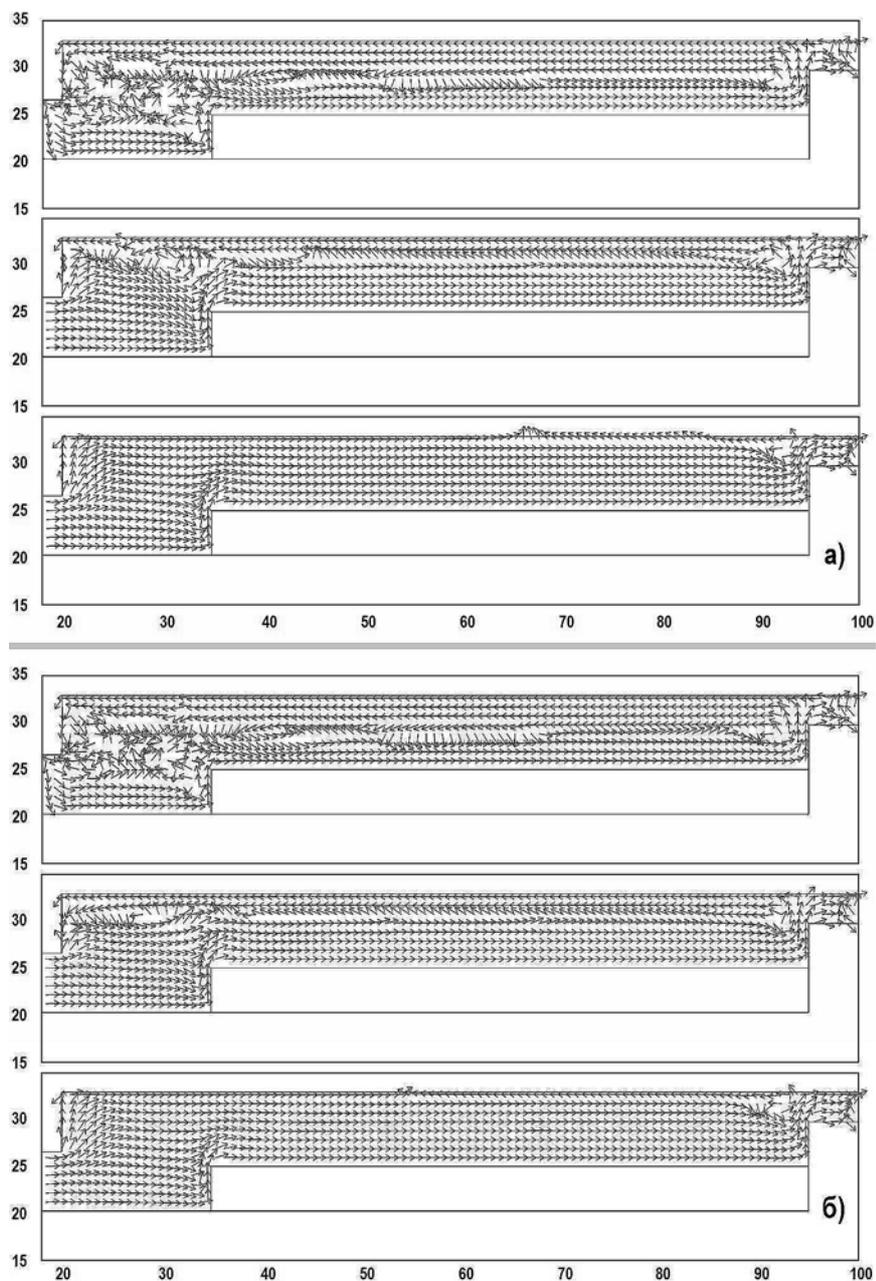


Рис. 3. «Мгновенная» картина структуры поля скорости на пять лет моделирования при вариации расхода поступающего воздуха (верхний 0,06, средний 0,18 и нижний 0,30 м<sup>3</sup>/с) и эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений: а) – 1,0 Вт/(м·К); б) – 2,0 Вт/(м·К)

В качестве примера на рис. 3 приведены «мгновенные» картины скоростных полей на момент времени моделирования пять лет при вариации как расхода воздуха  $Q$  (верхний 0,06, средний 0,18 и нижний 0,30 м<sup>3</sup>/с), так и эффективного коэффициента теплопроводности  $k_w$  (1,0 (рис. 3а) и 2,0 (рис. 3б) Вт/(м·К)) области тепловыделений. Для изображения поля скорости использована опция «нормализованных» стрелок, что позволяет увидеть структуру скоростного поля и в тех областях, где модули компонентов скорости близки к нулю и при использовании опции «пропорциональных» стрелок вектора превращаются в точки.

Прекрасно видно, что структура полей скорости, которые рассчитываются в приближении «несжимаемого идеального газа», существенно отличается от той, что использовалась авторами в модели несжимаемой жидкости [11, 12]. Кроме того, визуальное сравнение «мгновенных» картинок (см. рис. 3), позволяет качественно оценить влияние величины расхода поступающего воздуха.

Например, на рис. 3а при расходе 0,06 м<sup>3</sup>/с (верхняя картинка) обратный поток воздуха в середине объекта занимает практически половину высоты пространства между поверхностью железобетонной конструкции и кровлей. С ростом расхода воздуха до 0,18 м<sup>3</sup>/с (средняя картинка) область обратного потока вдоль кровли сокращается примерно на треть. А при дальнейшем росте расхода до 0,30 м<sup>3</sup>/с (нижняя картинка) обратный поток на рассматриваемый момент времени практически исчезает. Представляется, что в ситуации максимального расхода воздуха с течением времени с учетом монотонного спада объемной мощности остаточных тепловыделений структура потока будет все более и более походить на структуру поля скорости для модели несжимаемой жидкости.

Эффект влияния значения эффективного коэффициента теплопроводности на структуру поля скорости удобно проследить на следующих примерах. Для расхода воздуха 0,18 м<sup>3</sup>/с (средние картинки) на рис. 3а, б отчетливо видно различие в структуре потока в левой верхней области объекта (до встроенной конструкции с ОЯТ). При максимальном расходе воздуха (нижняя картинка) заметные различия в структуре поля скорости хорошо видны под кровлей в центре объекта и справа ближе к выходу.

Динамика формирования скоростного поля была проанализирована на примере горизонтальной компоненты вектора скорости в трех вертикальных сечениях модели (отметки 70, 80 и 90 м вдоль горизонтальной оси (см. рис. 2, 3)). Наиболее подробно анализ выполнен для варианта расхода воздуха 0,18 м<sup>3</sup>/с и эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений 1,0 Вт/(м·К). В течение почти полутора лет движение воздуха было однонаправленным в сторону выходной границы. Однако с течением времени в разных вертикальных сечениях начинает формироваться обратный поток – в сечении 90 м примерно через полтора года, а в сечениях 70 и 80 м отрицательные горизонтальные скорости начинают появляться после двух лет от начала процесса моделирования.

Таким образом, становится очевидным, что в моделях несжимаемой жидкости, на базе которой выполнены исследования 2010 г. [11, 12], и в модели «несжимаемого идеального газа» конвективный механизм переноса тепла, который является доминирующим в воздушной среде, существенно различается. Если в модели несжимаемой жидкости [11, 12] имеем практически однонаправленный перенос тепла к выходу из объекта хранения, то в модели «несжимаемого идеального газа» конвективный перенос тепла варьирует как во времени, так и в пространстве. Очевидно, что результатом указанных отличий могут быть определенные изменения в итоговых показателях теплового режима объекта.

#### **Тепловой режим объекта хранения**

Для ответа на вопрос об условиях выполнения критериальных значений температуры проанализированы пространственно-временные распределения температуры для

указанных выше вариантов расхода воздуха и значений эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений. Напомним, что в первую очередь интерес представляют критериальные значения температуры – в области скального массива ( $\leq 100^\circ\text{C}$ ) и на поверхности железобетонной конструкции ( $\leq 85^\circ\text{C}$ ). Анализ пространственно-временных распределений температуры показывает, что поиск максимальных температур в различных областях модели необходимо выполнять в различных сечениях (см. выше):

- для области тепловыделений и гранита вблизи подошвы сечение 70 м;
- для поверхности железобетонной конструкции сечение 80 м;
- для гранита вблизи кровли и воздуха сечение 90 м.

В указанных сечениях проанализирована динамика пространственного распределения температуры для варианта расхода воздуха  $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$  и эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений  $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Зафиксированы уровни прогнозируемых температур во всех областях модели (скальный массив – подошва и кровля выработки, воздух, встроенная железобетонная конструкция).

Самый важный момент выполненного анализа – условие неперевышения критериальных значений температуры объекта хранения неперерабатываемых типов ОЯТ подтверждается. Однако, если в модели несжимаемой жидкости прогрев скального массива прогнозировался до уровня  $40^\circ\text{C}$ , а поверхности инженерной конструкции до  $50^\circ\text{C}$  [11, 12], то в более полной модели «несжимаемого идеального газа» прогнозные значения температуры иные.

Анализ пространственно-временных распределений температуры в различных областях модели свидетельствует, что координаты точек с максимальными значениями температуры изменяются не только во времени, что естественно для нестационарной задачи, но и в пространстве при вариации значений указанных выше параметров ( $k_w$  и  $Q$ ).

Отметим несколько общих закономерностей поведения проанализированных графических зависимостей:

- уменьшение расхода воздуха приводит к прогревам (в разной степени) всех без исключения областей модели;
- увеличение эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений снижает прогнозные значения температуры скального массива вблизи подошвы и области тепловыделений, но увеличивает температуру поверхности инженерной конструкции, воздуха исходящей струи и скального массива кровли.

В таблице 3 представлены значения максимальных температур в различных областях модели при вариации коэффициента теплопроводности области тепловыделений и расхода подаваемого воздуха.

Таблица 3

**Расчетные значения максимальных температур в различных областях модели при вариациях  $k_w$  и  $Q$**

$k_w$ , Вт/(м·К)	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	Контролируемые области модели				
		Тепловыделения	Поверхность	Гранит_1	Гранит_2	Воздух
1,0	0,06	90,2	32,4	90,1	33,4	33,4
	0,18	82,7	22,5	82,6	22,3	22,3
	0,30	82,3	21,8	82,2	19,0	19,0
2,0	0,06	64,2	33,5	64,2	35,2	35,2
	0,18	56,4	24,9	56,4	22,8	22,8
	0,30	55,0	22,3	55,0	19,3	19,3

Примечание. Гранит\_1 – подошва, Гранит\_2 – кровля выработки

Максимальный разогрев имеет место при минимальных значениях расхода воздуха и эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений (консервативные условия). На расчетное время пять лет прогнозируемое значение температуры скального массива достигает  $90^{\circ}\text{C}$ , что близко к критериальному. Но следует обратить внимание, что к этому моменту времени скорость разогрева заметно снижается. А с учетом спада мощности остаточного тепловыделения можно гарантированно утверждать, что превышения порогового значения не произойдет. Кроме того, в запасе есть еще один аргумент непревышения критериального значения – используемая в расчетах геометрия модели конечна. В реальных условиях отток тепла будет происходить в больших объемах скальной породы, что дополнительно снизит значения прогнозируемой температуры.

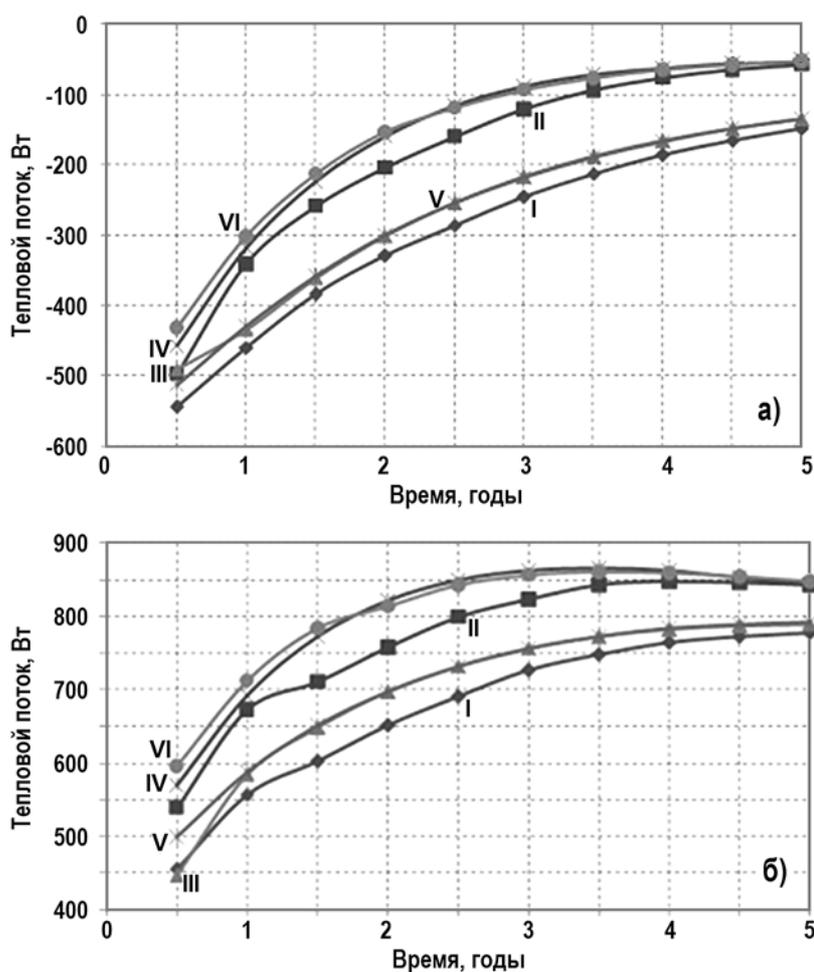


Рис. 4. Динамика тепловой мощности, покидающей область тепловыделений, через а) нижнее основание и б) верхнюю поверхность встроенной конструкции: I –  $0,06 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; II –  $0,06 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; III –  $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; IV –  $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; V –  $0,30 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; VI –  $0,30 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $2,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

В дополнение к анализу распределения температуры рассмотрен вопрос утечки тепла из области тепловыделений во времени. Использована опция программы, осуществляющая интегрирование физических параметров либо по границе, либо по объему. В данной ситуации интересен тепловой поток, покидающий указанную область. Анализ тепловых потоков через поперечные и продольные границы области тепловыделений показал, что доминирующими являются тепловые потоки через нижнее основание и верхнюю поверхность встроенной конструкции. Динамика указанных тепловых потоков

при вариации как расхода поступающего воздуха, так и эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений представлена на рис. 4. Знак «минус» для теплового потока через основание встроеной конструкции обусловлен выбором направления вертикальной оси.

На рисунках 4 хорошо видно, что влияние эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений более существенно, нежели влияние величины расхода воздуха. Графики четко группируются по три, следуя варьируемому расходу воздуха, в соответствии со значением эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений. При этом для расходов воздуха 0,18 и 0,30 м<sup>3</sup>/с графики тепловых потоков практически сливаются, а для расхода 0,06 м<sup>3</sup>/с график располагается несколько ниже двух других. Представляется, что поскольку тепловые потоки через рассматриваемые границы взаимосвязаны, вероятной причиной такого поведения графиков может быть именно структура скоростного поля над поверхностью встроеной конструкции (см. рис. 3). Напомним, что именно для минимального расхода воздуха 0,06 м<sup>3</sup>/с структура скоростного поля существенно отличается от структуры скоростных полей для других ситуаций.

Качественные и количественные показатели графиков рис. 4 показывают, что имеем дело с монотонными функциями. В терминах абсолютных величин на начальной стадии процесса прогрева производные анализируемых функций значительны, однако со временем скорость роста тепловых потоков постепенно падает. Прекрасно видно, что доминирует поток тепла в воздушную среду, в которой конвективный механизм переноса обеспечивает перенос и перемешивание тепла от поверхности конструкции и дальнейший его вынос из объекта хранения ОЯТ.

Поведение графиков на рис. 4б свидетельствует, что при эффективном коэффициенте теплопроводности материала конструкции 1,0 Вт/(м·К) тепловой поток выходит на свое максимальное значение (порядка 780 Вт) в течение пяти лет, а при увеличенном вдвое значении эффективного коэффициента теплопроводности процесс достижения максимальной величины порядка 850 Вт происходит раньше (3,0 – 3,5 года). Указанные моменты находятся в полном соответствии с ранее отмеченными особенностями динамики пространственного распределения температуры. В частности, это подтверждает прогнозируемое снижение максимальных температур скального массива с ростом эффективного коэффициента теплопроводности материала встроеной конструкции.

Графики рис. 4а иллюстрируют постепенное снижение по модулю величины теплового потока, что связано с постепенным нагревом вмещающего массива. Для максимального эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений (2,0 Вт/(м·К)) прогрев массива происходит заметно быстрее, что выражается выходом кривых рис. 4а практически на «плато» в течение пяти лет. При минимальном коэффициенте теплопроводности области тепловыделений (1,0 Вт/(м·К)) скальный массив получает большее количество тепла, что особенно характерно для ситуации с расходом воздуха 0,06 м<sup>3</sup>/с. Как видно на графике рис. 4а, для описываемой ситуации нагрев массива после пяти лет будет продолжаться, но с замедляющейся скоростью.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основании проведённого исследования можно сформулировать следующие выводы.

Построена компьютерная модель подземного объекта долговременного хранения ОЯТ в варианте встроеной железобетонной конструкции в двухмерной постановке. Учет влияния силы тяжести реализован в приближении «несжимаемого идеального газа».

Выполнен сравнительный анализ расчетных аэротермодинамических параметров в приближении «несжимаемого идеального газа» с результатами численных эксперимен-

тов в модели несжимаемой жидкости.

Продемонстрированы принципиальные отличия в структуре скоростных полей, прогнозируемых в объекте хранения на базе двух указанных моделей, при вариации расхода поступающего воздуха и эффективного коэффициента теплопроводности материала встроенной конструкции.

Выполнен анализ максимальных значений температуры в различных областях модели для рассмотренного диапазона значений эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений и расхода воздуха, подаваемого в объект. Отмечены физические особенности влияния указанных параметров на максимальные температуры областей модели.

Проанализирована динамика тепловых потоков, направленных в скальный массив через основание и с поверхности встроенной конструкции в воздушную среду. Отмечено доминирование теплового потока с поверхности конструкции. По мере постепенного прогрева массива доминирование увеличивается.

### Литература

1. 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, 2003. – 209 с.
2. Мельников Н.Н., Конухин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Катков Ю.Р., Смирнов Ю.Г., Орлов А.О., Рыбин Ю.Ю. Концепция подземного хранилища отработавшего ядерного топлива судовых ядерных энергетических установок на Кольском полуострове // Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9. – № 3. – С. 408-418.
3. Пункты сухого хранения отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности НП-035-02 // Вестник Госатомнадзора России. – 2002. – № 3. – С. 51-58.
4. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии НП-061-05 // <https://files.stroyinf.ru/Data1/47/47340/> (дата обращения 20.01.2020).
5. Калинин В.И., Крицкий В.Г., Токаренко А.И., Тихонов Н.С., Размашкин Н.В., Серова А.Л., Балицкая А.Н. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов: препринт. – СПб: ВНИПИЭТ, 2009. – 124 с.
6. Наумов В.А., Гусак С.А. Изучение закономерностей образования источников тепла в хранилищах контейнерного типа для отработавшего ядерного топлива реакторов малой мощности // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2019. – № 2 (11). – С. 105-115; DOI: <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.105-115>.
7. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
8. Документация COMSOL. Электронный ресурс: <https://www.comsol.ru/documentation> (дата обращения 20.01.2020).
9. Release 17.0 Documentations for ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc. – 2016.
10. Щеляев А. FlowVision – современный российский инструмент математического моделирования. Электронный ресурс: <https://sapr.ru/article/21879> (дата обращения: 21.08.2018).
11. Амосов П.В., Подшивалова А.В. Моделирование теплового режима подземного объекта хранения тепловыделяющих радиационно опасных материалов // Вестник МГТУ. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 562-566.
12. Амосов П.В., Подшивалова А.В. Особенности теплового режима подземного объекта изоляции тепловыделяющих материалов (контейнерный вариант). // Известия вузов Ядерная энергетика. – 2010. – № 3. – С. 133-140.
13. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
14. Амосов П.В., Новожилова Н.В. Двумерное численное моделирование азротермодинамики атмосферы карьера. // Сб. докл. Всероссийской научно-технической конференции «Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового

мировоззрения в освоении природных ресурсов.». – Апатиты: Горный институт Кольского научного центра РАН. – 2014. – С. 153-159.

15. Амосов П.В., Козырев С.А., Назарчук О.В. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в ANSYS FLUENT. // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2018. – № 44 (70). – С. 121-125; DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.44.121>.

16. Наука о Земле. Т. 21: Справочник физических констант горных пород. – М.: Мир, 1969. – 543 с.

17. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

18. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.

19. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. / Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодряконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

20. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика / Под. ред. Н.Б. Дортмана. – М.: Недра, 1984. – 455 с.

21. Horai K. Thermal conductivity of rock-forming minerals. // Journal of Geophysical Research. – 1971. – Vol. 76. – No. 5. – PP. 1278-1308.

22. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

23. Мельников Н.Н., Конохин В.П., Наумов В.А., Амосов П.В., Гусак С.А., Наумов А.В., Орлов А.О., Смирнов Ю.Г., Караваева Е.В., Новожилова Н.В., Климин С.Г. Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на европейском севере России. – Апатиты: КНЦ РАН, 2010. – 305 с.

Поступила в редакцию 29.01.2020 г.

#### Автор

Амосов Павел Васильевич, в.н.с., к.т.н.,  
E-mail: p.amosov@ksc.ru

UDC 536.2:519.6

## FORECAST OF THE THERMAL REGIME OF AN UNDERGROUND STORAGE FACILITY FOR HEAT-GENERATING MATERIALS UNDER MIXED CONVECTION CONDITIONS

Amosov P.V.

Institute of North Industrial Ecology Problems, Federal Research Center of the Kola Scientific Center (INIEP KSC RAS)

14a Fersman Str., 184209 Apatity, Russia

#### ABSTRACT

The paper presents the results of a study by numerical simulation methods of the thermal regime of an underground facility for long-term storage of spent nuclear fuel in the version of an built-in reinforced concrete structure. A multiphysical computer model in a two-dimensional setting was built in the COMSOL program. The mathematical model is based on the continuity equation, Navier-Stokes equations and the general heat transfer equation. The conditions of mixed convection are taken into account in the «incompressible ideal gas» approximation, in which the thermophysical parameters of air are a function of temperature only. The choice of thermophysical parameters of different parts of the model and a set of boundary conditions for the solved ones are substantiated. For two parameters of the model, the following values

are taken: the air flow rate which provides the velocity at the input boundary of 0.01, 0.03 and 0.05 m/s, and the effective thermal conductivity of the material of the integrated design is 1.0 and 2.0 W/(m·K). Numerical experiments were performed for a period of up to 5 years of fuel storage. The formation features of the velocity fields in the facility are noted when the values of these parameters are changed. Special emphasis is given to the fundamental difference between the non-stationary structure of the velocity fields predicted in the model of an «incompressible ideal gas» and the «frozen» picture of aerodynamic parameters in the model of an incompressible fluid. An analysis is made of the dynamics of spatial distributions of temperature fields in different areas of the model. The distribution features of maximum temperature values in the different areas of the model are also noted. It is shown that the requirements for not exceeding the criterion temperature values are met when the facility is operated under conservative ventilation conditions in terms of the air flow rate and the thermal conductivity coefficient of the material of the built-in structure. The dynamics of heat flows directed into the rock mass through the base and from the surface of the built-in structure into the air is analyzed. The heat flow dominance from the structure surface is noted. Finally, the influence of the effective coefficient of thermal conductivity of the material of the built-in structure and the air flow rate on the value of heat fluxes into the air and rock mass is demonstrated.

**Key words:** heat-producing materials, spent fuel, storage facility, numerical simulation, mixed convection, thermal safety.

#### REFERENCES

1. Melnikov N.N., Konukhin V.P., Naumov V.A., Amosov P.V., Gusak S.A., Naumov A.V., Katkov Y.R. *Spent Nuclear Fuel of Ship Power Plants in the European North of Russia*. Part II. Apatity. KNTs RAN Publ., 2003, 209 p. (in Russian).
2. Melnikov N.N., Konukhin V.P., Naumov V.A., Amosov P.V., Gusak S.A., Naumov A.V., Katkov Y.R., Smirnov Yu.G., Orlov A.O., Rybin Yu.Yu. Concept of Underground Storage of Spent Nuclear Fuel for Marine Nuclear Power Plants on the Kola Peninsula. *Vestnik MGTU*, 2006, v. 9, iss. 3, pp. 408-418 (in Russian).
3. Dry Storage Facilities for Spent Nuclear Fuel. NP Safety Requirements-035-02. *Vestnik Gosatomnadzora Rossii*, 2002, iss. 3, pp. 51-58 (in Russian).
4. Safety Rules for Storage and Transportation of Nuclear Fuel at Nuclear Energy Facilities NP-061-05. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data1/47/47340/> (accessed Jan 20, 2020) (in Russian).
5. Kalinkin V.I., Kritsky V.G., Tokarenko A.I., Tikhonov N.S., Razmashkin N.V., Serova A.L., Balitskaya A.N. *Storage of Spent Nuclear Fuel of Power Reactors*: Preprint. St-Petersburg. VNIPIET Publ., 2009, 124 p. (in Russian).
6. Naumov V.A., Gusak S.A. A Study on Formation Regularities of Heat Sources in the Cask Type Storage Facilities for Spent Nuclear Fuel of the Low-Power Reactors. *Vestnik Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2019, iss. 2 (11), pp. 105-115; DOI: <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.105-115> (in Russian).
7. Rzhnevsky V.V., Novik G.Ya. *Fundamentals of Rock Physics*. Moscow. Nedra Publ., 1978, 390 p. (in Russian).
8. *COMSOL Documentation*. Available at: <https://www.comsol.ru/documentation> (accessed Jan 20, 2020) (in Russian).
9. Release 17.0 Documentation for ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc. 2016.
10. Schelyaev A. FlowVision-modern Russian mathematical modeling tool. Available at: <https://sapr.ru/article/21879> (accessed Jan 20, 2020) (in Russian).
11. Amosov P.V., Podshivalova A.V. Modeling of the Thermal Regime of an Underground Storage Facility for Heat-Emitting Radiation-Hazardous Materials. *Vestnik MGTU*. 2010, v. 13, iss. 3, pp. 562-566 (in Russian).

12. Amosov P.V., Podshivalova A.V. Features of the Thermal Regime of an Underground Object of Insulation of Heat-Generating Materials (Container Version). *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*, 2010, no. 3, pp. 133-140 (in Russian).
13. Egorov V.I. *Application of Computers for Solving Problems of Thermal Conductivity*. Tutotial. St. Petersburg. SPGUITMO Publ., 2006, 77 p. (in Russian).
14. Amosov P.V., Novozhilova N.V. Two-dimensional numerical simulation of atmosphere aerothermodynamic of open pit. *Proc. of the All-Russian Sci.-Tech. Conf «Ekologicheskaya strategiya razvitiya gornodobyvayushej otrasli – formirovanie novogo mirovozzreniya v osvoenii prirodnyh resursov»*. Apatity. Gornyj Institut Kol'skogo Nauchnogo Tsentra RAN Publ., 2014, pp. 153-159 (in Russian).
15. Amosov P.V., Kozyrev S.A., Nazarchuk O.V. Development of a computer model of aerothermodynamics of the pit open atmosphere in ANSYS FLUENT. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Instituta (Tehnicheskogo Universiteta)*, 2018, iss. 44 (70), pp. 121-125; DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.44.121> (in Russian).
16. *Earth Science. Vol. 21: Handbook of Physical Constants of Rocks*. Moscow. Mir Publ., 1969, 543 p. (in Russian).
17. Vargaftik N.B. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow. Nauka Publ., 1972, 720 p. (in Russian).
18. Pekhovich A.I., Zhidkikh V.M. *Calculations of the Thermal Regime of Solids*. Leningrad. Energia Publ., 1968, 304 p. (in Russian).
19. *Handbook (Cadastre) of Physical Properties of Rocks*. N.V. Melnikov, V.V. Rzhovsky, M.M. Protodyakonov (Eds). Moscow. Nedra Publ., 1975, 279 p. (in Russian).
20. *Physical Properties of Rocks and Minerals (Petrophysics): Handbook of Geophysics*. N.B. Dortman (Ed.). Moscow. Nedra Publ., 1984, 455 p. (in Russian).
21. Horai K. Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research*. 1971, v. 76, iss. 5, pp. 1278-1308.
22. Chirkin V.S. *Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials*. Moscow. Atomizdat Publ., 1968, 485 p. (in Russian).
23. Melnikov N.N., Konukhin V.P., Naumov V.A., Amosov P.V., Gusak S.A., Naumov A.V., Orlov A.O., Smirnov Yu.G., Karavaeva E.V., Novozhilova N.V., Klimin S.G. *Scientific and Engineering Aspects of Safe Storage and Disposal of Radiation-Hazardous Materials in the European North of Russia*. Apatity. KNTS RAN Publ., 2010, 305 p. (in Russian).

**Author**

Amosov Pavel Vasilievich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: p.amosov@ksc.ru