

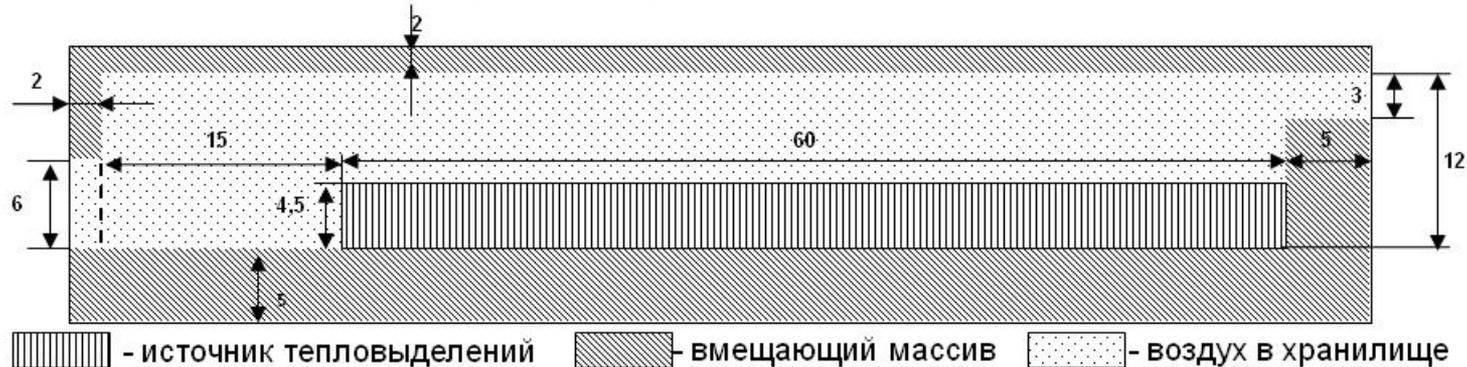
XVII Всероссийская (с международным участием)
Ферсмановская научная сессия
Апатиты, Мурманская область
6-8 апреля 2020 г.

**К вопросу выбора начальных аэродинамических
условий в оценке тепловой безопасности объекта
хранения тепловыделяющих материалов**

Амосов П.В.
*Институт проблем промышленной экологии
Севера КНЦ РАН, Апатиты*

Объект исследования – подземное хранилище отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) с использованием встроенной железобетонной конструкции.

По требованиям тепловой безопасности в процессе хранения необходимо обеспечить отвод остаточных тепловыделений ОЯТ, который должен быть организован так, чтобы исключить возможность перегрева: для поверхности встроенной конструкции 358 К (85 °С), для скального массива 373 К (100 °С).



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

Цель – исследовать влияние выбора начальных аэродинамических условий на:

- 1) аэротермодинамику атмосферы подземного модуля хранения ОЯТ;
- 2) результаты прогнозных оценок тепловой безопасности объекта.

Основные управляющие уравнения

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} = \nabla \cdot [-pI + \eta(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T) - (2\eta/3 - k)(\nabla \cdot \vec{u})I] + (\rho - \rho_0)\vec{g} \\ \nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0 \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (-k\nabla T + \rho C_p T\vec{u}) = q_w \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Режим неизотермического потока} \\ \\ \text{Перенос тепла} \end{array}$$

Приближение «несжимаемого идеального газа»

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = p_0 \cdot \mu / (R \cdot T) \\ \lg(k) = (-3,723 + 0,865 \cdot \lg(T)) \\ \eta = 6,0 \cdot 10^{-6} + 4,0 \cdot 10^{-8} \cdot T \end{array} \right.$$

Объемная мощность остаточных тепловыделений

$$q_w = 7,624 - 0,184 \cdot t + 0,0023 \cdot t^2 - 1,376 \cdot 10^{-5} \cdot t^3$$

Продолжительность времени моделирования тепловой задачи 5 лет.

Обозначения и терминология соответствуют используемым в программе COMSOL.

Значения физических параметров областей модели

| | Температура, К | Теплоемкость, Дж/(кг·К) | Теплопроводность, Вт/(м·К) | Плотность, кг/м ³ | Динамическая вязкость, 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 k_w | 5860 | |

Значения расхода воздуха Q : 0,06, 0,18 и 0,30 м³/с.

Рассмотрено два варианта начальных аэродинамических условий:

вариант 1 – решение «стартует» практически с нулевых значений компонентов скорости;

вариант 2 – решению предшествует этап расчета стационарного поля скорости, который выполняется в приближении несжимаемой жидкости.

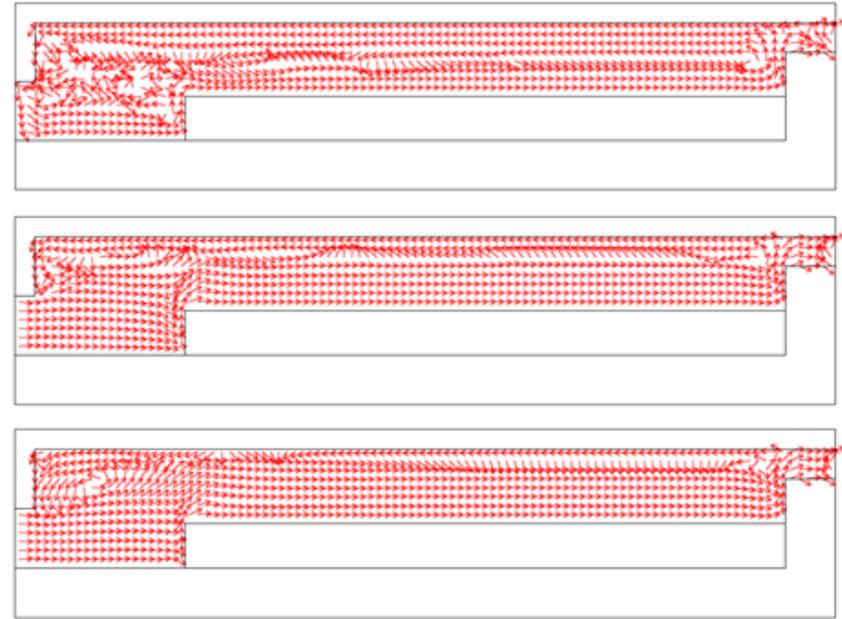
Результаты расчетов и их анализ

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.

Вариант 1

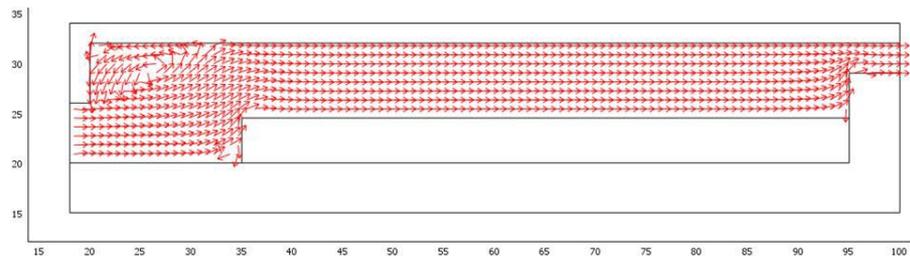


Вариант 2



«Мгновенная» картина структуры поля скорости на 5 лет моделирования при эффективном коэффициенте теплопроводности области тепловыделений $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ при вариации расхода поступающего воздуха Q (верхний $0,06$, средний $0,18$ и нижний $0,30 \text{ м}^3/\text{с}$)

Структура полей скорости, которые рассчитываются с учетом сил плавучести, **существенно** отличается от той, что получается в модели несжимаемой жидкости.



Структура поля скорости в модели несжимаемой жидкости

Краткий анализ

При расходе воздуха $0,06 \text{ м}^3/\text{с}$ (верхние картинки) обратный поток воздуха в середине объекта занимает практически половину высоты пространства между поверхностью железобетонной конструкции и кровлей.

При расходе воздуха $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ (средние картинки) область обратного потока вдоль кровли сокращается примерно на треть.

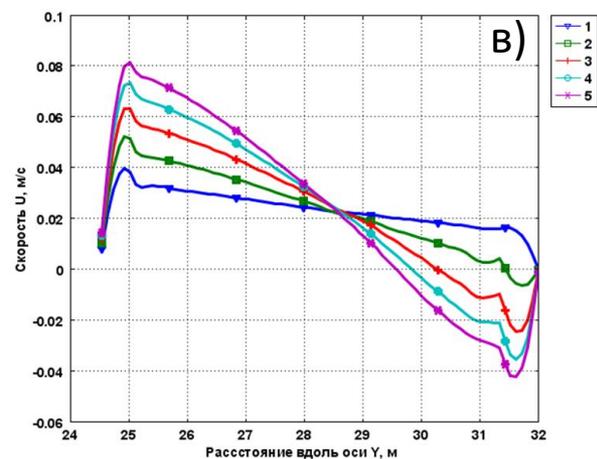
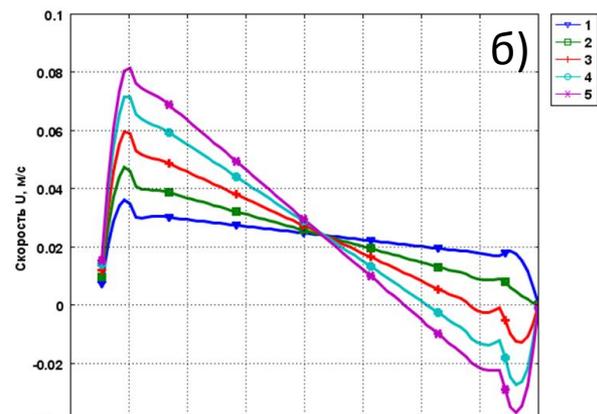
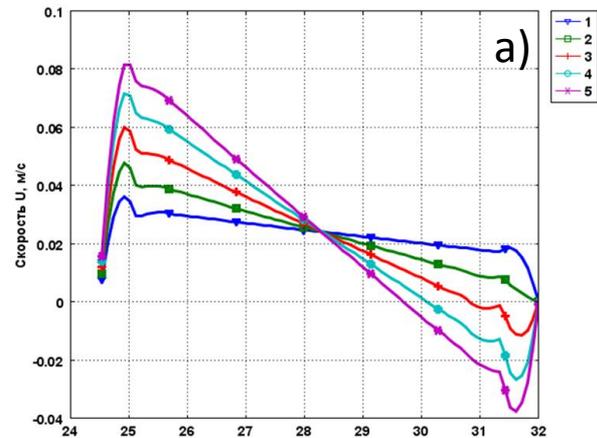
При расходе воздуха $0,30 \text{ м}^3/\text{с}$ (нижние картинки) обратный поток на рассматриваемый момент времени практически исчезает для **варианта 1** и размещается лишь вдоль кровли для **варианта 2**.

Для 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.

Выполнен анализ пространственно-временных распределений горизонтальной компоненты скорости в трех сечениях модели:

- сечение 70 м;
- сечение 80 м;
- сечение 90 м.

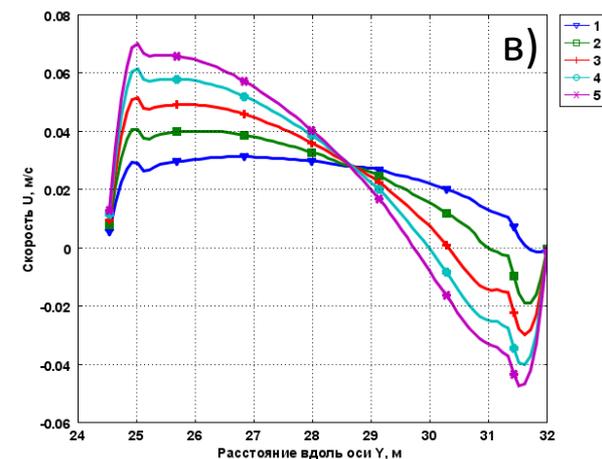
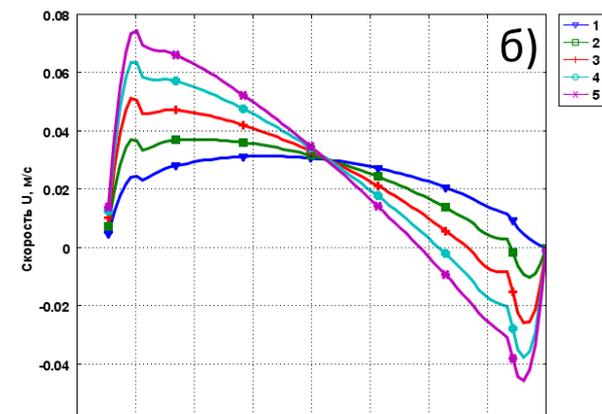
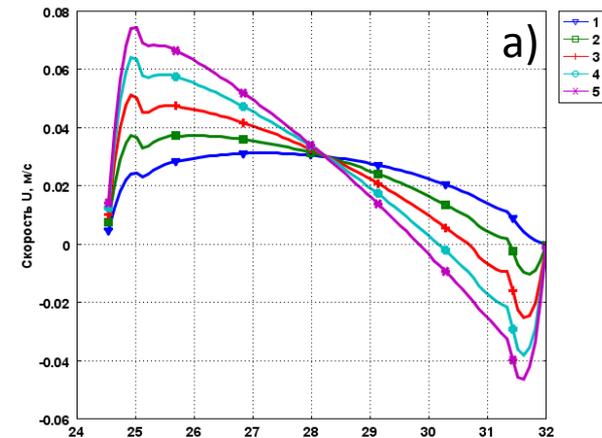
Вариант 1



Динамика пространственного распределения горизонтальной компоненты скорости для расхода воздуха $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ и эффективного коэффициента теплопроводности k_w области тепловыделений $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в трех сечениях модели:

а) 70 м; б) 80 м и в) 90 м
(в легенде – время в годах)

Вариант 2



Вариант 1

В течение почти 1,5 лет движение воздуха однонаправленно в сторону выходной границы. Однако, с течением времени в разных сечениях под кровлей начинает формироваться обратный поток: в сечении 90 м примерно через 1,5 года, а в сечениях 70 и 80 м отрицательные горизонтальные скорости начинают появляться после 2 лет от начала процесса моделирования. Область обратного потока постепенно расширяется и к 5 годам процесса моделирования составляет почти 2,5 м.

Вариант 2

В течение почти 1 года движение воздуха однонаправленно в сторону выходной границы. Однако, с течением времени в разных сечениях под кровлей опять же начинает формироваться обратный поток: в сечении 90 м еще до 1 года, а в сечениях 70 и 80 м отрицательные горизонтальные скорости начинают появляться сразу после 1,5 лет. Область обратного потока постепенно расширяется и к 5 годам процесса моделирования составляет примерно 2,3-2,4 м.

Абсолютная величина горизонтальной компоненты скорости прямого и обратного потоков воздуха со временем увеличивается. Максимальное абсолютное значение горизонтальной компоненты скорости прямого потока практически в два раза выше обратного. Сами же абсолютные значения горизонтальной компоненты скорости составляют несколько сотых метра в секунду. В **варианте 2** для прямого потока абсолютные значения горизонтальной компоненты скорости немного уступают по сравнению с **вариантом 1**. Для обратного потока имеем иную ситуацию: в **варианте 1** абсолютные значения горизонтальной компоненты скорости немного уступают по сравнению с **вариантом 2**.

Отметим два момента.

Во-первых, в моделях несжимаемой жидкости, на базе которой выполнены исследования 2010 г., и учета плавучести в приближении «несжимаемого идеального газа» конвективный механизм переноса тепла, который является доминирующим в воздушной среде, **существенно** различается.

Если в модели несжимаемой жидкости имеем практически однонаправленный перенос тепла к выходу из объекта хранения, то в модели учета плавучести конвективный перенос тепла варьируется как во времени, так и в пространстве (независимо от выбора варианта начальных аэродинамических условий).

Результатом указанных отличий могут быть определенные изменения в итоговых показателях, как тепловой безопасности, так и в целом теплового режима объекта.

Во-вторых, выбор начальных аэродинамических условий вносит свой вклад, хотя и менее значительный в конечный результат теплового состояния материалов объекта хранения.

Выполнен анализ пространственно-временных распределений температуры в трех сечениях модели:

для области тепловыделений и гранита вблизи подошвы – сечение 70 м;

для поверхности железобетонной конструкции – сечение 80 м;

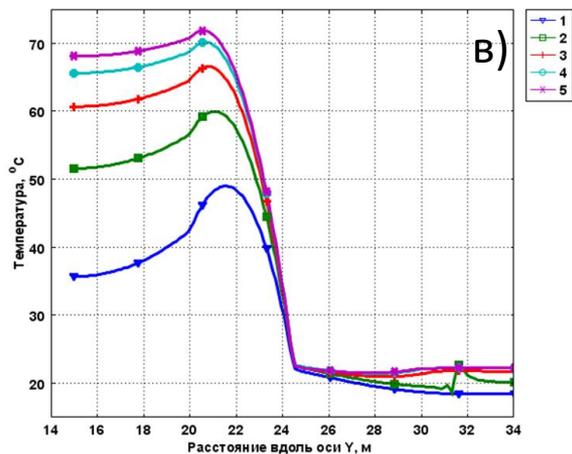
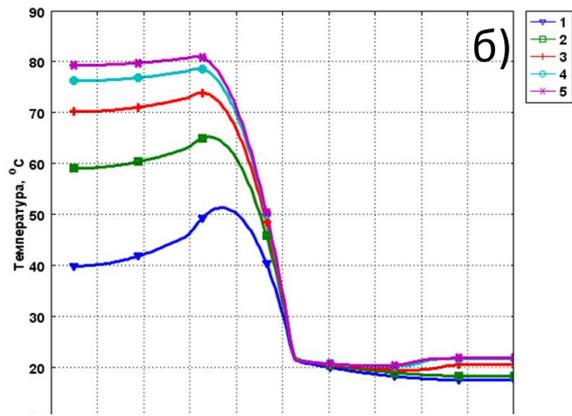
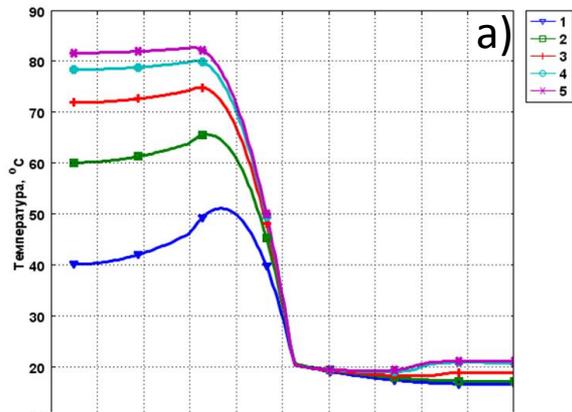
для гранита вблизи кровли и воздуха – сечение 90 м.

Графики пересекают все области модели (скальный массив – подошва и кровля выработки, воздух, встроенная железобетонная конструкция), что позволяет фиксировать уровни прогнозируемых температур во всех перечисленных областях модели.

Самый важный момент выполненного анализа – **тепловая безопасность** объекта хранения неперерабатываемых типов ОЯТ **подтверждается**.

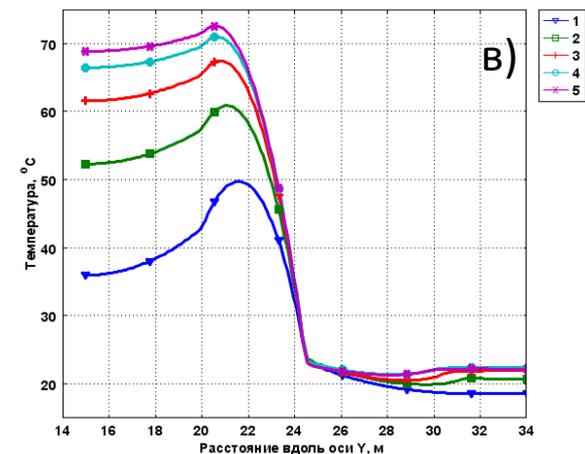
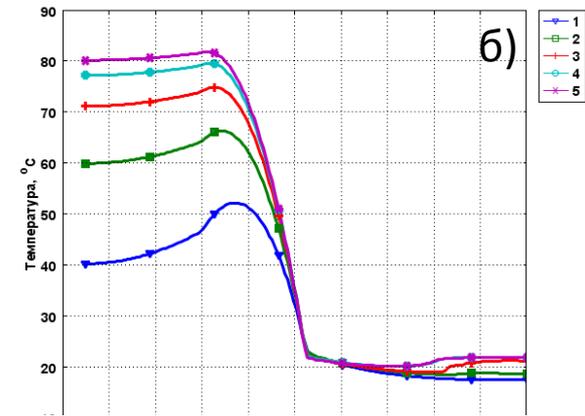
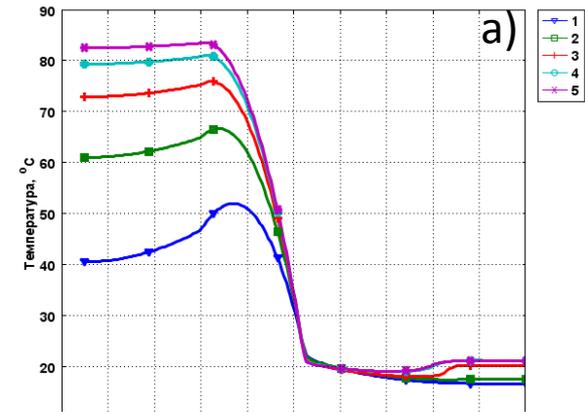
Однако, если в модели несжимаемой жидкости прогрев скального массива прогнозировался до уровня $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а поверхности инженерной конструкции до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в более полной модели, учитывающей эффект плавучести (независимо от выбора начальных аэродинамических условий), прогнозные значения температуры иные.

Вариант 1



Динамика
пространственного
распределения температуры
для варианта расхода
воздуха $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ и
эффективного
коэффициента
теплопроводности k_w
области тепловыделений $1,0$
 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в трех сечениях
модели:
а) 70 м; б) 80 м и в) 90 м
(в легенде – время в годах)

Вариант 2



Анализ пространственного распределения температуры в различных областях модели свидетельствует:

координаты точек с максимальными значениями температуры изменяются не только во времени, что естественно для нестационарной задачи, но и при вариации значений эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений k_w и расхода воздуха Q («миграция» областей с максимальным разогревом).

Общие закономерности поведения 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.

Расчетные значения максимальных температур в различных областях модели при вариации k_w и Q (числитель – вариант 1, знаменатель – вариант 2), °С

| k_w , Вт/(м·К) | Q , м³/с | Контролируемые области модели | | | | |
|---------------------|---------------|-------------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| | | Тепловыделения | Поверхность | Гранит_1* | Гранит_2* | Воздух |
| 1,0 | 0,06 | 90,2 / 90,3 | 32,4 / 32,6 | 90,1 / 90,2 | 33,4 / 33,7 | 33,4 / 33,7 |
| | 0,18 | 82,7 / 83,5 | 22,5 / 25,0 | 82,6 / 83,4 | 22,3 / 24,4 | 22,3 / 24,4 |
| | 0,30 | 82,3 / 83,4 | 21,8 / 24,9 | 82,2 / 83,3 | 19,0 / 19,5 | 19,0 / 19,5 |
| 2,0 | 0,06 | 64,2 / 64,65 | 33,5 / 33,7 | 64,2 / 64,64 | 35,2 / 35,1 | 35,2 / 35,1 |
| | 0,18 | 56,4 / 56,4 | 24,9 / 25,2 | 56,4 / 56,4 | 22,8 / 22,8 | 22,8 / 22,8 |
| | 0,30 | 55,0 / 55,0 | 22,3 / 22,4 | 55,0 / 55,0 | 19,3 / 19,2 | 19,3 / 19,2 |

Примечание. Гранит_1 – подошва и Гранит_2 – кровля выработки.

Максимальный разогрев имеет место при минимальных значениях расхода воздуха и эффективного коэффициента теплопроводности области тепловыделений.

На расчетное время 5 лет прогнозируемое значение температуры скального массива достигает 90 °С, 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.

Заключение

- построены компьютерные модели аэротермодинамики подземного объекта долговременного хранения ОЯТ в варианте встроенной железобетонной конструкции в двухмерной постановке для двух вариантов начальных аэродинамических условий. Учет эффекта плавучести реализован в приближении «несжимаемого идеального газа»;
- рассмотрено два варианта начальных аэродинамических условий:
в **варианте 1** совместное решение системы уравнений начинается практически с нулевых значений компонентов скорости, в **варианте 2** есть предварительный этап расчета стационарного поля скорости, который выполняется в приближении несжимаемой жидкости;
- продемонстрированы принципиальные отличия в структурах скоростных полей, прогнозируемых в объекте хранения на базе двух моделей несжимаемой жидкости и учета сил плавучести для двух вариантов начальных аэродинамических условий, при вариации расхода поступающего воздуха и эффективного коэффициента теплопроводности встроенной конструкции;
- доказана тепловая безопасность функционирования объекта для режима вынужденной конвекции воздуха для **обоих вариантов** начальных аэродинамических условий: разогревы поверхности встроенной конструкции и вмещающего скального массива не превышают установленных критериальных значений;
- выполнен анализ максимальных значений температуры в различных областях моделей для **обоих вариантов** начальных аэродинамических условий при вариации параметров моделей.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!