



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Численное моделирование теплового и напряженного состояния контейнера и массива окружающих пород

XVI международная конференция
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

Боровский И.О.

г. Снежинск, 2023

Введение

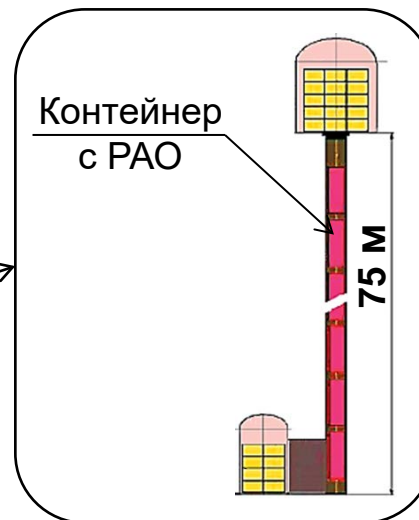
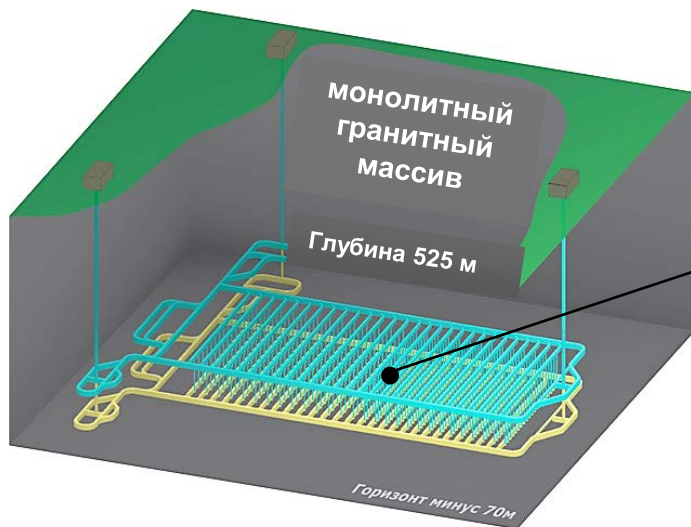
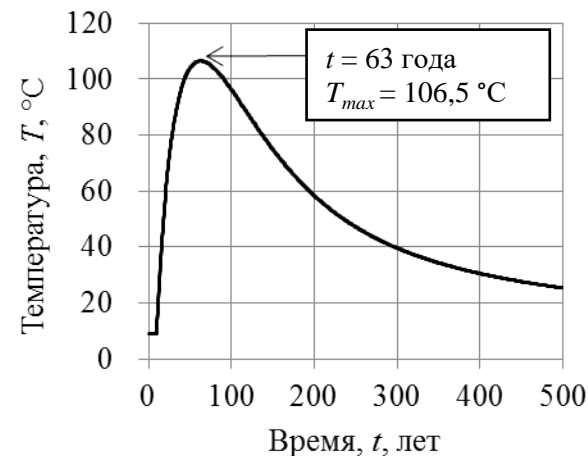
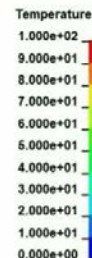


Схема расположения контейнеров с РАО в вертикальной скважине

Схема расположения РАО в ПГЗРО

Time = 0



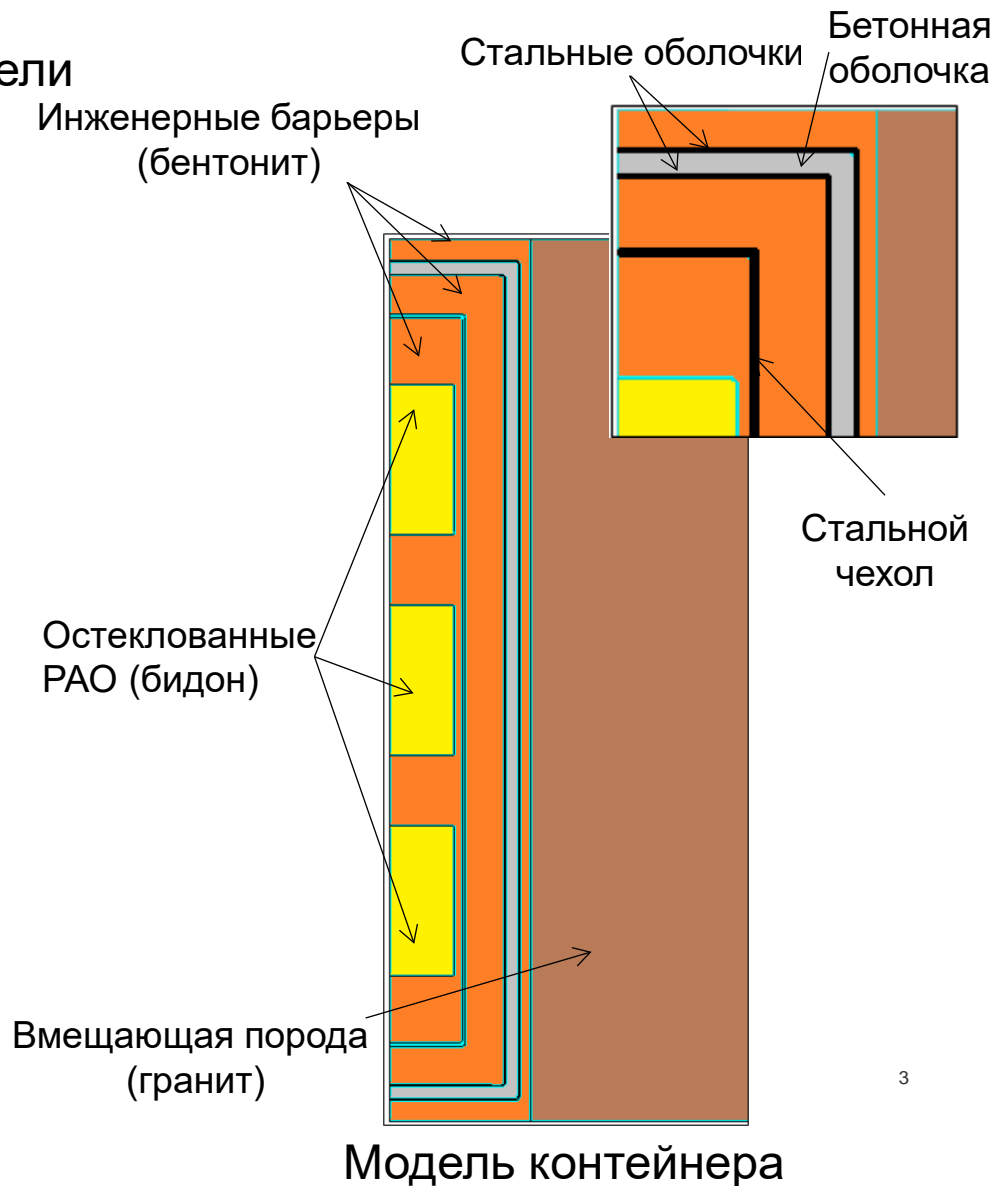
Распределение температуры в течение 500 лет в массиве окружающих пород.

Изменение максимальной температуры в 8 камеры

Описание модели контейнера

Геометрические характеристики модели контейнера.

Барьер	Толщина барьера (диаметр упаковки), мм
Стекломатрица РАО	600
Стальная оболочка стекломатрицы	15
Чехол с загрузкой	700
Прессованный бентонит	150
Внутренняя стальная оболочка ИК	3
Бетонная оболочка ИК	60
Внешняя стальная оболочка ИК	5
ИК с загрузкой	1200
Прессованный бентонит	50
Скважина с загрузкой	1300
Гранит	7500



Описание модели контейнера

Теплофизические свойства материалов

Материал	Теплопроводность Вт/(м·К)	Теплоемкость Дж/(кг·К)	Плотность кг/м ³	Коэффициент линейного расширения, α , 1/К
Остеклованные РАО	2,4	800	2500	$8 \cdot 10^{-6}$
Вмещающая порода	2,91	840	2700	$28 \cdot 10^{-6}$
Инженерные барьеры	8,1	1500	2800	$0,8 \cdot 10^{-6}$
Бетон	1,28	837	2000	$12 \cdot 10^{-6}$
Сталь	14,9	500	7800	$16 \cdot 10^{-6}$

Физико-механические свойства материалов

Материал	Модуль упругости, Е, МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Предел прочности, МПа	
			$\sigma_{сж}$	σ_p
Остеклованные РАО	$7 \cdot 10^4$	0,22	500	35
Вмещающая порода	$6,2 \cdot 10^4$	0,2	155	8
Инженерные барьеры	940	0,25	7,5	0,8
Бетон	$0,2 \cdot 10^5$	0,18	40	-
Сталь	$2 \cdot 10^5$	0,3	480	

ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ (ТЕРМОУПРУГИХ) РАСЧЕТОВ МКЭ ПУТЕМ СРАВНЕНИЯ С АНАЛИТИЧЕСКИМИ РЕШЕНИЯМИ

Постоянное тепловыделение одного бидона

$$q_0 = 1 \text{ кВт/м}^3$$

Температура в граните:

$$T(t) = \frac{q_0 \cdot t \cdot V_6}{\rho \cdot C \cdot V_{гр}}$$

Переменное тепловыделение одного бидона

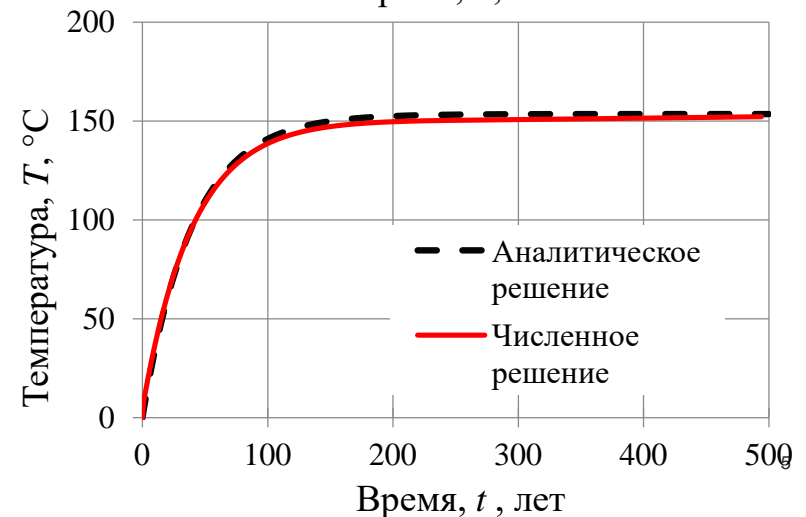
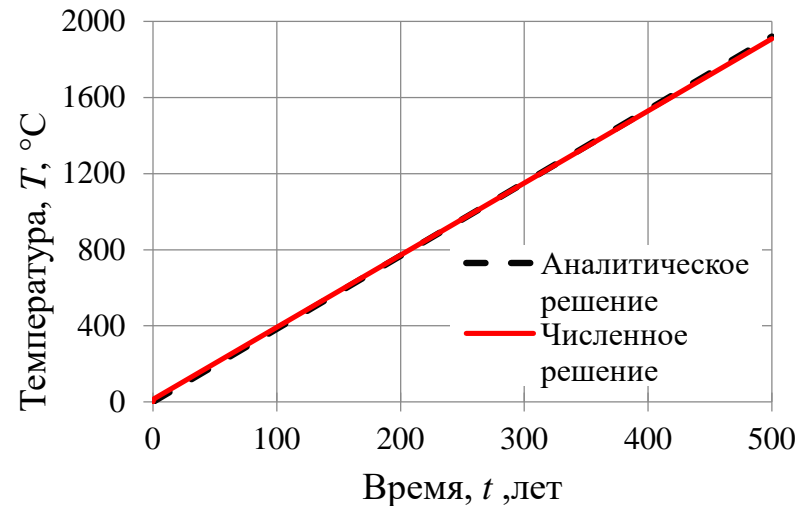
$$q(t) = q_0 \cdot e^{\frac{-t}{t_0}}$$

$q_0 = 1 \text{ кВт/м}^3$ – начальное тепловыделение.

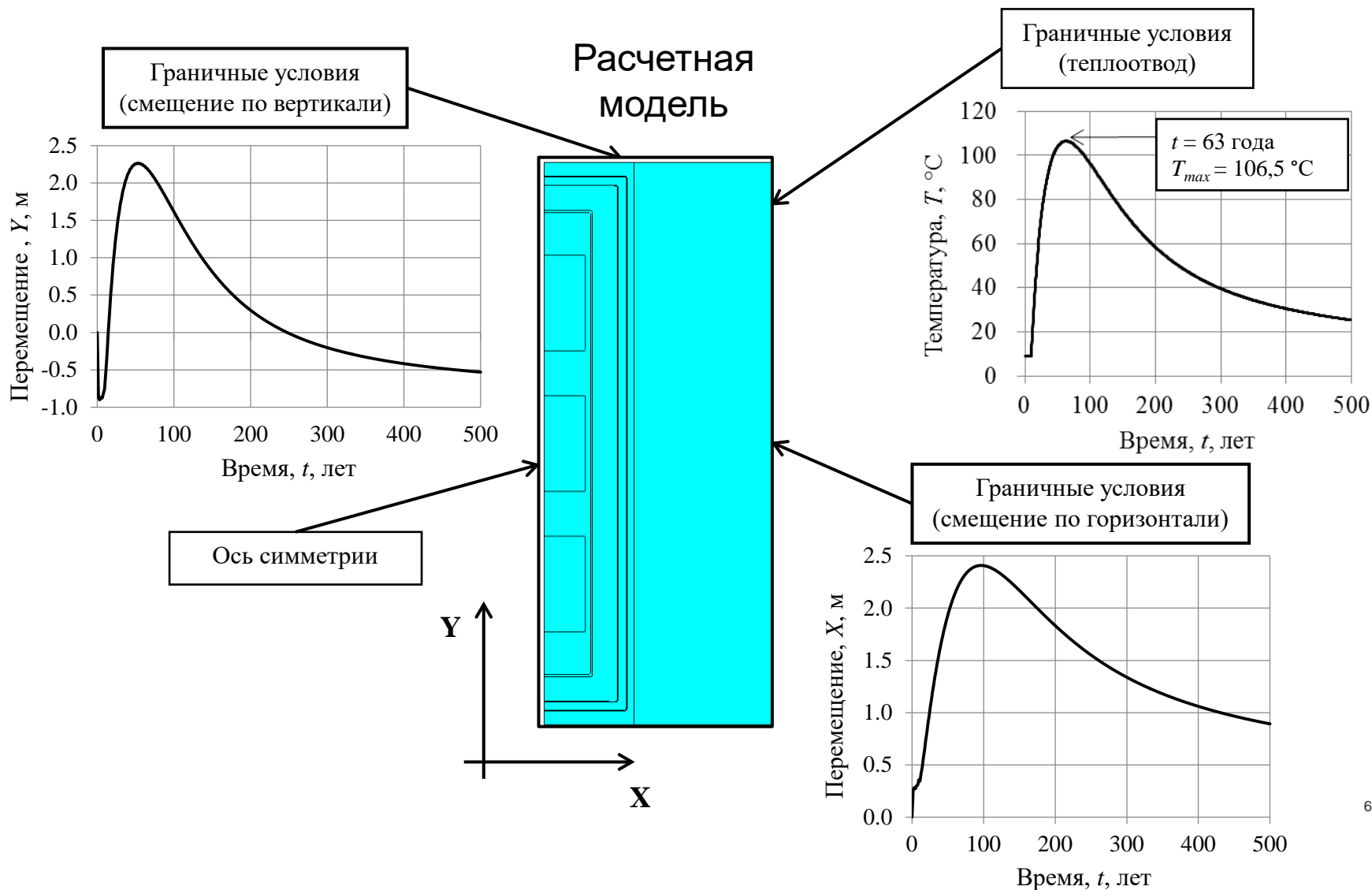
$t_0 = 40$ – время, за которое начальное тепловыделение уменьшается в e раз.

Температура в граните:

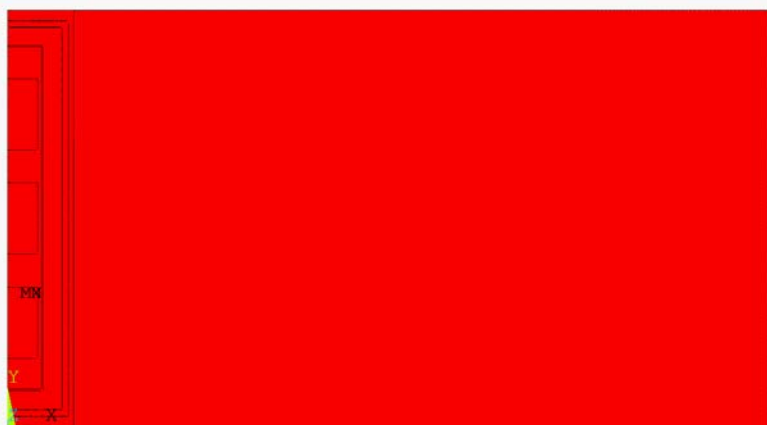
$$T(t) = \int_0^t \frac{q(t) \cdot t \cdot V_6}{\rho \cdot C \cdot V_{гр}} dt$$



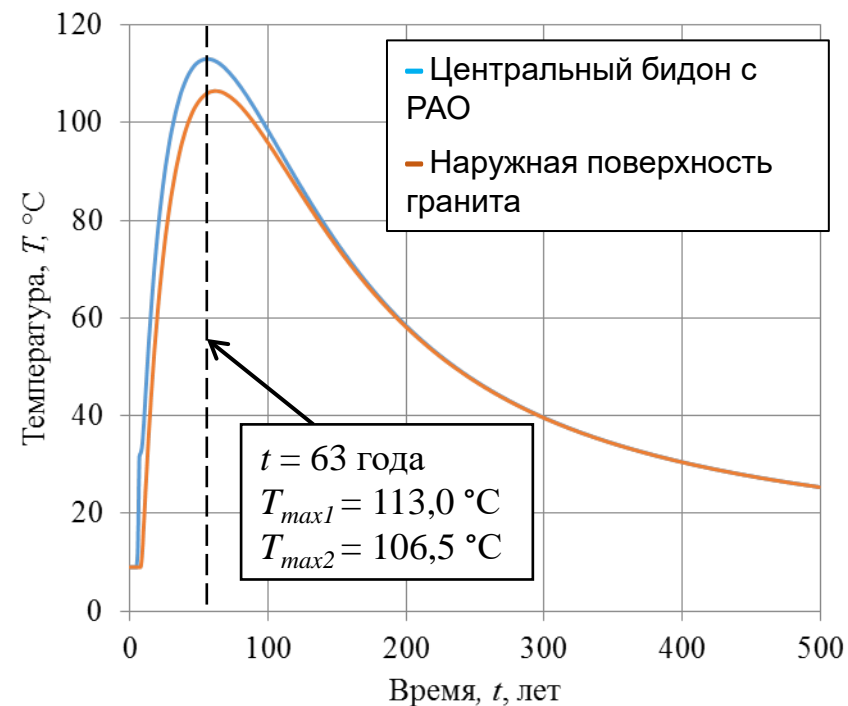
Анализ теплового состояния контейнера и массива окружающих пород



Анализ теплового состояния контейнера и массива окружающих пород

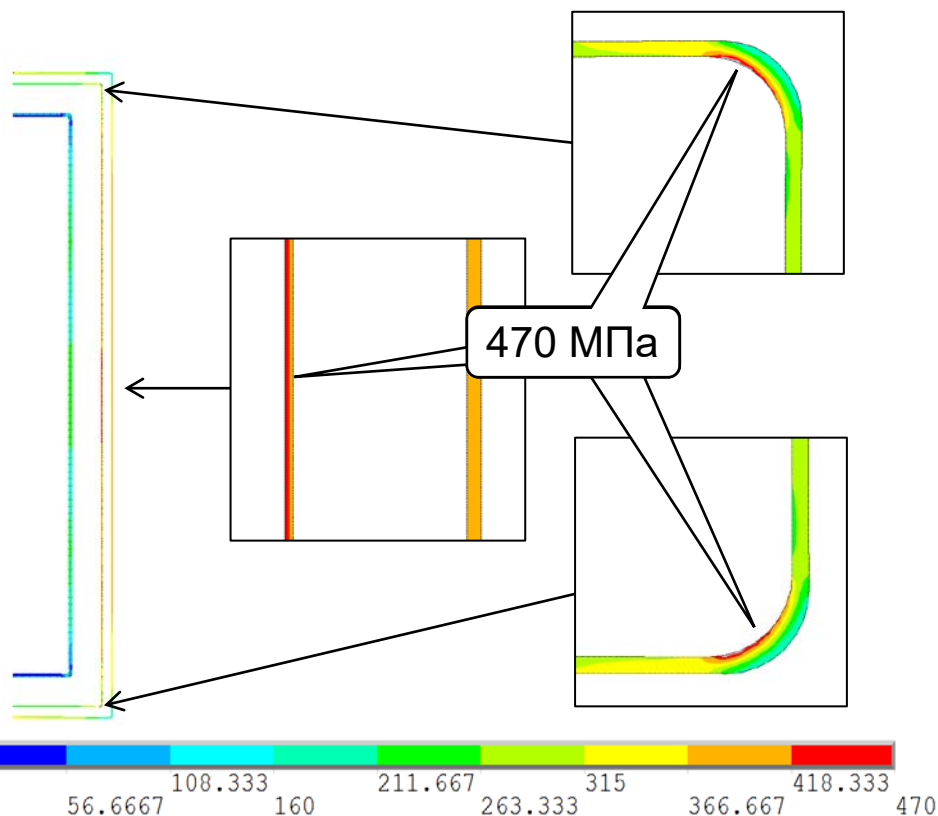


Распределение температуры в течение 500 лет в контейнере и массиве окружающих пород.

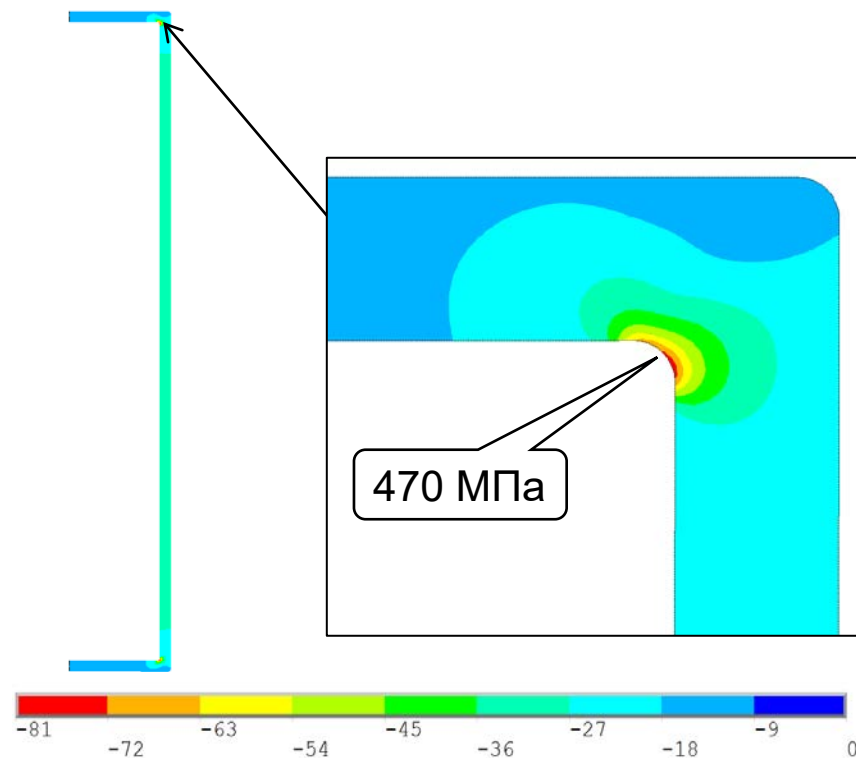


Изменение максимальной температуры в центральном бидоне и на наружной поверхности гранита.

Анализ напряженного состояния контейнера и массива окружающих пород

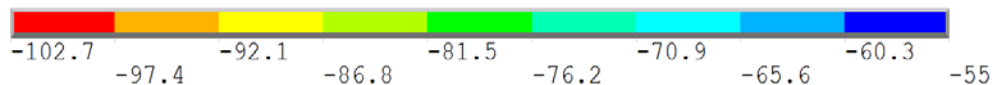
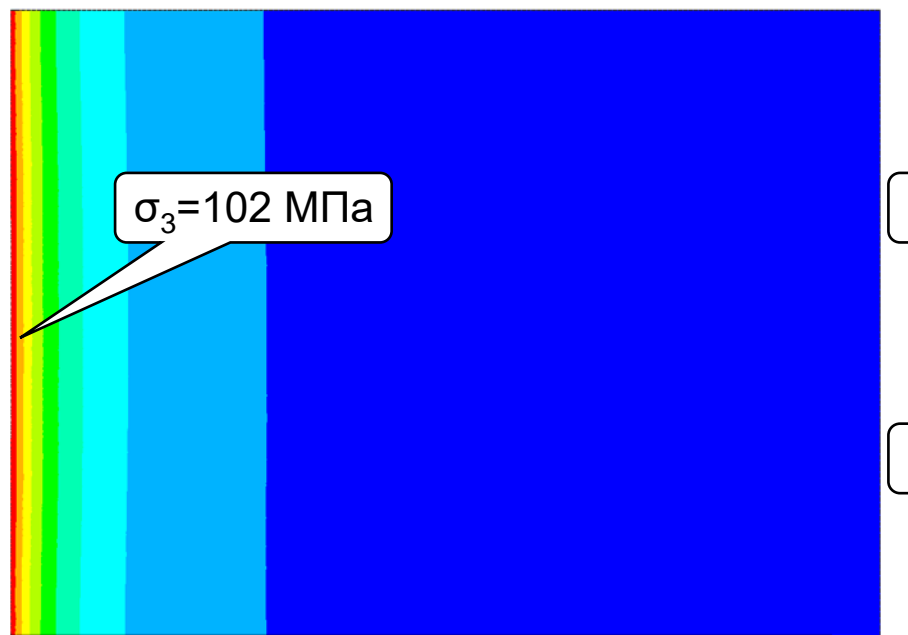


Распределение эквивалентных напряжений в стальных оболочках, МПа.

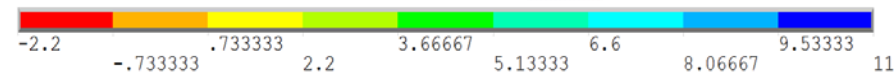
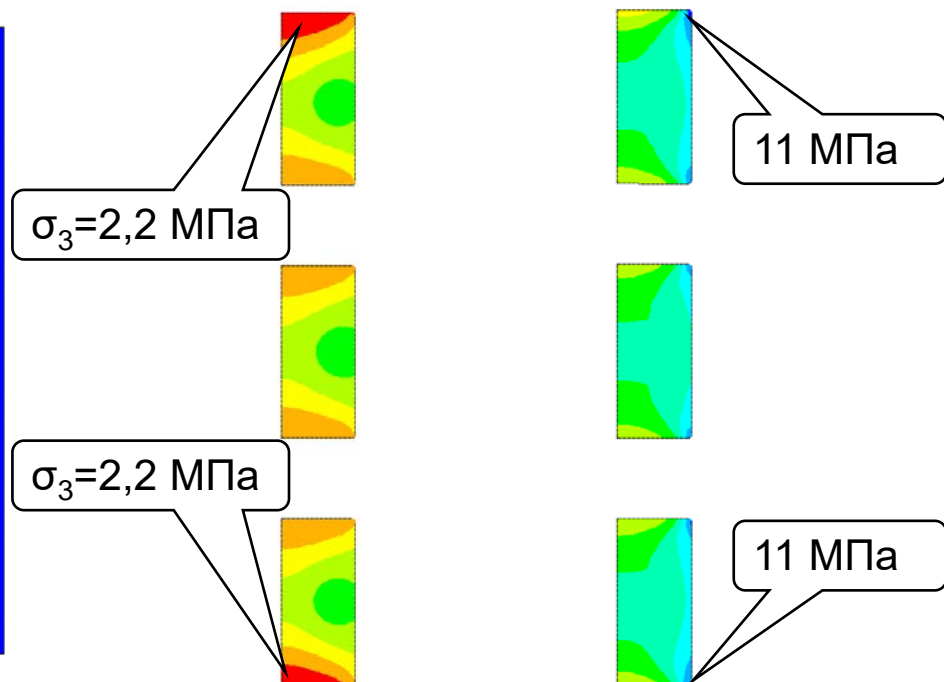


Распределение главного сжимающего напряжения в бетоне, МПа.

Анализ напряженного состояния контейнера и массива окружающих пород



Распределение главного сжимающего напряжения в граните, МПа.



Распределение главного сжимающего напряжения (слева) и главного растягивающего напряжения (справа) в РАО, МПа.

Анализ результатов расчета

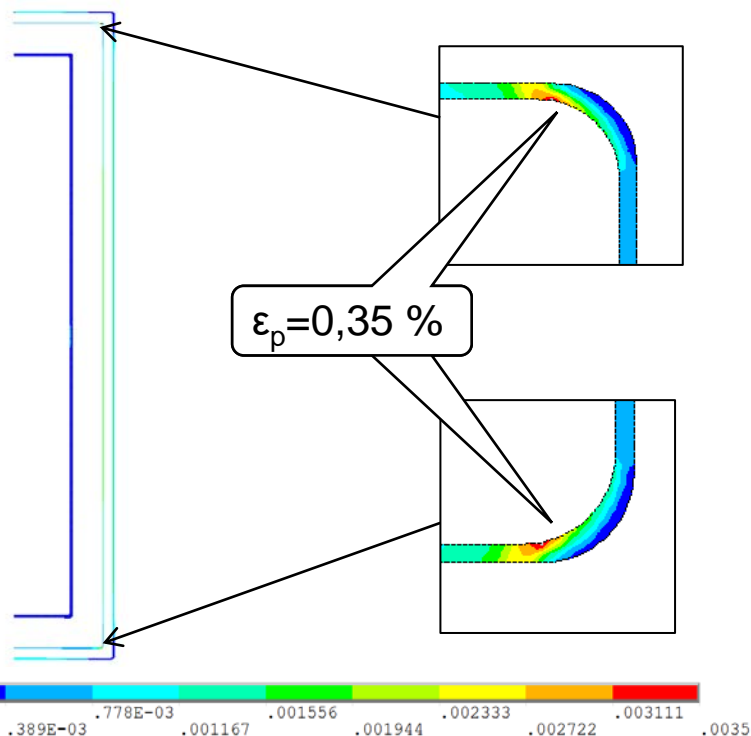
Максимальные значения главных напряжений в пластичных материалах.

Материал	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$, МПа	Допустимое значение, МПа	Коэффициент запаса
Сталь (чехол)	236	480	2,0
Сталь (внутренняя оболочка)	470		1,0
Сталь (внешняя оболочка)	391		1,2

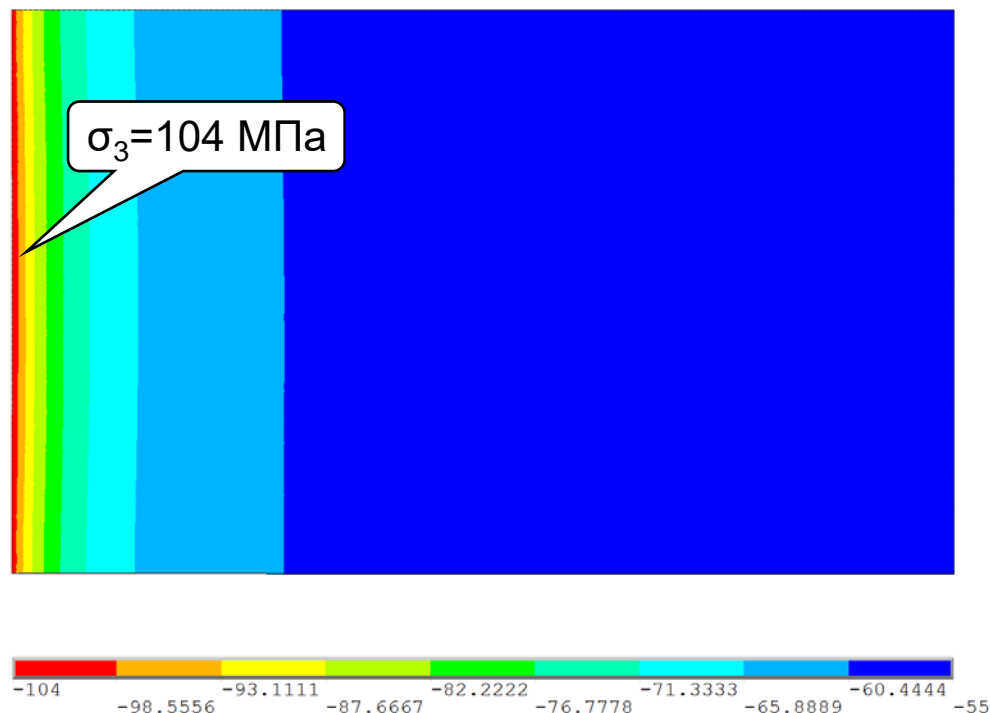
Максимальные значения главных напряжений в хрупких материалах.

Материал	σ_1 , МПа	σ_3 , МПа	τ , МПа	Коэффициент запаса	
Гранит	0	102	44	1,5	
Бетон	0	80	40	0,5	
РАО	средний	9,5	0,9	4,9	3,7
	верхний	11,1	2,3	5,6	3,1
	нижний	10,8	2,3	5,5	3,2

Анализ напряженного состояния контейнера и массива окружающих пород с учетом пластического деформирования материала

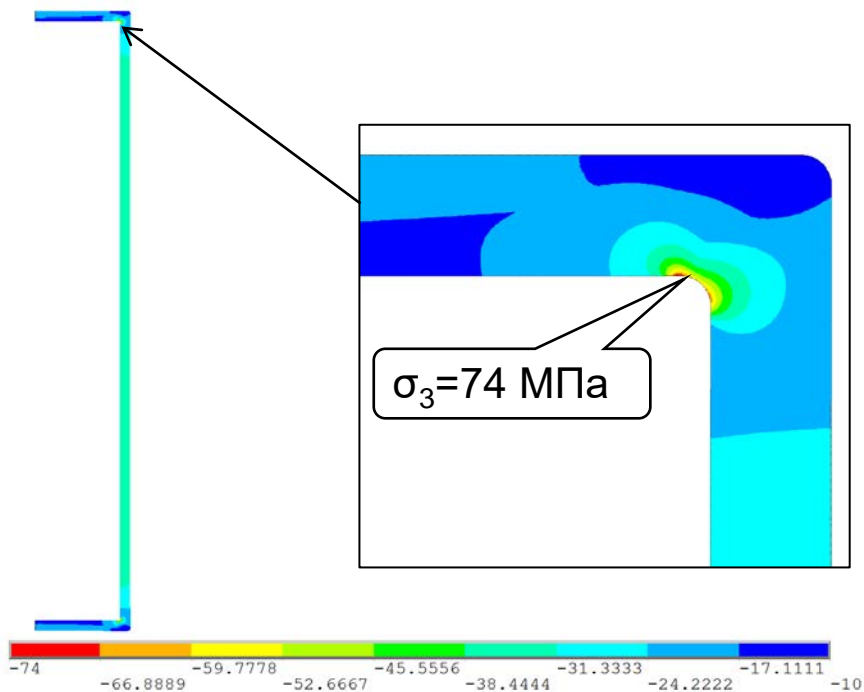


Распределение пластической деформации в стальных оболочках, отн.ед.

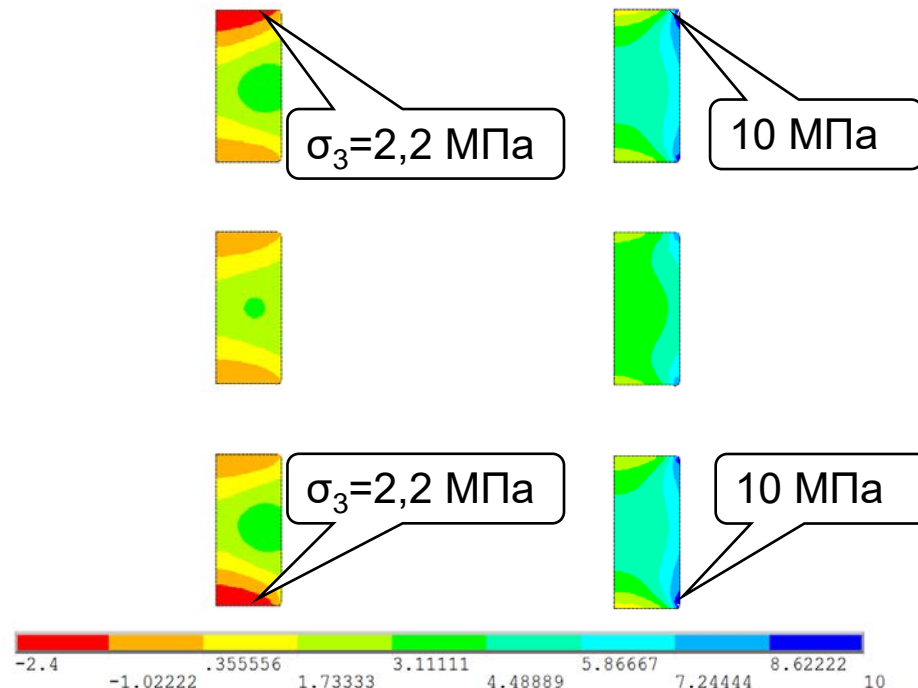


Распределение главного сжимающего напряжения в граните в момент достижения максимального значения, МПа.

Анализ напряженного состояния контейнера и массива окружающих пород с учетом пластического деформирования материала



Распределение главного сжимающего напряжения в бетоне в момент достижения максимального значения, МПа.



Распределение главного сжимающего напряжения (слева) и главного растягивающего напряжения (справа) в РАО в момент достижения максимального значения, МПа.

Анализ результатов расчета

Максимальная пластическая деформация в стальных оболочках.

Материал	ϵ_p , %	Относительное удлинение после разрыва δ , %
Сталь (чехол)	0,04	40
Сталь (внутренняя оболочка)	0,35	
Сталь (внешняя оболочка)	0,14	

Максимальные значения главных напряжений в хрупких материалах.

Материал		σ_1 , МПа	σ_3 , МПа	τ , МПа	Коэффициент запаса
Гранит		0	104	45,6	1,5
Бетон		3,8	71	30,9	0,6
РАО	средний	8,5	1,05	4,6	4,2
	верхний	10,8	2,4	5,5	3,2
	нижний	10,6	2,4	4,44	3,3

Заключение

- Разработана расчетная модель контейнера с РАО с учетом инженерных барьеров и окружающей его породы с использованием метода подконструкций;
- проведены верификационные процедуры тепловых расчетов МКЭ путем сравнения с известными аналитическими решениями;
- рассмотрена задача численного моделирования температурных полей в области контейнера и окружающих его пород, решение которого базировалось на исходных данных (граничных условий) [1];
- использование метода подконструкций позволило получить напряженное состояние контейнера и окружающей породы в момент реализации максимальных напряжений на период 500 лет в линейной постановке и с учетом пластического деформирования;
- по результатам проведенных численных расчетов сделана оценка прочности контейнера и окружающей породы.

**Спасибо
за внимание**

