УДК 622.281

М.А.КАРАСЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ КРЕПЬ-МАССИВ ВОКРУГ КАМЕР РАО

Рассматривается распределение температурных напряжений и напряжений от горного давления с учетом фактора температуры вокруг подземных хранилищ радиоактивных отходов (РАО) в подземном пространстве. В качестве геологических формаций приняты синие глины, залегающие в Северо-Западном регионе России. Задача решена методом конечных элементов. Выявлено влияние фактора температуры на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы крепь-массив. Установлен подъем поверхности от температуры в камерах РАО. Сделан анализ влияния камер РАО друг на друга. Найдены закономерности распределения горизонтальных и вертикальных напряжений по оси камер.

Problem statement of thermal stress distribution and coupled problem (thermal and gravity) stress distribution around the underground storage of nuclear waste was fulfilled. Blue clay laying at north-west region of Russia was taken as geological condition. The problem was solved using Finite Element Analysis method. Influence of temperature on massive-support mode of deformation was discovered. Rising of surface through temperature was established. Analyze of storage tunnels interference was made. Regularities of horizontal and vertical stresses distribution along the axis of tunnels were discovered.

В настоящее время в России скопилось значительное количество радиоактивных отходов от деятельности атомных электростанций, военного и гражданского флотов, перерабатывающих предприятий и т.д. Например, в рассматриваемом Северо-Западном регионе радиоактивные отходы от деятельности ЛАЭС хранятся в приповерхностных хранилищах, которые не обеспечивают должной экологической безопасности. Одним из решений данной проблемы является комплексное использование подземного пространства для их захоронения. Наиболее пригодными геологическими формациями для хранения РАО являются граниты, соли и глины. В Северо-Западном регионе наиболее доступными являются глины и граниты.

Камеры РАО расположены в синих глинах. Глубина заложения камер 60 м от поверхности. Они представляют собой протяженные тоннели круговой формы диаметром в свету 5 м. Обделка камеры – бетонные тюбинги толщиной 0,25 м. Расстояние между камерами 30 м (по осям).

Для исследования НДС системы крепь-массив принята упругая модель деформирования окружающего массива синих кембрийских глин.

Исследование НДС системы крепь-массив сводится к анализу напряженного состояния в бесконечной плоскости с круговым отверстием. В отверстие вставлено упругое кольцо, моделирующее работу обделки с грунтовым массивом. Обделка и массив пород считаются выполненными из упругого изотропного материала с различными физико-механическими свойствами:

Грунт (синие кембрийские глины)	
Модуль деформации, МПа	$1{,}6\cdot10^3$
Коэффициент Пуассона	0,3
Плотность, кг/м^3	1800
Коэффициент теплового расширения, К$^{-1}$	$0{,}97\cdot10^{-5}$
Теплопроводность, Вт/м·К	1,5
Теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,88
Обделка камер (бетонные тюбинги)	
Модуль упругости, МПа	$1\cdot10^4$
Коэффициент Пуассона	0,28
Плотность обделки, кг/м^3	2400
Коэффициент теплового расширения, К$^{-1}$	$0{,}8\cdot10^{-5}$
Теплопроводность, Вт/м·К	1,6
Теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,98

Обделка вводится в работу мгновенно после обнажения массива.

Как известно, при хранении РАО выделяют значительное количество тепла. Температура внутри хранилища составляет 373-423 К. Исследование влияния температурного фактора на распределение напряжений в системе крепь-массив сводится к рассмотрению плоской стационарной задачи со следующими граничными условиями:

- температура дневной поверхности составляет 293 К;
- температура породного массива по нижней границе на глубине 100 м – 281 К, с плавным увеличением ее к поверхности.

Через выработки проходит тепловой поток, происходит нагрев крепи и далее тепло передается в массив. Температура на внутреннем контуре обделки равна 373 К.

Получено решение стационарной тепловой задачи. Вокруг камер РАО образуется тепловое облако в виде эллипса. Температура между камерами изменяется от 373 до 351 К. Рассмотрим, как меняется температура с удалением от камеры. На внутреннем контуре крепи температура задана действием РАО и равна 373 К. Проходя через обделку камеры, температура уменьшается на 7 К и составляет 364 К. Затем на участке 2,75-35(40) м изменение температуры происходит по нелинейному закону и разница составляет 62 К, т.е. на этом промежутке происходит поглощение 72 % тепла. Далее изменение температуры можно принять линейным.

На основании полученных данных были решены следующие задачи: изменение распределения напряжений с учетом влияния температуры и зависимость горного давления от веса грунта и температуры. Как известно, с увеличением температуры практически все материалы увеличиваются в объеме. Этот фактор особенно важен при рассмотрении задач шахтного строительства, когда выработки находятся в стесненных условиях.

Рассмотрим распределение напряжений по горизонтальному разрезу через оси камер. На расстоянии 90 м от крайней камеры горизонтальное напряжение $\sigma_x = 0{,}43$ МПа. На промежутке 90-20 м напряжение σ_x увеличивается, и изменение происходит по нелинейному закону и на расстоянии 20 м от центра камеры равняется 0,84 МПа. Далее происходит уменьшение до контакта с крепью камеры, на контакте $\sigma_x = 0{,}54$ МПа и затем резко уменьшается до нуля. Напряжения σ_x изменяются следующим образом: на внутреннем контуре крепи, где $\sigma_x = 0$, происходит резкое увеличение и максимум наблюдается на расстоянии 15 м от камеры, затем, по мере приближения к следующей камере, напряжение σ_x уменьшается и на внутреннем контуре равно нулю. Подобным образом происходит распределение горизонтальных напряжений и между другими камерами. Заметим, что максимального значения σ_x достигает между центральными камерами, где $\sigma_x = 1{,}05$ МПа. Вертикальные напряжения на расстоянии 90 м представляют собой растягивающие напряжения и $\sigma_y = 0{,}17$ МПа. На участке 90-60 м изменения вертикальных напряжений σ_y носят линейный характер. Затем на промежутке 30 м от центра камеры и до контакта массива с крепью напряжения σ_y меняют знак и переходят от растягивающих к сжимающим. На данном промежутке σ_y нелинейно возрастают и максимум приходится на контакт, где $\sigma_y = 0{,}82$ МПа. Рассматривая изменения напряжений σ_y в крепи заметим, что они от сжимающих переходят к растягивающим и по мере приближения к центральной камере увеличиваются. При растягивающем напряжении максимальное значение $\sigma_y = 1{,}46$ МПа.

Рассматривая распределение температурных напряжений по вертикальному разрезу по оси центральной камеры, получаем следующие закономерности. На расстоянии 40 м от выработки напряжения σ_x и σ_y незначительны и стремятся к нулю. Далее они линейно возрастают, причем напряжение σ_x имеет более выраженный характер. На расстоянии 10 м от тоннеля (4 радиуса выработки) изменение напряжений принимает нелинейный характер. До контакта с крепью, в массиве, характер напряжений σ_x и σ_y качественно схож и отличается лишь коли-

чественно. На контакте крепь-массив (в своде и подошве тоннеля) $\sigma_x = 1{,}3$ МПа, $\sigma_y = 0{,}86$ МПа. Затем характер изменения горизонтальных и вертикальных напряжений кардинально меняется. Напряжение σ_y имеет пиковое значение на контакте крепь-массив и затем линейно снижается до нуля. На внутреннем контуре крепи $\sigma_y = 0$. Горизонтальное напряжение σ_x, наоборот, резко возрастает и составляет на внутреннем контуре крепи 11,1 МПа.

Теперь рассмотрим зависимость горного давления от веса грунта и температуры. Проследим, как изменилось распределение напряжений в системе крепь-массив. На расстоянии 90 м от центра крайней камеры $\sigma_x = 0{,}88$ МПа (от веса грунта 0,2 МПа), $\sigma_y = 0{,}916$ МПа (от веса грунта 0,9 МПа). Затем горизонтальные и вертикальные напряжения линейно увеличиваются, при этом на расстоянии 30 м от центра камеры напряжения σ_x продолжают изменяться линейно, а напряжения σ_y принимают нелинейный характер изменения и на контакте крепь-массив $\sigma_y = 1{,}84$ МПа. Горизонтальные напряжения, достигая 1,1 МПа (5 м от центра камеры), уменьшаются практически до нуля. Горизонтальные напряжения имеют максимальное значение на внутреннем контуре крепи. Рассмотрим напряжения σ_y на внутреннем контуре крепи для каждой из камер. В крайней и центральной камерах, камере № 2 σ_y равно 9,1; 7,3; 7,6 МПа соответственно, далее все повторяется (от веса грунта 8,9 МПа). Подобное изменение напряжений связано с воздействием тепла на вмещающие породы и материал обделки. Происходит выталкивание камер к поверхности и чем ближе к центральной камере, тем более заметно это воздействие.

Рассматривая распределение температурных напряжений по вертикальному разрезу оси центральной камеры, получаем следующие закономерности. На расстоянии 40 м от выработки напряжение σ_x незначительно и стремится к нулю, а $\sigma_y = 1{,}8$ МПа. Далее горизонтальные напряжения увеличиваются и на контакте крепь-массив $\sigma_x = 2{,}1$ МПа, на внутреннем контуре крепи $\sigma_x = 11{,}9$ МПа (от веса грунта 1,4 МПа). По мере приближения к поверхности σ_x и σ_y уменьшаются, и у дневной поверхности равны нулю.

Таким образом, в ходе решения данной задачи был установлен подъем дневной поверхности на 3 см, а также незначительное смещение камер РАО в сторону поверхности земли. Выявлено влияние размеров теплового облака на напряженное состояние системы крепь-массив и на изменение камерами своего положения в пространстве. В зависимости от расположения камер в тепловом облаке меняется и количественное значение напряжений. На центральную камеру оказывается наибольшее воздействие. Горизонтальные напряжения концентрируются в своде и нижней части камер. Вертикальные напряжения концентрируются в боках камеры. Количественно вертикальные и горизонтальные напряжения приблизительно равны, что приводит к равномерному распределению нагрузки на крепь камеры.