УДК 622.284

Р.И.ЛАРИОНОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНО ПРОВЕДЕННЫХ ТОННЕЛЕЙ

На примере Большого Петлевого тоннеля СКЖД рассмотрено взаимное влияние двух параллельно проведенных выработок – старого и нового тоннелей на различном расстоянии друг от друга. Построены зависимости распределения поля напряжений в массиве пород вокруг выработок.

The interference of the new and old tunnels was analysed at various distances from each other by the example of Great Loop tunnel of the Northern Caucasia railway. Functional dependences of stress field distribution around tunnels were graphed.

Строительство тоннелей на юге и востоке РФ ведется в сложных горно-геологических условиях с переменной глубиной заложения в нарушенных сильнотрещиноватых породах. Выбор технологии проходки и крепления требует геомеханического обоснования.

В статье рассмотрены закономерности формирования напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработок на примере Большого Петлевого тоннеля, находящегося на перегоне Армавир – Туапсе СКЖД, где железной дорогой пересекается Главный Кавказский хребет. Тоннель реконструировался по комбинированному варианту, предусматривающему на части длины тоннеля капитальный ремонт с сохранением существующей оси сооружения, и проходку на основной части нового тоннеля. Таким образом, старый и новый тоннели на большей части длины идут параллельно друг другу. Протяженность нового тоннеля 980 м, максимальная глубина заложения 120 м, радиус закругления 300 м. Вмещающие породы – аргиллиты.

Исследование выполнялось в упругой постановке задачи с применением одного из методов численного моделирования – метода конечных элементов (МКЭ). Были построены три плоские модели. В плоской модели реальный массив пород размерами 100×100 м заменялся конечной невесомой плоскостью с двумя отверстиями, имеющими форму поперечного сечения тоннеля – прямоугольно-сводчатую, по граням которой обеспечивались граничные условия: нижней грани запрещались перемещения вдоль вертикальной оси Y, а боковым – вдоль горизонтальной оси X. К верхней грани модели прикладывалась нагрузка в виде давления, равного γH.

Породный массив моделировался изотропной линейно деформируемой средой. Физико-механические характеристики аргиллита:

Коэффициент крепости по Протодьяконову f	2,5-3
Модуль деформации E, МПа	800
Коэффициент Пуассона ν	0,27
Временное сопротивление сжатию $R_{сж}$, МПа	17-30
Объемный вес γ, кН/м^3	25,5

Было составлено три модели: на первой тоннели (рис.1) находятся на расстоянии одного приведенного радиуса друг от друга, на второй – пяти приведенных радиусов и на третьей – на расстоянии 50 м друг от друга (наибольшее расстояния расхождения тоннелей).

Приведенный радиус

$$R = \frac{1}{4}(a+h) = \frac{1}{4}(8{,}2+9{,}85) = 4{,}5 \text{ м}.$$

Плоскость модели разбивалась на треугольные конечные элементы. На контуре выработок сетка сгущена (расстояние между узлами элементов 0,1 м) и по мере удаления от контура размер элементов плавно увеличивается и на гранях достигает 5 м.

Рассмотрим первую модель. Выработки находятся на расстоянии 1R. Это наиболее неблагоприятный случай, поэтому он был рассмотрен более подробно. Проводились исследования изменения напряжений по трем направлениям – между тоннелями, вдоль оси Y вверх от тоннеля и вдоль оси X от стенки тоннеля границе плоскости. Поле напряжений построено в прямоугольной системе координат.

На рис.2 представлены зависимости изменения напряжений в целике между тоннелями от расстояния на уровне 3 м от основания. Единица измерения расстояния – приведенный радиус R (ось X), напряжений – коэффициент концентрации напряжений $k = \sigma/\gamma H$. Коэффициент бокового распора $\lambda = \nu/(1-\nu) = 0{,}27/(1-0{,}27) = 0{,}37$. Таким образом, $\sigma_x = \lambda\,\sigma_Y$.

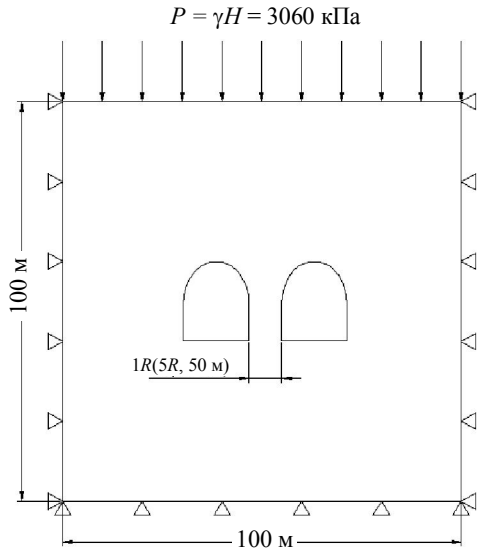


Рис.1. Схема модели

Из представленных зависимостей можно сделать вывод, что вертикальные напряжения на контурах выработок максимальны ($k \approx 3$), по мере удаления от контура равномерно убывают и в пределах от 0,35R до 0,65R постоянны ($k \approx 1{,}8$). Горизонтальные напряжения при удалении от контура тоннелей возрастают от нуля на контуре (незакрепленная выработка) до $k = 0{,}085$ на отметке 0,5R. Отрицательный знак показывает, что напряжения сжимающие.

На рис.3 приведены зависимости изменения вертикальных и горизонтальных напряжений по направлению вдоль оси Y вверх от тоннеля.

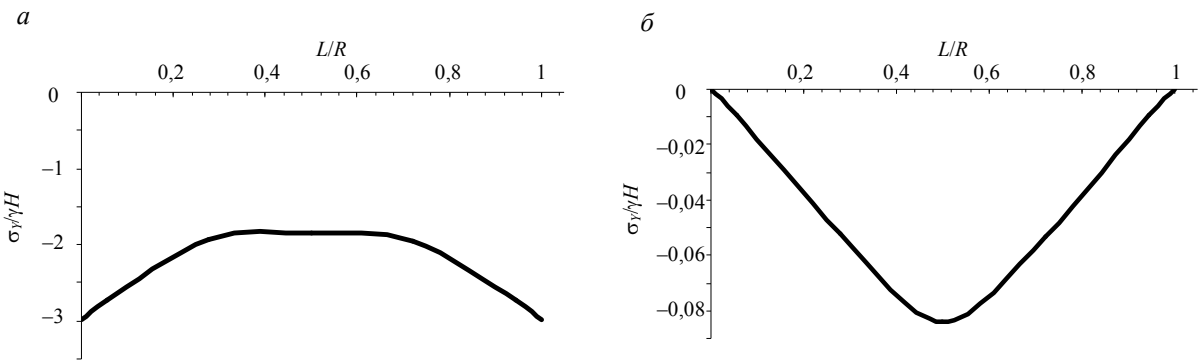


Рис.2. Зависимость распределения вертикальных (*а*) и горизонтальных (*б*) напряжений в целике между выработками

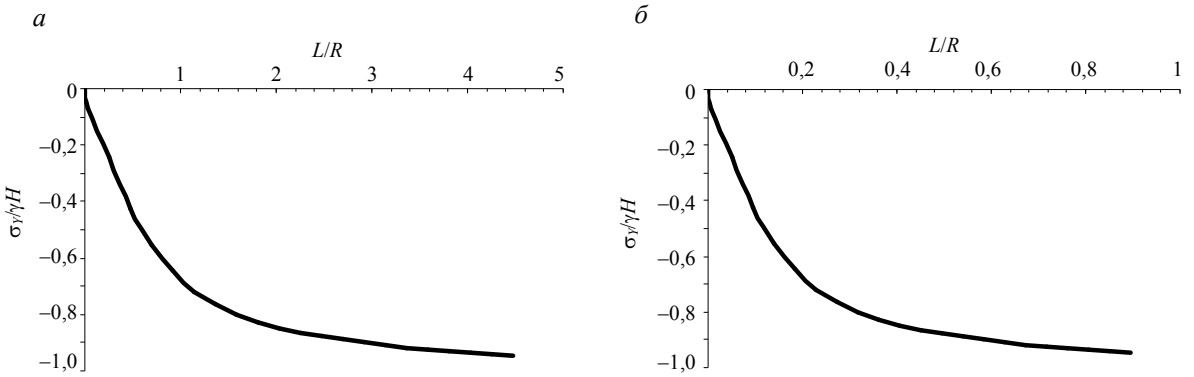


Рис.3. Зависимость распределения вертикальных (*а*) и горизонтальных (*б*) напряжений в массиве пород в направлении оси *Y* вверх от тоннеля

Как видно из рис.3, вертикальные напряжения на контуре выработки в шелыге свода равны нулю, затем наблюдается замедленное увеличение роста напряжений и приближения их значений к фоновым ($k = 1$) на расстоянии (4,5-5)R от кровли выработки.

На отрезке (0-0,4)R от шелыги свода происходит резкое увеличение горизонтальных напряжений с пиковым значением $k = 0{,}52$ на отметке 0,4R. Затем наблюдается уменьшение напряжений. Горизонтальные напряжения стремятся к фоновым и на расстоянии 4R равны 0,37γH.

На рис.4 представлены зависимости распределения напряжений в горизонтальном направлении к границе плоскости вблизи основания тоннеля.

Вертикальные напряжения максимальны на контуре выработки ($k = 2{,}8$), затем постепенно убывают. Из рис.4, *а* видно, что убывание напряжений носит непостоянный характер: на отрезке (0-0,4)R уменьшение напряжений происходит быстрее, чем на отрезке (0,4-4,5)R.

По мере удаления от тоннеля в массив вертикальные напряжения стремятся к фоновым.

Горизонтальные напряжения на контуре выработки в боку равны нулю. Затем происходит резкий скачок напряжений на отметке 0,4R и их дальнейшее затухание. Скачок обусловлен концентрацией напряжений в нижних углах тоннеля. На отметке 4R горизонтальные напряжения стремятся к фоновым ($k = 0{,}37$).

Далее рассмотрены еще два варианта расположения тоннелей друг относительно друга: на расстоянии 5R и 50 м друг от друга. Эти случаи менее опасные, поэтому нас интересует только распределение напряжений в целике между выработками. Для этого были рассмотрены зависимости изменения

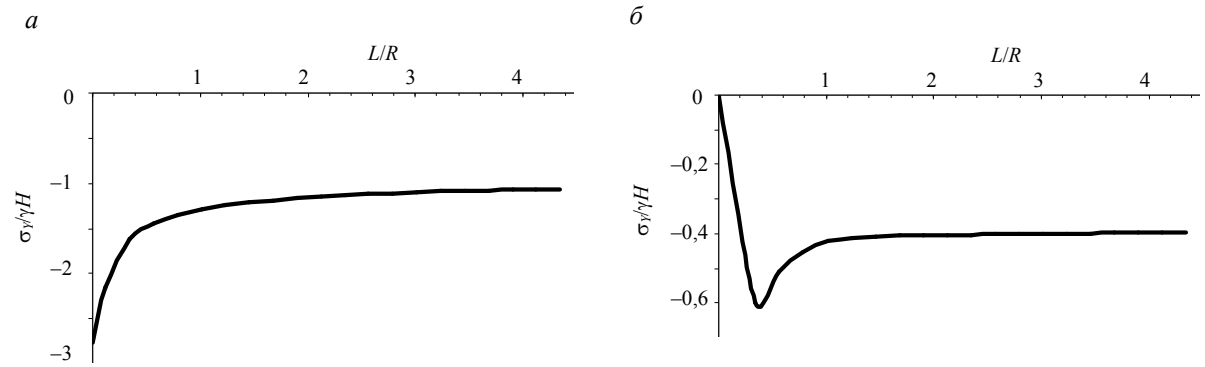


Рис.4. Зависимость распределения вертикальных (*а*) и горизонтальных (*б*) напряжений в массиве пород в направлении оси *X* к границе плоскости

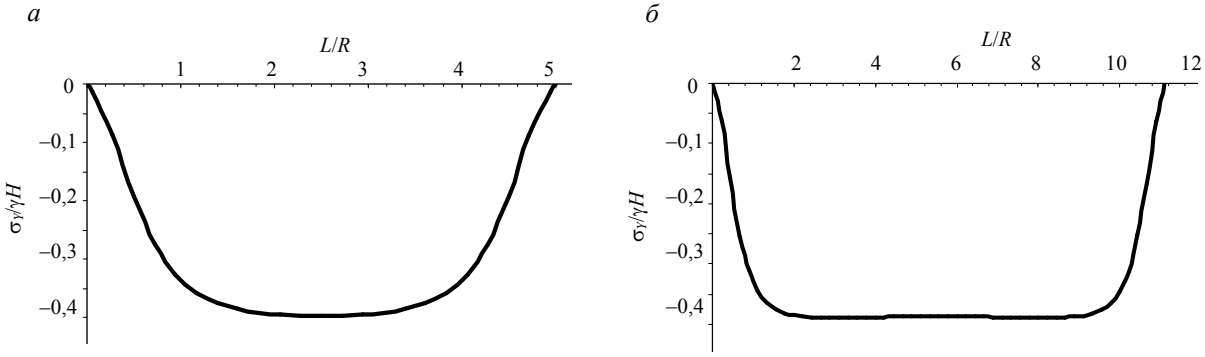


Рис.5. Зависимость распределения горизонтальных напряжений в целике между выработками, находящимися друг от друга на расстоянии 5*R* (*а*) и 50 м (*б*)

горизонтальных напряжений от расстояния между выработками на уровне 3 м от основания (рис.5).

Из рис.5 видно, что распределение горизонтальных напряжений в целике между выработками носит схожий характер. На рис.5, *а* на отрезке (0-2,5)*R* напряжения возрастают от 0 до 0,4γ*H*. Это значение является максимальным. Затем напряжения снова убывают до нуля по мере приближения к контуру другого тоннеля. Как показывает зависимость, напряжения в целике немногим более фоновых. Это обуславливается взаимным влиянием тоннелей друг на друга.

На рис.5, *б*, как и на отрезке (0-2,5)*R*, наблюдается рост напряжений от нуля до фонового значения ($k = 0{,}37$). На участке от 2,5*R* до 8,5*R* горизонтальные напряжения близки к фоновым. Это свидетельствует о том, что на этом участке влияние тоннелей друг на друга практически отсутствует.

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что максимальные напряжения концентрируются вблизи углов основания тоннелей – концентраторов напряжений. Максимальное значение вертикальных напряжений в этих точках равно 9,365 МПа. Сравнивая данное значение с временным сопротивлением аргиллита сжатию, можно сказать, что порода имеет, как минимум, двукратный запас прочности при условии, что массив пород – изотропная линейно деформируемая среда.