

УДК 622.271.333 : 539.319

В.Р. Рахимов, А.В. Марков

ХАРАКТЕРНЫЕ ЗОНЫ НАПРЯЖЕНИЙ ПОЛОГОГО БОРТА

Постановка задачи

Важную и все возрастающую роль для исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния в окрестности горных выработок имеют теоретические методы, реализуемые численно на компьютере посредством математических моделей. Математическим моделям характерна значительная гибкость и универсальность при отсутствии затрат на оборудование, материалы и др. статьи, характерные физическим моделям. В обобщении [1] подчеркивается важность применения и развития инструментария для теоретических исследований - численных методов решения задач геомеханики.

В механике грунтов для решения задач о напряженном состоянии широкое применение получил метод, основанный на фундаментальном решении Мелана Е., включающий формулы для расчета напряжений и смещений в полуплоскости от действия в некоторой ее точке сосредоточенных сил (рис. 1) горизонтального и вертикального

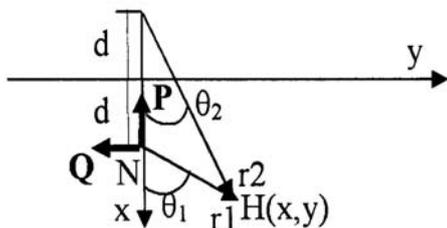


Рис. 1. Действие сосредоточенных сил P и Q в полуплоскости

направления [2].

В ТТУ создана математическая модель, включающая наложение двух напряженных состояний: тяжелой полуплоскости и невесомой полуплоскости - с контуром в виде трапеции, нагруженным напряжениями, равными и противоположно направленными тем, которые были бы на контуре в нетронutom массиве, рис. 2. Суммарные нагрузки вдоль контура будут нулевыми, что эквивалентно условиям на контуре выемки. Решение для невесомой полуплоскости также основано на фундаментальном решении Мелана Е, однако, в отличие от [2], не требует предварительного задания и расчета фиктивных сил.

По названной модели, реализованной в программе Vort (характеристики приведены в конце статьи), исследуется характер напряженного состояния для центрального сечения (по линии 27) на карьере Кальмакыр, а для получения зависимостей выполняются вариации геометрических параметров борта. Непосредственный интерес представляет определение границ зоны растягивающих напряжений в борту карьера, поскольку прочность горных по-

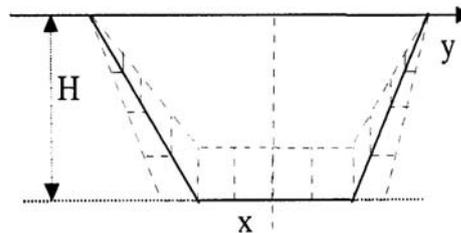


Рис. 2. Схема нагружения невесомой полуплоскости

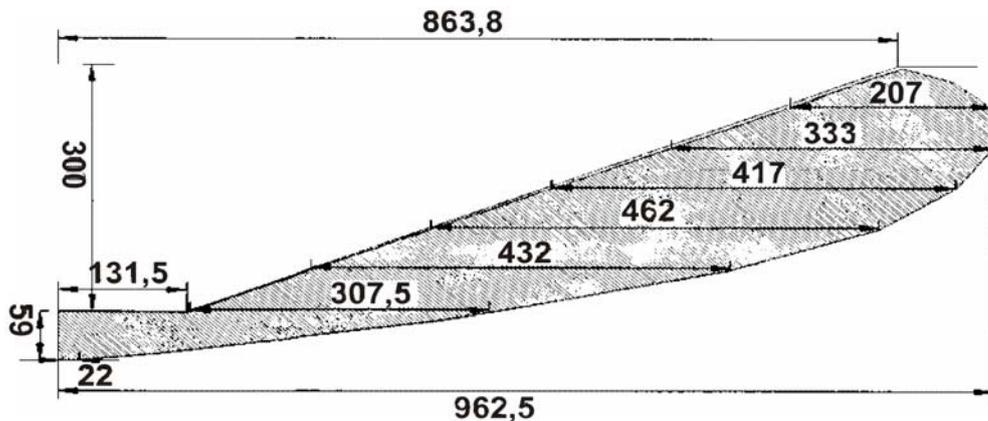


Рис. 4. Расположение зоны ($\sigma_y > 0$) относительно правого борта по линии 27

род растяжению значительно ниже в сравнении со сжатием. В связи с этим выполнен ряд исследований по определению зон растягивающих напряжений в зависимости от геометрии борта. Исследования выполнены как 3-х компонентного тензора напряжений в системе координат (X, Y) - (σ_x , σ_y , τ), так и для главных напряжений - (σ_1 , σ_2), максимумы которых (σ_{\max}) представляют как бы силовой каркас прибортового массива. Расчетная модель сечения борта по линии 27 показана на рис. 3.

1. Выход растягивающих напряжений на верхнюю площадку борта

В данном разделе определяется зависимость ширины зоны растяжения ($\sigma_y > 0$) в верхней части массива борта (при малых значениях X) от его наклона, табл. 1. В связи с тем, что проектный наклон бортов на карьере Кальмакыр не превышает 25° , то в данном исследовании исследуемый интервал углов принят: 20° - 35° .

Анализ табл. 1 показывает, что выход зоны растяжения на

верхнюю площадку начинается с наклона борта 27° . При этом, чем круче наклон борта - тем шире эта зона. Для более пологих углов (к ним относятся и борта карьера Кальмакыр) верх зоны растяжения расположен на некоторой глубине от верхней площадки.

2. Исследование зоны растягиваю-

Таблица 1

Зависимость зоны растяжения ($\sigma_y > 0$) в верхней части массива борта от его наклона

Наклон борта, °	Глубина верха зоны, м	Интервал растяжения, м		Ширина зоны, м
		Начало	Конец	
20	3.8	947.3	947.3	0.0
21	3.1	906.4	906.4	0.0
22	2.6	869.0	869.0	0.0
23	1.9	834.6	834.6	0.0
24	1.3	803.2	803.2	0.0
25	0.7	774.1	774.1	0.0
26	0.2	746.7	747.2	0.5
27	0	720.3	726.5	6.2
28	0	695.8	712.6	16.8
29	0	672.8	701.7	28.9
30	0	651.2	692.8	41.6
31	0	630.8	685.5	54.7
32	0	611.7	679.3	67.6
33	0	593.5	674.1	80.6
34	0	576.3	669.6	93.3
35	0	560.0	665.8	105.8

щих напряжений по глубине

В данном разделе изучено изменение зоны горизонтальных растягивающих напряжений ($\sigma_v > 0$) по глубине массива вдоль линии 27 (наклон борта 22°), табл. 2.

Таким образом, зона горизонтальных растягивающих напряжений, появившись на глубине 3 м, расширяется вплоть до глубины 200 м ($2/3 H$, ширина зоны -1.5 Н), а затем - уменьшается по ширине вплоть до глубины 300 м. Под дном карьера - с глубины 301 м ширина зоны растягивающих напряжений быстро убывает вплоть до глубины 359 м. Ниже этой глубины растягивающие напряжения не возникают. Зона показана на рис. 4.

3. Исследование распределения главных напряжений в массиве

Напряжения (σ_1, σ_2) рассчитаны в безразмерной форме (деление на γH , γ - удельный вес).

Обозначения на эпюрах напряжений: σ_1 (толстая линия), σ_2 (линия средней толщины) и угол (α) наклона α_{\max} к оси X (тонкая линия). Для согласования эпюр (α) и (σ_1, σ_2) ординаты напряжений увеличены в 100 раз.

Исследование напряжений (σ_1, σ_2) в подошве

На рис. 5 показаны эпюры напряжений непосредственно под подошвой карьера (глубина - 1 м). Вопреки встречающимся в научной литературе суждениям, что подошва подвержена горизонтальным сжимающим напряжениям (приводящим к выпучиванию подошвы), из эпюры σ_2 видно противоположное - на интервале (шириной 4,3 Н: ~ от -645 до :645 м). Однако выпучивание подошвы для пологой конфигурации бортов имеет место вследствие снятия выемкой значительных вертикальных нагрузок. И такое выпучивание приводит к возникновению растягивающих главных напряжений ($\sigma_2 > 0$), близких к горизонтальным (т.к. в этом случае значения $\text{abs}(\alpha)$ внутри подошвы порядка 90° - 110°). Ниже будут определены условия возникновения в подошве сжимающих близко-горизонтальных напряжений. Линия 27 проходит в зоне максимальной ширины карьера. Однако ширина дна карьера может 10-кратно уменьшаться. В табл. 3 показано изменение ширины зон: для $\sigma_2 > 0$ и для изменяемых значений σ_1 в зависимости от ширины подошвы.

Таблица 2
Зависимость зоны растяжения ($\sigma_v > 0$) по линии 27 от глубины

Глубина ряда для зоны, м	Интервал растяжения, м		Ширина зоны, м
	Начало	Конец	
3.0	868.0	869.4	1.4
3.5	867.0	870.2	3.2
5.0	863.7	875.7	12.0
20.0	826.5	920.5	94.0
50.0	753.3	960.3	207.0
100.0	629.5	962.5	333.0
150.0	505.8	922.8	417.0
200.0	382.0	844.0	
250.0	258.3	690.3	432.0
300.0	134.5	449.5	315.0
301.0	0.0	442.0	
310.0	0.0	388.0	388.0
350.0	0.0	108.0	108.0
359.0	0.0	22.0	22.0

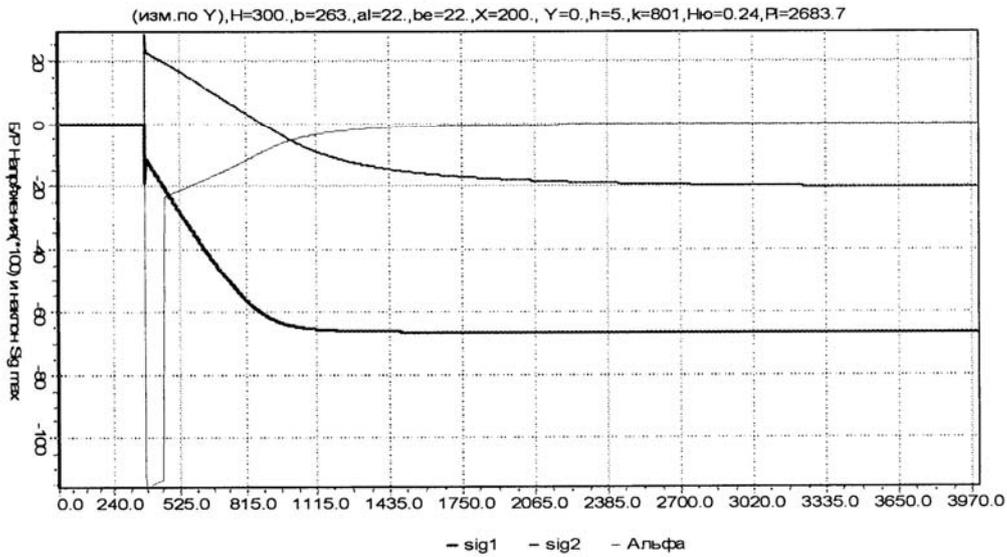


Рис. 6. Эпюры главных напряжений σ_1, σ_2 и угла α по линии 27 на глубине 200 м

— sig1 — sig2 — Альфа

Рис. 5. Эпюры главных напряжений σ_1, σ_2 и угла, α по линии 27 на глубине на глубине 301 м

Таким образом, влияние размера подошвы имеется, но не является определяющим, т.к. изменение размера подошвы существенно превышает соответствующие изменения размеров зон. На моделях борта повышенной крутизны борота (45° и 50°), исследовалось изменение размеров названных выше зон. Оказалось, что размер зоны растягивающих напряжений резко

уменьшился и она представлена двумя участками, расположенными у концов подошвы. Средняя часть подошвы находится под действием небольших горизонтальных сжимающих напряжений, возрастающих с повышением крутизны бортов. Ширина зоны изменяемых значений σ_1 составила 6,1 Н для $\alpha = 45^\circ$.

Таблица 3
Характерные размеры зон для σ_1, σ_2
под подошвой при ее изменении, в величинах (Н)

Подошва b, м	Зона для $\sigma_2 > 0$	Зона для $\sigma_1 < \text{const}$
263	4.3	8.6
100	3.3	8.0
50	3.0	7.5
25	2.8	6.9

Таким образом, всего 2-кратное увеличение крутизны бортов принципиально изменяет характер распределения главных напряжений. Следовательно, крутизна бортов является для распределения напряжений определяющим параметром, а условием появления в подошве сжимающих горизонтальных напряжений является достижение крутизны бортов порядка 45° .

Исследование главных напряжений по глубине

Основной целью данного исследования является оценка возмущения, которое происходит в напряженном состоянии массива в окрестности открытой выемки по сравнению с нетронутым массивом. Характерные эпюры (σ_1 , σ_2) в правом борту и под днищем показаны на рис. 6-7. Исходные предпосылки следующие:

- Определение координаты Y_v границы зоны возмущения выполнено через предельно малое значение α_m (поскольку, в нетронутым массиве $\sigma_{\max} = \sigma_x$ и $\alpha_m = 0$). В данном случае было принято (с учетом округления α до 1-го знака): $\alpha_m = 0.5^\circ$.

- Размер зоны растяжения δ определялся значениями: $\sigma_2 \sim 0$.

- Коэффициенты возмущения для (σ_1 , σ_2) рассчитывались по выражениям:

$$\lambda_1 = \frac{|\sigma_1 - \sigma_x^H|}{|\sigma_x^H|} \cdot 100\%,$$

$$\lambda_2 = \frac{|\sigma_2 - \sigma_y^H|}{|\sigma_y^H|} \cdot 100\%.$$

В прибортовом массиве- до глубины 301 м, (см. табл. 4):

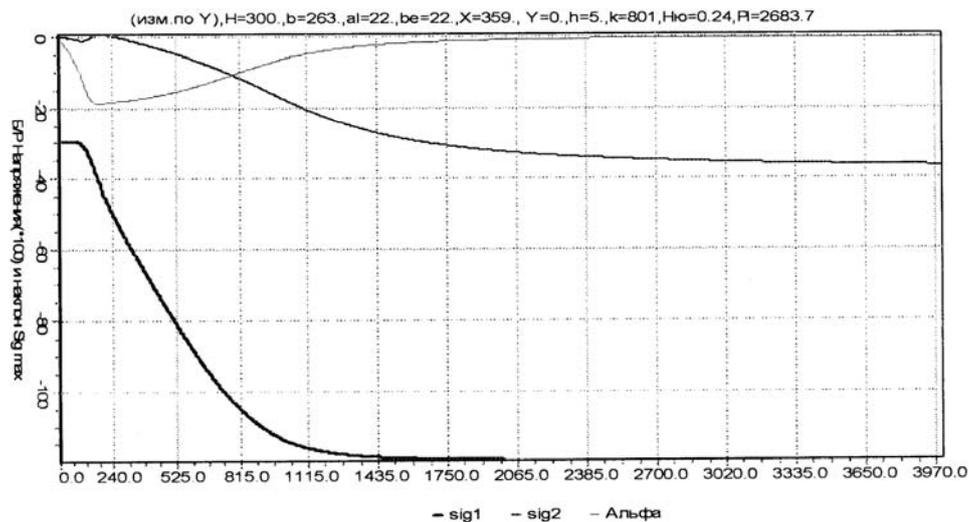


Рис. 7. Эпюры главных напряжений σ_1, σ_2 и угла α по линии 27 на глубине 359 м

- Значения напряжений (σ_1 , σ_2) сравниваются по величине с соответствующими напряжениями нетронутого массива (σ_x^H , σ_y^H) - в безразмерном виде.

- Углы (α) наклона к оси X напряжения σ_{\max} могут изменяться на каждой глубине от величин, превышающих 90° до 0 . Когда ($\sigma_{\max} = \sigma_2$), тогда $\alpha > 90^\circ$.

- Экстремальные значения (σ_1^e , σ_2^e) сосредоточены у борта (координата y^e), при этом: $\sigma_2^e > 0$ (разгрузка и растяжение), $\sigma_1^e < \sigma_x^H$ (разгрузка),.

• Размер зоны возмущения определялся формулой: $\Delta = Y_v - b/2 - (H - x)/\text{tg}22$. Характерен - рост этой зоны с глубиной.

• Параметр δ растет до глубины 250 м.

• Изменение коэффициента λ_1 - мало (возрастает), а убывание λ_2 - велико.

• Последним стабилизируется график σ_2 .

• Напряжения $\sigma_2 > 0$ возрастают до 150 м (0,5 Н), а затем убывают.

Под подошвой- до глубины 400 м, (см. табл. 5):

• Экстремальные значения (σ_1^e, σ_2^e) м.б. при разных координатах y^e .

• Параметр δ , по глубине - убывает.

• Оба коэффициента (λ_1 и λ_2) убывают по глубине.

• Параметр Y_v растет незначительно.

• Напряжения $\sigma_2 > 0$ убывают, переходя в сжимающие после глубины 359 м.

• Последним стабилизируется график σ_2 .

В глубинах массива- с 500 м- до 2500 м, (см. табл. 6):

• Экстремальные значения (σ_1^e, σ_2^e) - при разных координатах y^e .

• Оба коэффициента (λ_1 и λ_2) убывают по глубине.

• Рост Y_v заканчивается после глубины 2000 м..

• С глубиной график σ_1 стабилизируется последним.

• Экстремумы: σ_2^e - постоянно сдвигается вправо, а σ_1^e - остается по центру.

• На глубине 2500 м возмущение: σ_1 - мало, а σ_2 - пренебрежимо мало.

Выводы

По результатам выполненных исследований напряжений на математических моделях прибортового массива по линии 27 можно заключить:

• Полный охват исследуемого массива в окрестности выемки составил: по горизонтали-4000 м, по вертикали- 4000 м.

- Выход зоны горизонтального растяжения (при эквивалентных параметрах) на верхнюю площадку борта начинается с угла его наклона 27° . В рассматриваемом случае минимальная глубина зоны растяжения - 3 м. Максимальное расстояние до внешней границы зоны от верхней бровки - 98.6 м. Максимальная глубина внешней границы зоны от подошвы - 59 м. Максимум ширины зоны соответствует горизонту на глубине $2/3H$.

- Показано, что угол наклона борта влияет значительно сильнее на перераспределение напряжений в массиве, чем размер подошвы.

- По характеру распределения главных напряжений в массиве можно выделить три своеобразные зоны, соответствующих интервалам глубин:

1. Прибортовой массив - до глубины $H = 301$ м. Характеризуется ростом с глубиной растягивающего напряжения (σ_2) до горизонта 150 м. Экстремальные значения возмущений (σ_1, σ_2) сосредоточены у борта. Горизонтальные размеры зон растяжения и возмущения растут с глубиной. Интенсивность возмущений (σ_2) много выше чем (σ_1). Экстремумы напряжений: $\sigma_1^e = -1.02$ МПа, $\sigma_2^e = 1.91$ МПа.

Максимум возмущения на глубине 50 м составляет 375% и соответствует (σ_2).

2. Подподошвенный массив - от глубины 301 м до глубины 400 м. Характеризуется ростом с глубиной (σ_1 и убыванием (σ_2). Горизонтальный размер зоны растяжения с глубиной убывает, а зоны возмущения - растет. Положение экстремумов возмущений (σ_1, σ_2) раз-

лично. Интенсивность возмущений (σ_2) чуть выше чем (σ_1). Напряжения (σ_2) ниже горизонта 359 м переходят в сжимающие. Экстремумы напряжений: $\sigma_2 = -3.54$ МПа, $\sigma_2^e = 1.52$ МПа. Максимум возмущения на глубине 301 м составляет 163% и соответствует (σ_2).

3. Глубинный массив- ниже глубины 400 м. Характеризуется отсутствием растягивающих напряжений и ростом с глубиной сжимающих напряжений (σ_1, σ_2). Интенсивность возмущений с глубиной убывает для обеих напряжений. С глубины 1000 м интенсивность возмущений (σ_1) остается немного выше чем (σ_2). Рост горизонтального рахмера зоны возмущения прекращается с глубины 2000 м. Экстремум (σ_2) сдвигается с глубиной вправо, а Экстремум (σ_1)- соответствует центру подошвы.

Максимум возмущения на глубине 2500 м составляет 2.8 % и соответствует (σ_1).

Основные характеристики программы Bort:

- Задание минимума исходных параметров- в сочетании с удобным пользовательским интерфейсом, соответствующим современным Windows.

- Расчеты напряжений для отдельной точки полуплоскости или для сетки наблюдения с шагами приращений по X и Y.

- Возможность расчета полных или частичных напряжений- от действия только вертикальных или горизонтальных сил, с учетом или нет сил тяжести.

- Возможность представления напряжений в размерных единицах (в МПа) или в безразмерном виде (в долях γH).

- Автоматическое получение графиков эпюр напряжений по глубине или по горизонтали.

- Возможность расчета эпюр напряжений по линиям, параллельным правому борту.

- Невозможность получить значения напряжений непосредственно на контуре выработки вследствие того, что используемое фундаментальное решение терпит разрыв при совпадении точек нагружения и наблюдения. Исследование этого вопроса показало, что под дном карьера максимальный размер зоны некорректности решения – 0,7 м, а для массива правого борта - горизонтальный размер этой зоны- 3 м. Ширина названной зоны по нормали к борту определится выражением: $3 \cdot 8 \sin 22^\circ = 1.1$ м. Таким образом, ширина зоны отсутствия решения, получаемого с применением Bort, незначительная- не превышает 0,4 % от высоты борта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Г.Н. и др. Методы и средства решения задач горной геомеханики. - М.: Недра, 1987-248 с.

2. Горбунов-Посадов М.И и др. Расчет конструкций на упругом основании. - М. Стройиздат, 1984- 679 с.

Коротко об авторах

Рахимов В.Р. – доктор технических наук, профессор, академик АНРУз,

Марков А.В. – старший научный сотрудник,

Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан.

ДИССЕРТАЦИИ

**ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ
ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
им. Г.В. ПЛЕХАНОВА**

ВАРШАВСКИЙ Вадим Евгеньевич	Эффективное управление основными технико-экономическими показателями угольных разрезов на основе рациональной организации горно-капитальных и эксплуатационных работ	05.02.22	к.т.н.
ТУЧА Николай Александрович	Повышение безопасности труда работников горнодобывающих отраслей на основе профотбора и текущего контроля психофизиологического потенциала организма	05.26.01	к.т.н.

