

УДК 622.83

**ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗРЫВНОГО НАРУШЕНИЯ
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
КРАЕВОЙ ЧАСТИ ПЛАСТОВОЙ ЗАЛЕЖИ ПРИ ЕЕ ОТРАБОТКЕ**

В. А. Трофимов

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Рассматривается напряженно-деформированное состояние краевой части пласта при приближении забоя к вертикальному разрывному нарушению. Показана возможность использования для этого полученного ранее аналитического решения для одиночного целика, симметрично расположенного в выработанном пространстве. Сравнение с численным решением дает приемлемую точность полученных результатов.

Разрывное нарушение, краевая часть пласта, метод комплексных потенциалов, численные методы, метод граничных элементов, метод разрывных смещений

Масштабные катастрофические разрушения в массиве горных пород при разработке твердых полезных ископаемых — довольно редкие природные явления. Тем не менее непредсказуемость возникновения, а зачастую и масштаб проявления делают их весьма опасными с точки зрения работоспособности добывающего предприятия.

Значительный интерес представляет теоретическое описание деформационных процессов вблизи разлома, которое могло бы прояснить механизм учащения динамических проявлений горного давления при подходе очистных работ к разлому [1–5; и др.]. При этом разлом обычно моделируется либо слоем с более низкими, чем у массива, упругими постоянными, либо границей массива, на которой могут быть заданы некоторые силовые факторы, в частности постоянные касательные напряжения.

В работе приводятся результаты расчета параметров напряженного состояния массива вблизи фронта очистных работ с учетом особенностей, вносимых разломом или крупной трещиной в поле напряжений вокруг выработок. Даны конкретные соотношения, описывающие деформирование краевой части пласта, отделенной от остального массива вертикальным разрывным нарушением. Рассматривается изменение напряженно-деформированного состояния этой постепенно уменьшающейся по мере приближения забоя к разрыву в ходе горных работ части пласта (“целика”) и показаны условия для возникновения в ней горного удара.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 12-05-00525).

Схематическое изображение данного “целика” и отработанного участка пласта с зависающей кровлей показано на рис. 1. Основными параметрами в этой схеме являются глубина разработки H , мощность пласта $2h$, исходное горное давление на пласт q_H^0 , деформационные параметры горного массива E , ν , ширина “целика” l , пролет выработанного участка пласта $L - l$.

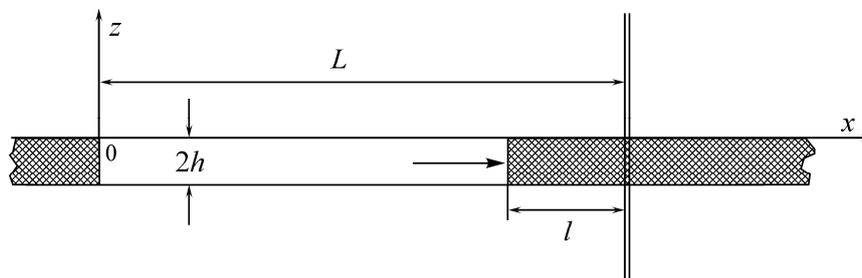


Рис. 1. Геомеханическая ситуация при отработке краевой части пласта вблизи вертикального разрывного нарушения

Решение такой задачи не может быть выписано в конечном виде. Далее приводятся решения трех задач, которые в той или иной степени соответствуют общей постановке задачи.

В рамках первой задачи предпринимается попытка использовать решение задачи для одного целика, оставленного в выработанном пространстве, которое может быть выписано в конечном виде [6]. Решение второй задачи также выписывается в аналитической форме и сводится к нахождению напряжений в краевой части пласта для выработанного пространства с зависающей кровлей. Третья задача — это решение основной задачи, схематически изображенной на рис. 1, с использованием численного алгоритма [7, 8].

Будем считать, что по сместителю разрывного нарушения возможно свободное взаимное проскальзывание его берегов, т. е. на нем реализуются независимо от нормальных нулевые касательные напряжения. Это наиболее неблагоприятный вариант развития напряженно-деформированного состояния в массиве. Очевидно, что в общем случае налегающий массив горных пород при проходке выработки удерживается от оседания как собственно “целиком”, так и силами сцепления и трения по плоскости контакта сместителя. При отсутствии последних вся нагрузка приходится на “целик”, на котором отмечаются повышенные напряжения сжатия в сравнении со случаем, когда разрыва нет.

При сравнительно малой протяженности “целика” он может разрушиться в динамическом режиме и произойдет внезапное опускание кровли с катастрофическими последствиями. При наличии по поверхности разрыва некоторого сцепления этого может не случиться, но кровля очистной выработки зависнет, что также представляет собой большую опасность обрушения ее в последующем.

Отметим следующее. Поскольку рассматривается разлом с нулевыми касательными напряжениями, то по нему фактически допускаются неограниченные трением и сцеплением касательные сдвиги массива. А это должно приводить к возникновению зон концентрации, в частности касательных напряжений в удаленных концах разлома для обеспечения общего равновесия массива. Если протяженность такого разлома велика, то эти зоны в малой степени влияют на напряженное состояние вблизи выработок и их можно не рассматривать. При необходимости геомеханическая модель может быть усложнена, однако она потребует дополнительных деформационных параметров, характеризующих разлом [9].

В рамках первой задачи рассмотрим геомеханическую ситуацию, схематично изображенную на рис. 2, где показан целик, оставленный в выработанном пространстве для поддержания кровли. По мере развития горных работ увеличивается величина L либо уменьшается l , в связи с чем растет нагрузка на целик и создаются условия для его разрушения. Характер такого разрушения проанализирован ранее в [6] и выявлены условия его возможного катастрофического протекания.

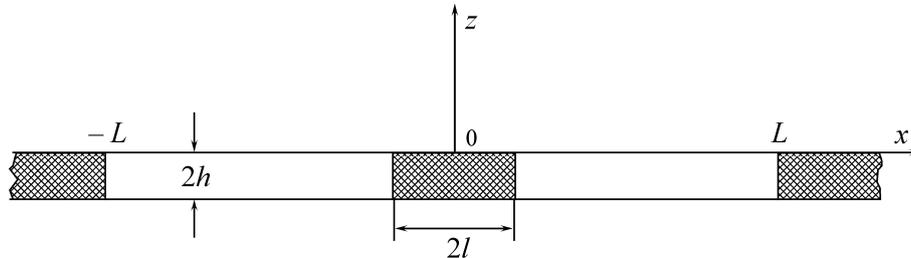


Рис. 2. Геомеханическая ситуация при отработке пласта с оставлением целика

В рассматриваемой здесь задаче выработка моделируется разрезом в плоскости xz и решается методом комплексных потенциалов для верхней полуплоскости $z > 0$. При этом граничные условия задаются на прямой $z = 0$ и сводятся к следующим соотношениям:

— на отрезках $[-L, -l]$ и $[l, L]$ напряжения нормальные к линии разреза полагаются равными нулю:

$$\sigma_n = 0;$$

— на отрезках $[-\infty, -L]$ и $[L, \infty]$ вертикальные смещения считаются равными нулю:

$$v = 0.$$

Наиболее сложные условия задаются на отрезке $[-l, l]$, т. е. там, где расположен целик. На этом участке вертикальные смещения всех точек полагаются равными

$$v = \Delta h,$$

Δh — некоторая заданная постоянная величина, т. е. на всем отрезке верхняя полуплоскость испытывает постоянное вертикальное перемещение. Из физических соображений оно должно быть направлено вниз. Вопрос состоит в том, чему равна величина Δh .

Отметим, что представленная задача — задача сопряжения, т. е. совместного деформирования двух тел: верхней полуплоскости и целика. Относительно целика будем полагать, что его напряженное состояние одномерно и описывается некоторой величиной $\Delta h_{ц}$. Сопряжение состоит в том, что всегда $\Delta h = \Delta h_{ц}$. Это дает основание выписать все последующие соотношения. Взаимодействие целика и вмещающих пород происходит по линии контакта между ними и характеризуется, с одной стороны, средним вертикальным напряжением по этой линии, а с другой — средним смещением по той же линии.

В соответствии со схемой на рис. 2 обозначим через $\sigma_{ц}$ усредненную по всей площади целика интенсивность его реакции на сжатие вмещающими горными породами, а через $\Delta h_{ц}$ — среднее смещение кровли целика, вызванное отработкой пласта.

Согласно [6], эти две переменные величины связаны между собой. При условии равновесия и неразрывности горных пород вокруг выработок данная связь определяется из решения соответствующей задачи геомеханики, математическая постановка которой и ее общее решение да-

ны в работе [6]. Из решения выводится уравнение, связывающее интенсивность реакции целика и сближение кровли и почвы на участке целика. В принятых обозначениях это уравнение имеет вид

$$\frac{\sigma_{ц}}{\gamma H} = A\left(\frac{L}{l}\right) - MB\left(\frac{L}{l}\right) \frac{\Delta h_{ц}}{h}, \quad (1)$$

где

$$M = \frac{1}{\gamma H [(1 - \nu_n^2)/E_n + (1 - \nu_k^2)/E_k]} \frac{h}{l},$$

$A\left(\frac{L}{l}\right)$, $B\left(\frac{L}{l}\right)$ — известные функции. Они сравнительно просто записываются через полные эллиптические интегралы $K(k)$, $E(k)$ [10] в виде

$$A\left(\frac{L}{l}\right) = \left\{ E(k) - K(k) + \frac{K(k)}{K(k')} E(k') \right\} \frac{1}{k}, \quad B\left(\frac{L}{l}\right) = \frac{K(k)}{K(k')},$$

где

$$k = l/L, \quad k' = \sqrt{1 - (l/L)^2}.$$

В уравнении (1) три переменных величины: $\sigma_{ц}/\gamma H$, $\Delta h_{ц}/h$, L/l . Из них L/l — независимая величина, которая полностью определяется технологией горных работ и со временем только возрастает. При разработке пласта L возрастает, l остается постоянной, а при отработке целика l убывает, в то время как L остается постоянной. В обоих случаях L/l возрастает.

Обратим внимание на коэффициент M в уравнении (1). Он объединяет исходные параметры горного массива и относительный размер целика, но не зависит от его деформационных характеристик. Следовательно, M является единственным критерием подобия, по которому можно судить об идентичности реакции целика (независимо от его физического состояния) на сближение кровли и почвы для разных вмещающих горных массивов. Обычно значения параметра M и его вариации в реальных условиях можно определить заранее, исходя из горно-геологических условий разработки пласта.

Весь процесс нагружения целика связан с уравнением (1). Из него, в частности, следует, что реакция целика $\sigma_{ц}/\gamma H$ и сближение кровли и почвы $\Delta h_{ц}/h$ связаны линейно. При этом, чем больше сближение $\Delta h_{ц}/h$, тем меньше реакция $\sigma_{ц}/\gamma H$ и, наоборот, чем больше $\sigma_{ц}/\gamma H$, тем меньше $\Delta h_{ц}/h$. В прямоугольных координатах — $\sigma_{ц}/\gamma H$, $\Delta h/h$, L/l при постоянном значении M уравнение (1) описывает поверхность неразрывности взаимодействия вмещающих горных пород и целика на всех стадиях деформирования вплоть до полного разрушения. Иначе говоря, деформация сжатия целика независимо от его деформационных свойств как на стадии возрастания нагрузки, так и на стадии запредельного деформирования будет соответствовать сближению боковых пород $\Delta h/h$, связанному линейно с $\sigma_{ц}/\gamma H$ уравнением (1). При этом каждому значению параметра M будет соответствовать своя поверхность неразрывности, независимо от деформационно-прочностных свойств целика.

Характерно, что при постоянных значениях L/l сечением поверхности неразрывности будут прямые линии, которые описываются в координатной плоскости — $\sigma_{ц}/\gamma H$, $\Delta h/h$ тем же уравнением (1). Эти прямые будем называть образующими поверхности неразрывности, каждая из которых соответствует определенному значению L/l .

Каждый целик, как и составляющие его горные породы, имеет свою диаграмму напряжение – деформация с запредельной ниспадающей ветвью. Количественно диаграммы для разных целиков могут существенно отличаться друг от друга по величине временного сопротивления сжатию σ^B , по наклону и крутизне как на нарастающем, так и на ниспадающем участке. Уравнение диаграммы напряжение – деформация запишем в виде

$$\sigma_{сж} = \gamma HF \left(\frac{\Delta h}{h} \right), \quad F(0) = 1. \quad (2)$$

Заметим, что эта диаграмма относится к квазистатическому нагружению целика, включая ниспадающую ветвь запредельного деформирования. Уравнение (1) тоже относится к квазистатическому сближению вмещающих горных пород в зависимости от L/l .

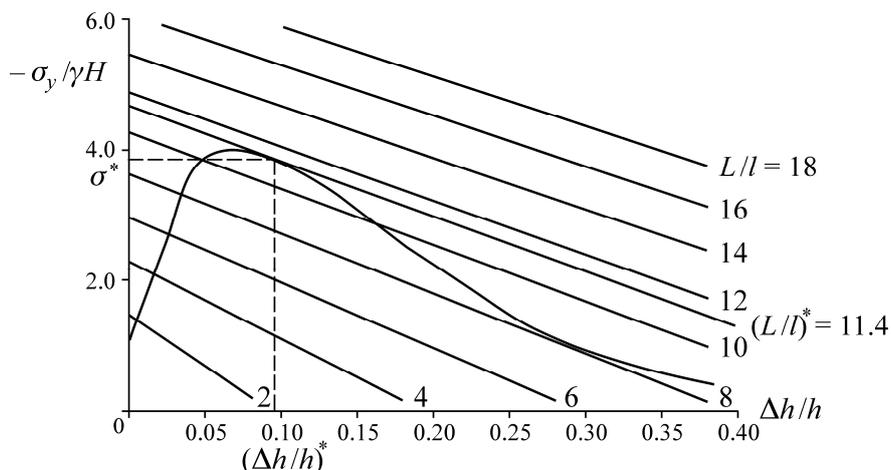


Рис. 3. Проекция на координатную плоскость $-\sigma_y/\gamma H$, $\Delta h/h$ сечений поверхности неразрывности для $M = 20$ при L/l , равных 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, и кривой нагружения целика, совпадающей с диаграммой напряжение – деформация

До тех пор, пока процесс сжатия целика вмещающими горными породами остается квазистатическим, реакция целика σ_c и средние сжимающие напряжения $\sigma_{сж}$ должны быть не только равны при одних и тех же значениях $\Delta h/h$, но и удовлетворять одновременно уравнениям (1), (2). Совместное решение этих уравнений дает зависимость нагрузки на целик и деформации целика от L/l .

На поверхности неразрывности это решение дает соответствующую кривую, проекция которой на координатную плоскость $-\sigma_y/\gamma H$, $\Delta h/h$ будет совпадать с диаграммой напряжение – деформация целика на участке существования совместного решения уравнений (1), (2). На рис. 3 показаны полная диаграмма напряжение – деформация и семейство прямых, которые являются проекциями образующих поверхности неразрывности. Иначе говоря, эти прямые представляют собой решения линейного уравнения (1) при различных значениях L/l .

Точки пересечения таких прямых с диаграммой напряжение – деформация соответствуют совместным решениям уравнений (1) и (2). По точкам пересечения легко проследить, как с увеличением L/l изменяется нагрузка на целик и как он деформируется. Очевидно, что прямые того же семейства, которые не пересекают диаграмму напряжение – деформация целика, относятся к значениям L/l , при которых не существует совместных решений уравнений (1) и (2). Эти значения L/l физически не реализуются.

На рис. 3 среди семейства прямых, приведенных в качестве примера для параметра $M = 20$, есть одна прямая, которая является касательной к данной диаграмме напряжение–деформация на участке ниспадающей ветви. Она соответствует определенному значению L/l , которое обозначим через $(L/l)^*$. Заметим, что чем меньше значение параметра M , тем более пологими становятся прямые соответствующего семейства, а точка касания располагается ближе к максимуму на диаграмме, оставаясь на ниспадающей ветви.

Относительный пролет разрабатываемого участка пласта L/l будет критическим, если он достигнет значения $(L/l)^*$. При этом равновесие вмещающих горных пород становится неустойчивым, и они самопроизвольно переходят в динамическое сжатие целика. Действительно, при критическом значении L/l , равном $(L/l)^*$, и соответствующем значении $(\Delta h/h)^*$ дальнейшее самопроизвольное сближение вмещающих горных пород становится невозможным, так как с увеличением $\Delta h/h$ напряжение $\sigma_{ц}$, соответствующие статической реакции целика, оказывается больше несущей способности самого целика. При этом $\sigma_{ц}$ убывает по линейному закону (1), а $\sigma_{сж}$ убывает в соответствии с диаграммой целика (2) на ниспадающем участке предельного деформирования.

Разность между $\sigma_{ц}$ и $\sigma_{сж}$, которая сначала увеличивается, а затем убывает до нуля, компенсируется соответствующим развитием динамического сближения вмещающих горных пород, т. е. сближением с ускорением, а следовательно, и динамическим воздействием на целик. Сила этого воздействия и вызываемое им динамическое разрушение целика определяются той же разностью $\sigma_{ц} - \sigma_{сж}$.

Критическое значение $(L/l)^*$ находится в соответствии с (1), (2) из совместного решения уравнений

$$F\left(\frac{\Delta h}{h}\right) = A\left(\frac{L}{l}\right) - MB\left(\frac{L}{l}\right)\frac{\Delta h}{h}, \quad \frac{d}{d\left(\frac{\Delta h}{h}\right)}F\left(\frac{\Delta h}{h}\right) = -MB\left(\frac{L}{l}\right),$$

которые при существовании решения являются необходимым условием проявления горного удара. Первое из этих уравнений выражает условие неразрывности взаимодействия целика и вмещающих горных пород, а второе определяет условие равенства наклона касательной к диаграмме напряжение–деформация целика и прямой, соответствующей уравнению (1) при $(L/l)^*$.

Конечный результат проведенных рассуждений и вычислений представлен на рис. 4, где показана зависимость безразмерного среднего сжимающего напряжения на целике $\sigma_{ц}/\gamma H$ от его относительного размера l/L . Очевидно, что в случае, когда целик занимает значительную долю выработанного пространства, т. е. $l/L > 0.5$, концентрация напряжений на нем близка к единице. С другой стороны, эта концентрация не может превысить значения 4 в соответствии с принятой диаграммой деформирования целика. Загиб графика при $l/L \approx 0.1$ связан с предельным деформированием и последующим динамическим разрушением целика.

Отметим, что в рассматриваемой постановке плоскость $x = 0$ является плоскостью симметрии задачи и, следовательно, на ней касательные напряжения равны нулю. Тем самым по граничным условиям левая часть ($x < 0$) схемы на рис. 2 практически совпадает со схемой на рис. 1, вследствие чего можно считать, что в какой-то мере будут совпадать и соответствующие решения.

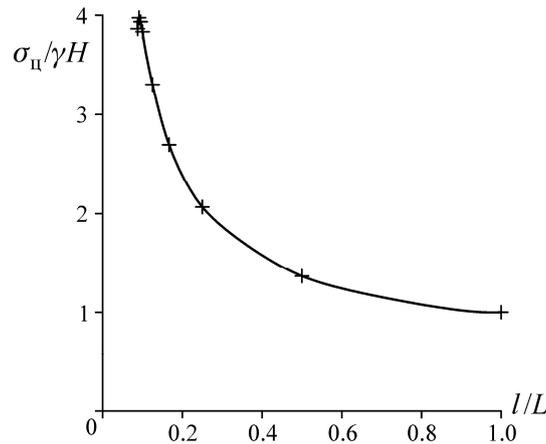


Рис. 4. Нагрузка на целик в зависимости от отношения l/L

Вместе с тем отметим имеющиеся различия. В задаче с целиком (см. рис. 2) на плоскости $x = 0$ отсутствуют горизонтальные смещения, чего нет на плоскости разрывного нарушения (рис. 1). Это приводит к различию в нормальных напряжениях по указанным плоскостям. Они имеют одинаковый характер распределения по z , но различаются в зоне концентрации примерно в 1.5 раза. Однако этим различием можно фактически пренебречь ввиду того, что трение по сместителю нарушения считается равным нулю ($\operatorname{tg}\rho = 0$) и не зависит от σ_n .

Все это в конечном итоге оправдывает применение результатов [6] для описания состояния и поведения “целика”, изображенного на рис. 1. Далее попытаемся количественно обосновать такое применение.

Рассмотрим теперь ситуацию в рамках задачи, показанной на рис. 1, когда в краевой части пласта нет вертикальной трещины, и сравним получаемые результаты с приведенными на рис. 4.

Вторая задача, как и первая, решается для верхней полуплоскости методом комплексных потенциалов. Отличие от первой задачи состоит в том, что здесь нет участка, относящегося к целику, поскольку он фактически отсутствует. Можно выделить только три участка с характерными граничными условиями — участок выработанного пространства и два участка пласта, еще не затронутого горными работами по обе стороны выработанного пространства. Как и в первой задаче, на свободной поверхности кровли выработанного пространства $0 < x < L - l$ нормальные к ней напряжения полагаются равными нулю. На остальных участках $x < 0$, $x > L - l$, не затронутых работами, вертикальные смещения равны нулю.

Вертикальные напряжения в краевой части пласта $x > L - l$ в обозначениях рис. 1 имеют вид [11]

$$\bar{\sigma}_y = -\frac{\sigma_y}{\gamma H} = \frac{x}{\sqrt{x^2 - ((L-l)/2)^2}}. \quad (3)$$

Усреднение напряжений будем проводить по отрезку в краевой части пласта, эквивалентному по протяженности целику l . Среднее напряжение получается интегрированием (3) в пределах от $(L-l)/2$ до $(L+l)/2$ и запишется соотношением

$$\sigma_{II} = \frac{1}{l} \int_{(L-l)/2}^{(L+l)/2} \frac{x dx}{\sqrt{x^2 - ((L-l)/2)^2}} = \sqrt{\frac{L}{l}}. \quad (4)$$

Эта зависимость представлена на рис. 5 (кривая 1). Здесь же показано изменение усредненной нагрузки на целик по мере развития выработанного пространства (кривая 2). Обе кривые практически совпадают для протяженного целика ($l/L > 0.2$), и это свидетельствует о том, что распределения вертикальных напряжений σ_y в целике и в краевой части пласта идентичны. При $l/L > 0.2$ начинает сказываться нелинейный характер деформирования целика.

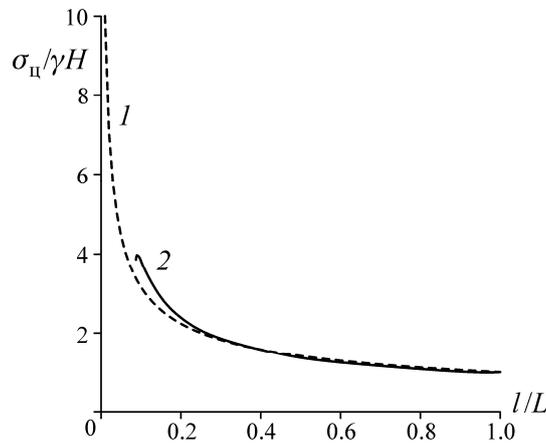


Рис. 5. Сопоставление средних напряжений: 1 — в краевой части пласта; 2 — в целике

Приведем решение задачи (см. рис. 1) с использованием численного алгоритма, т. е. рассмотрим в плоской постановке влияние вертикальной трещины (разлома), нормально секущей основную кровлю пласта, на состояние и поведение массива горных пород в окрестности очистной выработки при продвижении забоя. Исследуем ситуацию, когда забой постепенно приближается к плоскости такой трещины. При этом рассматривается наиболее неблагоприятный с точки зрения нагруженности и деформаций массива вариант, когда плоскость трещины параллельна плоскости забоя. В какой-то момент развития горных работ они будут располагаться достаточно близко друг от друга и могут даже совпасть. Оценка напряженно-деформированного состояния массива именно в этом положении забоя представляет наибольший интерес ввиду возможных катастрофических проявлений горного давления.

Описанный ранее [7, 8] концептуальный подход и алгоритм в полной мере могут быть использованы и для решения данной задачи. Предлагаемый здесь подход основан на методе разрывных смещений — одном из вариантов метода граничных элементов. При этом границы исследуемой области (в нашем случае — выработка и разлом), моделируемые соответствующими разрезами, разбиваются на некоторое количество граничных элементов. Определяющими параметрами метода являются нормальное σ_n и касательное τ_n напряжения на каждом из элементов разбиения границы исследуемой области, а также скачки смещений на этих элементах D_n и D_t . Из условий равновесия рассматриваемой области формируется система линейных алгебраических уравнений для D_n и D_t . Решение системы позволяет вычислить все параметры напряженно-деформированного состояния, в частности в кровле над выработанным пространством, а также над пластом. Граничные условия также ставятся в терминах упомянутых напряжений и скачков смещений.

Для простоты будем полагать, что касательные напряжения τ_n по всей длине трещины равны нулю, т. е. отсутствует соответствующая остаточная прочность контакта берегов. Это соответствует ситуации, когда трещина (разлом) заполнена перемятым материалом, глиной

трения, особенно при наличии воды. Таким образом, будем полагать, что для всех граничных элементов разлома $\tau_n = 0$. С точки зрения возможных динамических проявлений горного давления это наиболее неблагоприятный вариант. В расчетах примем, что длина трещины сдвига, на которой реализуется принятое условие по τ_n , равна 100 м.

Касательные смещения по этой трещине определяются из решения геомеханической задачи в рамках описанного алгоритма. В отличие от предыдущей постановки, в рамках первой задачи нормальные напряжения σ_n и нормальные смещения v_n по трещине могут отличаться от нуля.

Таким образом, на разломе задаются только величины τ_n , в то время как остальные параметры вычисляются в результате решения. Разлом при этом может испытывать как сжатие, так и растяжение с возможным расхождением берегов.

Выработка также моделируется набором граничных элементов. Считается, что на ней σ_n и τ_n равны нулю, а соответствующие параметры D_n и D_t свободны и должны определяться из решения. Оценки дадим для некоторой модельной ситуации, в которой выработанное пространство развивается в горизонтальном направлении вдоль оси Ox начиная с $x = 0$ м до $x = 40$ м. Плоскость сместителя вертикальной трещины располагается при $x = 40$ м.

Таким образом, на начальном этапе между забоем выработки и трещиной находится постепенно уменьшающийся до нуля “целик”, представляющий собой краевую часть отработываемого пласта.

На рис. 6 приведены кривые оседания v кровли выработанного пространства для различных последовательных этапов его развития: $L = 20, 30, 35, 39, 40$ м (цифры на графике соответствуют величине L).

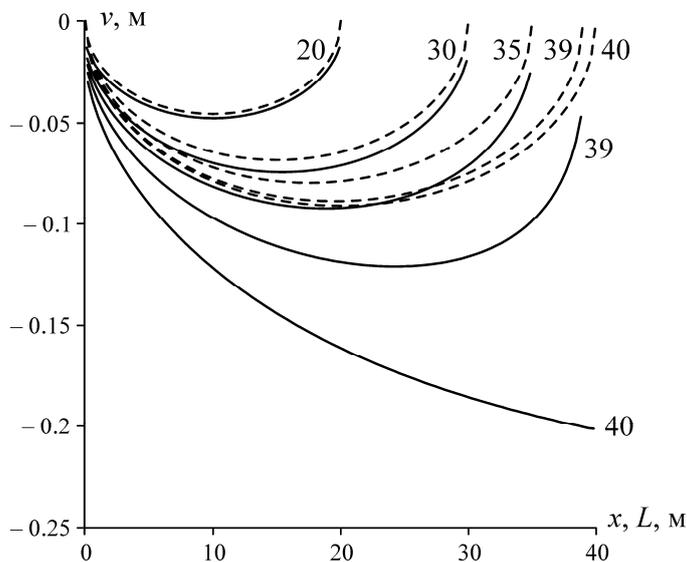


Рис. 6. Оседание кровли выработанного пространства при наличии трещины (сплошные линии) и без трещины (штриховые)

Отметим, что даже на этапе развития работ, когда забой приближается к плоскости трещины ($L < 40$ м), она оказывает заметное влияние на деформационные процессы в массиве. Форма кривой оседания кровли становится асимметричной, а максимальные значения оседания увеличиваются, хотя на краях они остаются все время незначительными и равными величине упругого сжатия краевой части пласта.

При увеличении протяженности выработки до $L = 40$ м, т. е. когда “целик” полностью исчезает, смещение кровли на забое мгновенно претерпевает скачок по плоскости трещины на ~ 0.2 м. Такое внезапное опускание кровли может вызвать мощный динамический эффект, сопровождающийся обрушением кровли по всему выработанному пространству.

Вертикальная трещина существенно изменяет напряженное состояние краевой части пласта, что отражено на рис. 7, где показано распределение вертикальных напряжений σ_y по кровле пласта для различных L . При этом забой выработки постепенно приближается к сместителю трещины, расположенному при $x = 40$ м, т. е. L изменяется в пределах 20–40 м.

Отметим, что по мере приближения забоя к плоскости трещины нагрузка на “целик” становится больше, чем при отсутствии трещины, а за плоскостью трещины — меньше, т. е. происходит разгрузка пласта.

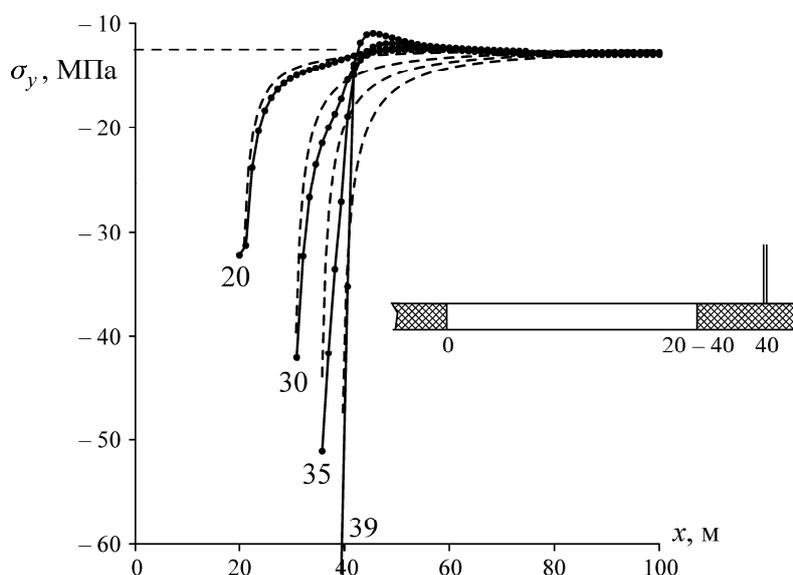


Рис. 7. Вертикальные напряжения в краевой части пласта при наличии трещины (сплошные линии) и без трещины (штриховые)

В качестве примера для варианта $L = 40$ м и $l = 10$ м это детально показано на рис. 8, где штриховая кривая 1 отвечает распределению σ_y в краевой части пласта без трещины, а сплошная линия 2 — при наличии трещины в рамках третьей задачи. При этом 1 — точное решение (3), а 2 — численное решение. Они пересекаются в точке А при $x = 40$ м, т. е. на линии трещины. В пределах “целика” от 30 до 40 м кривая 2 лежит ниже 1, значит при наличии трещины “целик” более нагружен, чем такой же по протяженности участок краевой части пласта при ее отсутствии.

Среднее напряжение для кривой 1 легко вычисляется в соответствии с (4), однако для 2 такое вычисление затруднено в связи с тем, что приходится интегрировать результаты численного расчета, полученные в заранее заданном наборе точек вблизи забоя выработки, где имеется особенность по напряжениям, в том числе и по σ_y . Это не способствует получению точных результатов, но можно полагать, что должна иметь место сходимость при увеличении числа точек в зоне интегрирования. Конечный результат дает скорее оценку усредненной нагрузки.

Можно констатировать, что средние напряжения для кривой 2 будут лежать (см. рис. 5) на 0.1–0.2 выше кривой 1.

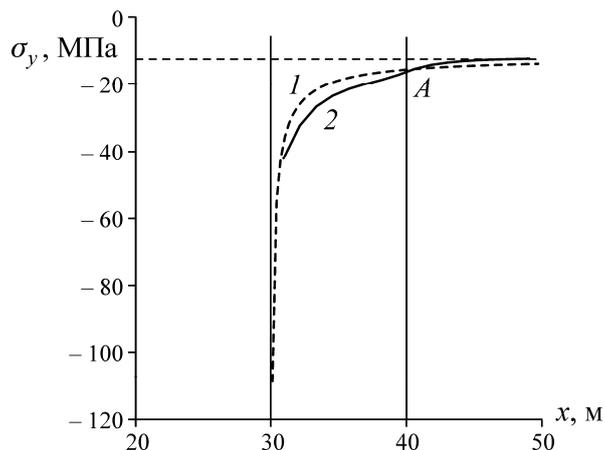


Рис. 8. Сопоставление вертикальных напряжений в краевой части пласта при наличии трещины (сплошная линия) и без трещины (штриховая) для $L = 40$ м и $l = 10$ м

При постановке задачи (см. рис. 1) предполагалось, что пласт имеет мощность $2h$, и это учитывалось при численном решении в рамках третьей задачи. Однако результаты, полученные при решении первой и второй задачи, основаны на моделировании выработанного пространства разрезом [11]. Возникает вопрос о правомерности сравнения результатов, имеющих различную постановку задачи. Отметим, что ранее [12] были проведены оценки влияния h на характер распределения напряжений вблизи выработки и, в частности, в кровле пласта при $y = h$, $x > L$. В случае малых h/L , т. е. при $h/L < 0.1$, эти напряжения фактически не отличаются от напряжений для разреза при $h = 0$. В связи с этим сравнение полученных выше результатов представляется вполне закономерным.

ВЫВОДЫ

Сравнивая решения первой и второй задач по средним напряжениям в целике, а второй и третьей — непосредственно по распределению фактических вертикальных напряжений, приходим к следующим выводам.

Постановка третьей задачи в полной мере отображает реальные граничные условия, и ее решение при адекватном выборе сетки граничных элементов наиболее точное. Оно на 10–20 % превышает решение второй задачи, а значит, и первой при $l/L > 0.2$, что является следствием различия граничных условий этих задач на плоскости трещины. Таким образом, с указанной точностью поведение “целика” в краевой части пласта, отделенного вертикальной трещиной, может быть описано в рамках первой задачи. Решение выписывается в конечном виде и позволяет, кроме того, учесть запредельное деформирование, т. е. фактически разрушение “целика” как в квазистатическом, так и динамическом режиме. Внезапное разрушение “целика”, которое может произойти при достижении им критического размера $(l/L)^*$, приводит к мгновенному опусканию кровли на десятки сантиметров, а при наличии трещин напластования — и к большим значениям. При этом основная кровля образует консоль, которая может обрушиться на всем протяжении выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рева В. Н., Барковский В. М., Белоусов А. П. Исследование устойчивости подготовительных и нарезных выработок в зонах тектонических нарушений рудников Норильского ГМК // ФТПРПИ. — 1984. — № 3.

2. **Гаджиев М. М., Панасьян Л. Л.** Результаты изучения напряженного состояния массивов сложного строения расчетным методом // Напряженно-деформированное состояние и устойчивость скальных склонов и бортов карьеров. — Фрунзе: Илим, 1979.
3. **Вардересян Т. Л.** Исследование влияния мощности разлома на поле напряжений в массиве пород вокруг камеры // Там же.
4. **Векслер Ю. А., Жданкин Н. А., Колоколов С. Б.** Напряженное и деформированное состояние массива горных пород в окрестности забоя выработки в зоне геологического нарушения // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. — Новосибирск, 1981.
5. **Егоров П. В., Редькин В. А., Калугин В. В., Пашенко А. В.** Исследование влияния разрывных нарушений на проявление горных ударов // Горн. журн. — 1983. — № 5.
6. **Трубецкой К. Н., Бронников Д. М., Кузнецов С. В., Трофимов В. А.** Механизм горных ударов и расчет нагрузок на разделительный целик при разработке пластообразной залежи // ФТПРПИ. — 1995. — № 5.
7. **Кузнецов С. В., Трофимов В. А.** Метод оценки расслоения пород кровли протяженной очистной выработки // Труды конф. “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009.
8. **Кузнецов С. В., Трофимов В. А.** Об устойчивости кровли протяженной очистной выработки // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: матеріали II міжнар. конф. — Днепропетровск: Національний гірничий університет, 2011.
9. **Трофимов В. А.** Численное моделирование взаимодействия разлома и очистных выработок по мере развития горных работ // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. — Фрунзе, 1985.
10. **Градштейн И. С., Рыжик И. М.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. — М.: Госиздат физ.-мат. лит., 1963.
11. **Кузнецов С. В.** Общие закономерности и характерные особенности перераспределения напряжений в массивах горных пород при развитии выработанного пространства // ФТПРПИ. — 1988. — № 6.
12. **Кузнецов С. В., Трофимов В. А.** Напряженно-деформированное состояние краевой части пласта // Третьи Ержановские чтения. — Актобе, 2010.

Поступила в редакцию 25/XII 2013