

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ДАВЛЕНИЯ ГАЗА  
В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

С. В. Кузнецов

(Новосибирск)

Большое значение для исследования условий разрушения газированного угольного пласта имеет вопрос о взаимодействии напряжений, передающихся по угольному скелету, с газом, находящимся в порах угольного пласта. Действительно, при разрушении, особенно при разрыве угля, разрушаются не зерна, образующие скелет угольного пласта, а связь между отдельными зернами. Поэтому важно знать усилия, передающиеся по угольному скелету через поверхности контакта зерен, т.е. усилия, прижимающие зерна одно к другому. Такой подход к решению задач о разрушении горных пород, впервые использованный в работе [1], представляет интерес при решении проблемы внезапных выбросов угля и газа, так как позволяет судить о взаимодействии газовых сил и сил горного давления в угольном пласте.

1. Рассмотрим площадку в угольном пласте с площадью, равной единице. Если  $n$  — просвет между зернами [2], то  $1-n$  — площадь проекции «пересеченных» зерен на эту площадку. Часть этой площади  $\delta$  занята проекциями контакта «пересеченных» зерен и расположенных с одной из сторон от выбранной площадки.

Пусть  $q$  — полное давление на выбранную площадку;  $q_s$  — давление, передающееся через контакт между зернами;  $p$  — давление газа в порах. Исходя из условия равновесия сил, действующих на площадку, имеем

$$q_s = q - P, \quad P = [1 - (1 - n) \delta] p \quad (1.1)$$

Будем считать, что величина  $P$  не зависит от направления выбранной площадки, а следовательно, может рассматриваться как дополнительное гидростатическое давление. Тогда компоненты напряжений  $\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ , передающихся непосредственно через контакт между зернами, можно записать, согласно (1.1), в виде

$$\sigma'_x = \sigma_x + P, \quad \sigma'_y = \sigma_y + P, \quad \sigma'_z = \sigma_z + P \quad (1.2)$$

Здесь  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — компоненты напряжения, соответствующие полному давлению на единичную площадку.

2. Рассмотрим распределение напряжений в призабойной зоне угольного пласта применительно к очистной выработке, где соотношение между мощностью пласта и протяженностью забоя всегда таково, что с большой степенью точности можно исходить из решения задачи о плоской деформации.

Допустим, что горная выработка проводится на достаточно большой глубине, где разрабатываемый угольный пласт, мощность которого равна  $2h$ , ведет себя в призабойной зоне как пластическая среда [3]. При этом можно считать, что напряженное состояние в этой зоне соответствует напряженному состоянию вблизи свободного конца пластической полосы, зажатой между двумя жесткими плитами. В пластическом состоянии интенсивность касательных напряжений в угле примем постоянной и равной  $k$ .

Выберем систему координат  $Oyz$  так, чтобы начало координат было связано с плоскостью забоя, ось  $z$  проходила по нормали к пласту, а ось  $y$  была направлена в глубь массива по простиранию в плоскости сим-

метрии пласта. Уравнения равновесия в выбранной системе координат имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Задача о плоской деформации пластического тела при условии пластичности

$$(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2 = 4k^2 \quad (2.2)$$

как известно [4], приводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi}{\partial y} - \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \chi}{\partial y} + \cos 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \sin 2\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Функции  $\chi(y, z)$  и  $\varphi(y, z)$  связаны с полными компонентами напряжения зависимостями

$$\left. \begin{matrix} \sigma_y \\ \sigma_z \end{matrix} \right\} = \sigma_0 + k(2\chi \pm \cos 2\varphi), \quad \tau_{yz} = k \sin 2\varphi \quad (2.4)$$

Здесь  $\sigma_0$  — произвольная, но наперед выбранная величина. Полагая  $\chi + \varphi = \xi$ ,  $\chi - \varphi = \eta$ , имеем следующие канонические уравнения характеристик системы (2.3):

$$\frac{\partial z}{\partial \eta} = \operatorname{tg} \left( \varphi + \frac{\pi}{4} \right) \frac{\partial y}{\partial \eta}, \quad \frac{\partial z}{\partial \xi} = \operatorname{tg} \left( \varphi - \frac{\pi}{4} \right) \frac{\partial y}{\partial \xi} \quad (2.5)$$

Если воспользоваться методом характеристик [4], то уравнения (2.5) и соотношения, связывающие  $\chi$  и  $\varphi$  с  $\xi$  и  $\eta$  на характеристиках, при соответствующих граничных условиях позволяют определить искомые функции в конечном числе точек сетки характеристик. Величины  $\xi$  и  $\eta$  предполагаются, вообще говоря, переменными. Однако в тех областях, где  $\xi$  и  $\eta$  постоянны, существуют частные решения [5], удовлетворяющие уравнениям (2.5).

Для решения рассматриваемой задачи необходимо записать граничные условия на поверхности контакта и свободной поверхности забоя.

Если на поверхности контакта имеет место спайка между угольным пластом и прочными боковыми породами, то касательное напряжение  $\tau_{yz}$  на этой границе достигает своего максимального значения, равного  $k$ . В тех случаях, когда спайка между пластом и боковыми породами отсутствует или между пластом и прочными боковыми породами имеется мягкая пластическая прослойка, играющая роль смазки, касательное напряжение  $\tau_{yz}$  на границе порода—пласт также достигает некоторого максимального значения, но оно будет меньше  $k$ .

Следовательно, граничное условие на плоскостях контакта ( $z = \pm h$ ) можно записать в виде

$$|\tau_{yz}| = \tau_s \quad (2.6)$$

В случае спайки между угольным пластом и породой  $\tau_s = k$ , а при отсутствии спайки  $\tau_s < k$ . Граничное условие на свободной поверхности ( $y = 0$ ) имеет вид

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{yz} = 0 \quad (2.7)$$

По результатам расчетов, выполненных методом характеристик при граничных условиях (2.6) и (2.7), построены (фиг. 1) эпюры нормальной компоненты напряжения  $\sigma_z$  вдоль контактной поверхности при различных значениях  $\tau_s$ .

Из построения решения методом характеристик с использованием частных решений уравнений (2.5) при постоянных  $\xi$  и  $\eta$  следует, что при любых  $\tau_s$ , меньших или равных  $k$ , распределение напряжений в пласте непрерывно.

Как видно из графиков (фиг. 1), при  $\tau_s$  больше нуля и меньше  $k$  эпюра напряжений состоит из двух видов чередующихся между собой участков.

К первому виду отнесем участки, на которых при изменении расстояния от забоя величина компоненты напряжения остается постоянной, а ко второму виду — участки, на которых с увеличением расстояния от забоя величина компоненты напряжения возрастает. Если рассмотреть два каких-либо соседних участка, то легко заметить, что с увеличением  $\tau_s$  длина участка первого вида уменьшается и при  $\tau_s$ , равном  $k$ , этот участок вырождается (исключая участок, примыкающий к свободной поверхности), и эпюра напряжений будет состоять только из участков второго вида. При  $\tau_s$ , равном нулю, наоборот, вырождаются участки второго вида, а участки первого вида достигают своего максимального значения, равного  $2h$ , и сливаются в непрерывную прямую, выражающую постоянство компоненты напряжения при изменении расстояния от свободной поверхности, т. е. при  $\tau_s$ , равном нулю, имеет место равномерное распределение напряжений и компоненты напряжения принимают значения

$$\sigma_y = 0, \quad \sigma_z = -2k, \quad \tau_{yz} = 0 \quad (2.8)$$

Отметим, что каждый последующий участок первого вида, начиная от свободной поверхности, меньше предыдущего участка того же вида, а при достаточно больших расстояниях от свободной поверхности участки первого вида практически вырождаются.

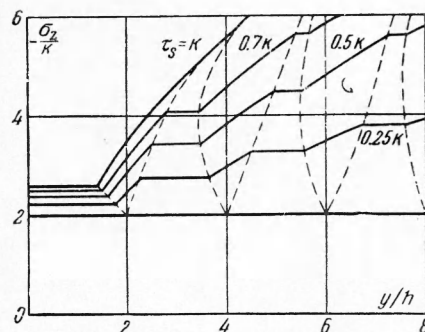
В то же время, каждый участок второго вида, начиная от свободной поверхности, больше предыдущего участка того же вида, и при достаточно больших расстояниях от забоя эти участки практически соединяются между собой.

3. Можно показать, что асимптотическое решение системы (2.1), (2.2) при граничном условии (2.6), соответствующем сжатию бесконечной пластической полосы между жесткими плитами, имеет вид

$$\begin{aligned} -\frac{\sigma_y}{k} &= T + \frac{\tau_s}{k} \frac{y}{h} - 2 \sqrt{1 - \left( \frac{\tau_s}{k} \frac{z}{h} \right)^2} \\ -\frac{\sigma_z}{k} &= T + \frac{\tau_s}{k} \frac{y}{h}, \quad \frac{\tau_{yz}}{k} = \frac{\tau_s}{k} \frac{z}{h} \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $T$  — произвольная постоянная.

В случае полубесконечной полосы уравновешивающаяся нагрузка на свободной поверхности, согласно принципу Сен-Венана, не будет заметно влиять на напряженное состояние этой полосы в некотором отдалении от свободной поверхности. Исходя из этого, можно полагать, что, если будет удовлетворено в среднем по мощности пласта граничное условие на свободной поверхности, то напряженное состояние полубесконечной полосы, начиная с некоторого расстояния от свободной поверхности, с достаточно большой точностью будет описываться решением (3.1). Входящая в него произвольная постоянная  $T$  определится из условия равен-



Фиг. 1. Эпюры  $\sigma_z$  в призабойной зоне угольного пласта. Пунктиром показаны границы участков с равномерным распределением  $\sigma_z$  при изменении  $\tau_s$  от нуля до  $k$

ства нулю в среднем по мощности пласта компоненты напряжения  $\sigma_y$  на свободной поверхности. Отсюда следует, что в любом сечении, параллельном свободной поверхности пласта, должно выполняться условие

$$\int_0^h \sigma_y dz + \int_0^y (\tau_{yz})_{z=h} dy = 0 \quad (3.2)$$

Внося сюда выражения для  $\sigma_y$  и  $\tau_{yz}$  из (3.1) и интегрируя, будем иметь

$$T = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_s}{k}\right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} \quad (3.3)$$

Фиг. 2. Эпюры  $\sigma_z$  в призабойной зоне угольного пласта при  $\tau_s = 0.5 k$ . Пунктиром показана эпюра, вычисленная по асимптотическим формулам

Подставляя выражение для  $T$  в (3.1), получим приближенное решение задачи о сжатии полубесконечной пластической полосы между жесткими плитами при граничных условиях (2.6) и (2.7), т. е.

$$\begin{aligned} -\frac{\sigma_y}{k} &= \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_s}{k}\right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} + \frac{\tau_s}{k} \frac{y}{h} - 2 \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_s}{k} \frac{z}{h}\right)^2} \\ -\frac{\sigma_z}{k} &= \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_s}{k}\right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} + \frac{\tau_s}{k} \frac{y}{h} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\frac{\tau_{yz}}{k} = \frac{\tau_s}{k} \frac{z}{h}$$

Заметим, что при  $\tau_s$ , равном  $k$ , решение (3.4) совпадает с известным решением Прандтля, а при  $\tau_s$ , равном нулю, решение (3.4) совпадает с точным решением (2.8).

На фиг. 2 приведено для сравнения точное и приближенное решение при  $\tau_s = 0.5 k$ . Решение (3.4), описывающее распределение напряжений в призабойной пластической зоне пласта, неудовлетворительно лишь вблизи поверхности забоя. Однако, учитывая характер распределения давления газа в пласте [6], представляет интерес взаимодействие горного давления и давления газа в окрестности границы газопроницаемой зоны. Эта граница находится на достаточно большом расстоянии от поверхности забоя. Поэтому при исследовании уравнений (1.2) можно пользоваться приближенным решением (3.4) с осредненным значением  $\sigma_y$  по мощности пласта. В результате выражения для компонент  $\sigma'_y$  и  $\sigma'_z$  можно записать в виде

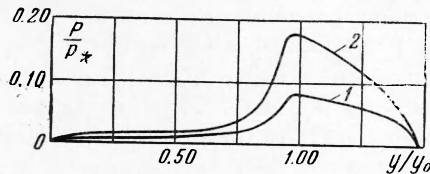
$$\begin{aligned} \sigma'_y &= -\tau_s \frac{y}{h} + P \\ \sigma'_z &= -k \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_s}{k}\right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} \right] - \tau_s \frac{y}{h} + P \end{aligned} \quad (3.5)$$

4. Чтобы определить характер распределения дополнительного гидростатического давления в угольном пласте и оценить его влияние на усилия, с которыми соприкасаются между собой зерна, воспользуемся следующим допущением: при разгрузке пласта увеличение объема элемента угля происходит только за счет увеличения пористости. Это допущение позволяет использовать зависимость параметров  $n$  и  $\delta$ , через которые определяется давление  $P$ , от относительного объемного изменения  $\Delta V / V$  элемента фиктивного грунта [2].

Допустим, что экспериментальным путем установлена зависимость между  $\Delta V / V$  и разгрузкой пласта  $\sigma - \sigma_*$ , т. е.

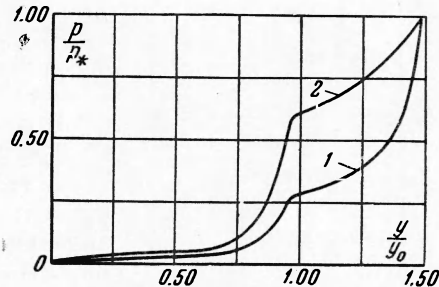
$$\frac{\Delta V}{V} = F(\sigma - \sigma_*) \quad (\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z)) \quad (4.1)$$

Здесь  $\sigma_*$  — значение  $\sigma$  в нетронутом пласте. Тогда, используя (3.4), по формуле (4.1) можно вычислить при известном распределении давления газа дополнительное гидростатическое давление в области разгрузки пласта. (Под областью разгрузки пласта понимается призабойная зона, в которой  $\sigma - \sigma_* > 0$ .)



Фиг. 3

Фиг. 3. Распределение дополнительного гидростатического давления  $P$  в призабойной зоне угольного пласта: кривая 1 при  $ap_* = 31.88$ ,  $b/\rho_* = 0.16$ ; кривая 2 при  $aq_* = 6.25$ ,  $b/\rho_* = 0.34$



Фиг. 4

Фиг. 4. Распределение давления газа  $p$  в призабойной зоне угольного пласта: кривая 1 при  $ap_* = 31.88$ ,  $b/\rho_* = 0.16$ ; кривая 2 при  $aq_* = 6.25$ ,  $b/\rho_* = 0.34$

Если  $F(\sigma - \sigma_*)$  можно представить линейной функцией во всей области разгрузки, то характер распределения  $P$  будет иметь вид, показанный на фиг. 3. Графики  $P$  соответствуют кривым депрессии газа (фиг. 4), вычисленным в работе [6] для плотной упаковки зерен при двух значениях параметров  $ap_*$  и  $b/\rho_*$ , где  $a$  и  $b$  — сорбционные постоянные Ленгмюра,  $p_*$  и  $\rho_*$  — давление и соответствующая ему плотность газа в нетронутом массиве. При расчете пористость на поверхности забоя принята равной 0.1, а в нетронутом пласте — равной нулю.

Характерной особенностью распределения  $P$  будет то, что с увеличением расстояния от забоя основной рост  $P$  происходит на сравнительно небольшом участке вблизи границы газопроницаемой зоны  $y^0$ . Это объясняется тем, что при переходе из газонепроницаемой зоны в газопроницаемую площадки контакта в соответствии с разгрузкой пласта уменьшаются плавно, в то время как давление газа за счет фильтрации резко падает.

Следовательно, при изучении взаимодействия горного давления и давления газа в угольном пласте представляет интерес распределение  $P$  лишь в окрестности границы газопроницаемой зоны, где независимо от вида  $F(\sigma - \sigma_*)$  выражение (4.1) можно записать следующим образом:

$$\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^0 + \left(\frac{dF(\sigma - \sigma_*)}{d\sigma}\right)_{\sigma=\sigma^0} (\sigma - \sigma^0)$$

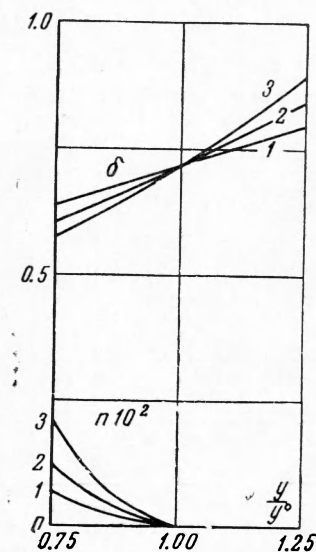
Здесь  $(\Delta V / V)^0$  определяет объемную деформацию фиктивного грунта, при которой геометрические параметры его равны соответствующим геометрическим параметрам угля на границе газопроницаемой зоны;  $\sigma^0$  — значение  $\sigma$  на той же границе.

Используя (3.4), будем иметь

$$\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^0 + G^0 \left(1 - \frac{y}{y^0}\right) \quad (4.2)$$

$$G^0 = G \frac{\tau_s}{k} \frac{y^0}{h}, \quad G = k \left(\frac{dF(\sigma - \sigma_*)}{d\sigma}\right)_{\sigma=\sigma^0} \quad (4.3)$$

Безразмерный параметр  $G$  должен определяться из эксперимента. Его влияние на характер распределения  $n$  и  $\delta$  в окрестности границы газопроницаемой зоны показано на фиг. 5. Соответствующие им графики распределения  $P$  показаны на фиг. 6. Расчет выполнен для случая плотной упаковки зерен. Как видно из графиков, параметр  $G$  оказывает заметное влияние на распределение  $P$  лишь за пределами газопроницаемой зоны, где с увеличением расстояния от забоя влияние газа на напряженное состояние пласта уменьшается. В пределах газопроницаемой зоны характер распределения  $P$  определяется главным образом кривой дисперсии газа.



Фиг. 5. Распределение  $n$  и  $\delta$  в окрестности границы газопроницаемой зоны; кривые 1, 2, 3 при значениях параметра  $G = 4 \cdot 10^{-2}$ ,  $6 \cdot 10^{-2}$ ,  $8 \cdot 10^{-2}$  соответственно

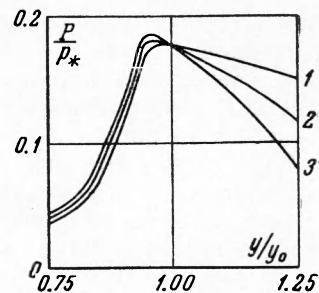
Используя распределение  $P$ , по формулам (3.5) вычислим значения  $\sigma_y'$  в окрестности границы газопроницаемой зоны. Результаты вычислений приведены на фиг. 7. При расчете давление газа в нетронутом пласте, залегающем на глубине  $H$ , положено равным  $\gamma H$ , где  $\gamma$  — средний удельный вес вышележащих горных пород. В распределении  $\sigma_y'$  следует отметить важную особенность, заключающуюся в том, что при подходе к границе газопроницаемой зоны со стороны забоя рост сжимающих усилий на площадках контакта зерен сменяется разгрузкой. Разгрузка происходит на участке примерно от  $0.85 y_0$  до  $0.95 y_0$ . За пределами этого участка сжимающие усилия вновь возрастают.

5. Из (3.5) видно, что на спайках между зернами возникают растягивающие усилия, если  $\tau_{sy} / h < P$ . При этом, если усилия на спайках достигают некоторого значения  $\sigma_s$ , равного предельному напряжению на разрыв для угля, спайки между зернами разрушаются и в угле развивается трещина. Исходя из этого и учитывая, что в призабойной зоне угольных пластов имеет место неравенство  $\sigma_y' < -\sigma_z'$ , условие разрыва пласта можно записать в виде  $\sigma_y' = \sigma_s'$ , или, используя (3.5)

$$\tau_s \frac{y}{h} + \sigma_s = P \quad (5.1)$$

Формулы (3.5), описывающие распределение напряжений в призабойной пластической зоне пласта, справедливы лишь в том случае, если условие (5.1) не выполняется ни в одной точке внутри пласта. Как только на каком-либо расстоянии от забоя будет выполнено условие (5.1), газ разорвет угольный пласт, образуя в нем трещину, параллельную поверхности забоя. При образовании трещины в некоторой окрестности ее почти мгновенно произойдет перераспределение напряжений, которое определяется из решения соответствующей задачи с учетом наличия газа в полости трещины (п.7).

Таким образом, при прохождении выработки до момента образования трещины, напряжения, передающиеся по площадкам контакта, меньше предельного напряжения на разрыв. Графически это можно представить



Фиг. 6. Распределение дополнительного гидростатического давления  $P$  в окрестности границы газопроницаемой зоны при  $ap_* = 6.25$ ,  $b/\rho_* = 0.34$ ; кривые 1, 2, 3 при значениях параметров  $G = 4 \cdot 10^{-2}$ ,  $6 \cdot 10^{-2}$ ,  $8 \cdot 10^{-2}$  соответственно

следующим образом. В условии (5.1) левая часть будет линейной функцией  $y$ . Если ее изобразить в виде прямой на том же графике, что и  $P$  (фиг. 6), то эта прямая, вообще говоря, не должна иметь общих точек с кривой  $P$ . Взаимное расположение рассматриваемой прямой и кривой  $P$  на различных участках пласта может меняться. Как только наступит такой момент, что они коснутся один другого при каком-либо значении  $y$ , произойдет разрыв угольного пласта на расстоянии от забоя, равном этому значению  $y$ . Как видно из графиков, распределение  $P$  имеет такой характер, что касание может произойти только при значениях  $y$ , близких к  $y^\circ$ . Исходя из этого, приблизительно можно считать, что условие (5.1) может быть удовлетворено при  $y = y^\circ$ . Подставляя значение  $y^\circ$  в (5.1), найдем расстояние, на котором возможен разрыв пласта

$$y^\circ = h \frac{P^\circ - \sigma_s}{\tau_s}$$

Здесь  $P^\circ$  — дополнительное гидростатическое давление на границе газопроницаемой зоны  $y^\circ$ . Учитывая, что  $\sigma_s$  пренебрежимо мало по сравнению с  $P^\circ$ , будем иметь

$$y^\circ = h P^\circ / \tau_s \quad (5.2)$$

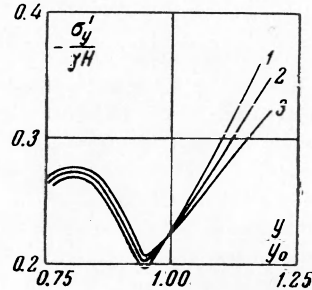
В нетронутом угольном пласте, залегающем на достаточно большой глубине  $H$ , можно считать, что среднее напряжение  $-\sigma_*$  равно  $\gamma H$ . Исходя из этого и используя (3.4) при осредненном значении  $\sigma_y$  по мощности пласта, найдем длину  $l$  призабойной зоны разгрузки пласта, т. е.

$$l = h \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 - \left( \frac{\tau_s}{k} \right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} \right) \frac{k}{\gamma H} \right] \frac{\gamma H}{\tau_s} \quad (5.3)$$

Из (5.2) и (5.3) найдем соотношение между длиной газопроницаемой зоны и длиной зоны разгрузки пласта, при котором может произойти разрыв пласта

$$\frac{y^\circ}{l} = \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 - \left( \frac{\tau_s}{k} \right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} \right) \frac{k}{\gamma H} \right]^{-1} \frac{P^\circ}{\gamma H}$$

6. При решении задачи о распределении давления газа в угольном пласте [6] предполагалось, что длина газопроницаемой зоны при прохождении выработки остается постоянной. Однако возможны случаи, когда длина газопроницаемой зоны и длина зоны разгрузки пласта мгновенно увеличиваются в несколько раз. Например, это может иметь место при прохождении выработки на участках пласта, где между угольным пластом и боковыми породами существует спайка, обеспечивающая на контакте породы и пласта максимальное значение касательного напряжения  $\tau_{yz}$ , равное  $k$ . Действительно, когда на контакте «порода—пласт»  $\tau_{yz} = k$  линии контакта являются огибающими семейства характеристик, которые, в свою очередь, совпадают с линиями скольжения внутри пласта [4]. Так как на огибающей семейства характеристик деформации сдвига обращается в бесконечность, то может иметь место срыв спайки на контакте порода—пласт и проскальзывание пласта по поверхностям контакта [7]. Как только произойдет проскальзывание, почти мгновенно установится новое напряженное состояние. До образования трещины в пласте



Фиг. 7. Эпюры  $\sigma_y'$  в окрестности границы газопроницаемой зоны при  $(\tau_s / \gamma H) (y^\circ / h) = 0.4$ ; кривые 1, 2, 3 при значениях параметра  $G^\circ = 4 \cdot 10^{-2}$ ,  $6 \cdot 10^{-2}$ ,  $8 \cdot 10^{-2}$ . Эпюры соответствуют распределению давления газа  $p$  при  $a p_* = 6.25$ ,  $b / \rho_* = 0.34$

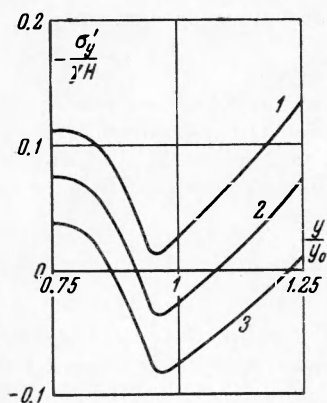
оно будет описываться теми же формулами (3.5), но при  $\tau_s$ , меньшем  $k$ . При этом соотношение между длиной зоны разгрузки пласта  $l$  до проскальзывания и длиной зоны разгрузки пласта  $l'$  после проскальзывания определится по формуле

$$\frac{l}{l'} = \frac{\tau_s}{k} \left( 1 - \frac{\pi}{4} \frac{k}{\gamma H} \right) \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 - \left( \frac{\tau_s}{k} \right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} \right) \frac{k}{\gamma H} \right]^{-1} \quad (6.1)$$

Одновременно с перераспределением напряженного состояния пласта в процессе проскальзывания будет изменяться и фильтрационная способность его, что нарушит установившееся истечение газа в выработку. Однако в результате малой фильтрационной способности пласта и большой скорости разгрузки, учитывая при этом слабую зависимость геометрических параметров угля от разгрузки в окрестности границы газопроницаемой зоны, а также сорбционные свойства угля, можно считать, что за время проскальзывания практически не произойдет заметного изменения в распределении  $P$ . Исходя из этого можно записать следующее соотношение

$$\frac{y^0}{l'} = \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 - \left( \frac{\tau_s}{k} \right)^2} + \frac{k}{\tau_s} \arcsin \frac{\tau_s}{k} \right) \frac{k}{\gamma H} \right]^{-1} \frac{P^0}{\gamma H} \quad (6.2)$$

которое показывает, во сколько раз длина газопроницаемой зоны  $y^0$  до



проскальзывания должна быть меньше длины зоны разгрузки пласта  $l'$  после проскальзывания, чтобы при давлении  $P^0$  произошел разрыв пласта в процессе проскальзывания. На графиках (фиг. 8) приведены значения  $\sigma_y'$ , вычисленные по формуле (3.5) и отвечающие моменту проскальзывания пласта.

Фиг. 8. Эпюры  $\sigma_y'$  в окрестности границы газопроницаемой зоны в момент проскальзывания пласта по поверхностям контакта при  $G^0 = 6 \cdot 10^{-2}$ , кривые 1, 2, 3 при значениях параметра  $(\tau_s / \gamma H) (y^0 / h) = 0.20, 0.15, 0.10$ . Эпюры соответствуют распределению давления газа  $p$  при  $ap_* = 6.25$ ,  $b / p_* = 0.34$

Как видно из графиков, при проскальзывании пласта могут возникнуть растягивающие усилия в окрестности границы газопроницаемой зоны, достаточные для разрыва пласта. Таким образом, в газированных угольных пластах нагрузка передается по пласту через площадки взаимного соприкосновения зерен угля и через газ, заключенный в порах. В ряде случаев, особенно при достаточно быстрой разгрузке пласта, в окрестности границы газопроницаемой зоны газ принимает на себя всю нагрузку, передающуюся по пласту, и разрывает его. При этом в глубине угольного массива образуется трещина, полость которой заполнена газом. Следует отметить, что те участки угольных пластов, на которых имеет место спайка угля с боковыми породами, являются наиболее опасными в смысле внезапного разрыва пласта газом.

При этом разрыв пласта происходит в момент проскальзывания его по поверхности контакта.

7. Допустим, что трещина пересекает пласт в плоскости, параллельной забою, а соотношение между мощностью пласта и протяженностью трещины таково, что при изучении напряженного состояния с достаточной степенью точности можно исходить из решения задачи о плоской деформации.

На участке от поверхности забоя до трещины напряженное состояние пласта будет соответствовать напряженному состоянию пластической полосы конечной длины, зажатой между жесткими плитами. При этом на торцевой поверхности, соответствующей поверхности забоя

$$\sigma_y = \tau_{yz} = 0 \quad (7.1)$$

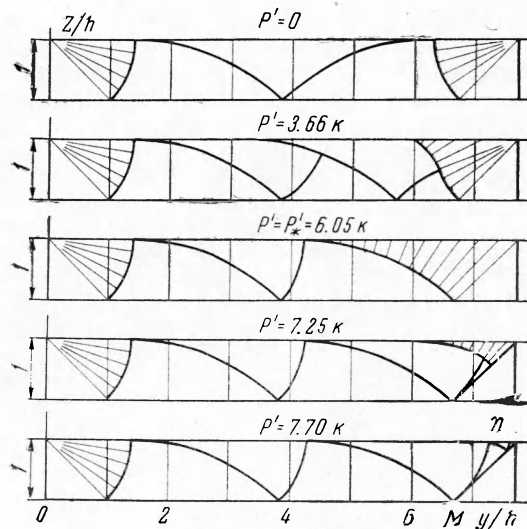
а на торцевой поверхности, образованной трещиной

$$\sigma_y = -p', \quad \tau_{yz} = 0 \quad (7.2)$$

где  $p'$  — давление газа в полости трещины.

На остальном участке пластической зоны угольного пласта, простирающемся от трещины в глубь массива, напряженное состояние пласта будет соответствовать напряженному состоянию вблизи торца пластической полубесконечной полосы, зажатой между жесткими плитами. При этом на торцевой поверхности

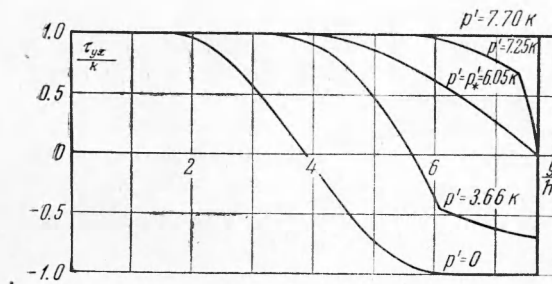
$$\sigma_y = -p', \quad \tau_{yz} = 0 \quad (7.3)$$



Фиг. 9. Распределение линий скольжения

Из решения соответствующей задачи для полубесконечной полосы [4] следует, что в пластической зоне, простирающейся от трещины в глубь массива, устанавливается непрерывное напряженное состояние. Причем характер распределения напряжений и линий скольжения не зависит от величины давления газа в полости трещины.

На участке же от забоя до трещины распределение напряжений и линий скольжения в пласте существенным образом зависит от величины давления газа в полости трещины. На фиг. 9 показано распределение линий скольжения в пласте на участке от забоя до трещины, а на фиг. 10 и 11 изображены эпюры касательной  $\tau_{yz}$  и



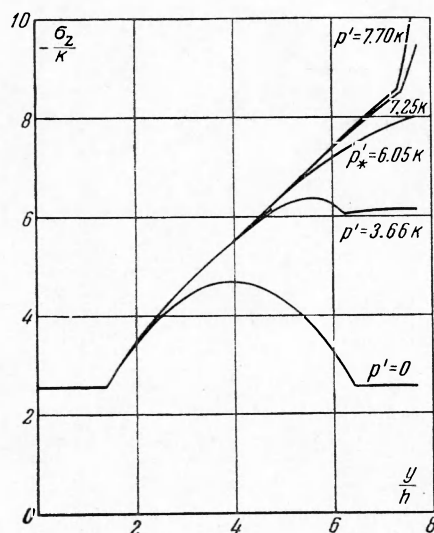
Фиг. 10. Распределение касательных напряжений

нормальной  $\sigma_z$  компонент напряжения для контактной поверхности на том же участке. Решения построены методом характеристик уравнений (2.5) при условиях (7.1) и (7.2) на торцевых поверхностях и при условиях  $\tau_{yz} \leq k$  на контакте породы с пластом.

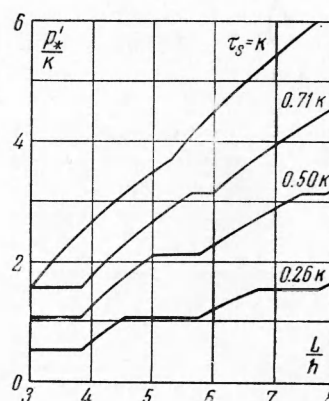
Из фиг. 9 видно, что внутри пласта от забоя до трещины распределение напряжений непрерывно до тех пор, пока в полости трещины давление  $p'$  не превосходит некоторого критического значения  $p'_*$ , при котором характер распределения  $\tau_{yz}$  и  $\sigma_z$  на контактной поверхности имеет вид, показанный на фиг. 10 и 11, а характер распределения линий скольжения показан на фиг. 9. Значения  $p'_*$  в зависимости от расстояния  $L$  от забоя, на котором произошел разрыв пласта, приведены на фиг. 12. Графики  $p'_*$  построены для ряда значений максимальных касательных

напряжений  $\tau_s$ , которых может достигать  $\tau_{yz}$  на контакте породы с пластом.

Если давление газа в полости трещины выше критического (фиг. 9), то внутри пласта в зависимости от величины  $p'$  либо часть линии скольжения  $MN$ , либо вся линия скольжения  $MN$  будет огибающей семейства линий скольжения. Но как известно [4], огибающая линий скольжения является линией разрыва, на которой компоненты напряжения претерпевают конечные скачки, а деформация сдвига обращается в бесконечность. Механически линии разрыва в телах обычно не реализуются. Но присутствие их в решении указывает на то, что в окрестностях этой линии может произойти разрушение угольного пласта.



Фиг. 11. Распределение нормальных напряжений



Фиг. 12. Распределение давления

Следовательно, при разрыве пласта газом, давление которого выше критического, может образоваться зона разрушенного угля. Эта зона примыкает к трещине со стороны забоя и имеет протяженность, ориентировочно равную половине мощности пласта. Давление газа в зоне разрушенного угля может привести в движение призабойный участок и обеспечить прорыв газугольной смеси в выработанное пространство.

В заключение автор благодарит С. А. Христиановича за ценные указания, сделанные им при выполнении работы, а также Е. И. Шемякина и А. Г. Хромова за ряд замечаний, сделанных ими при обсуждении рукописи.

Поступила 9 V 1961

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Желтов Ю. П., Христианович С. А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 5.
2. Кузнецов С. В. Об одной модели пористого грунта. (Геометрические параметры и коэффициент фильтрации грунта). ПМТФ, 1961, № 1.
3. Баренблатт Г. И., Христианович С. А. Об обрушении кровли при горных выработках. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 11.
4. Соколовский В. В. Теория пластичности. ГИТТЛ, 1950.
5. Христианович С. А. Плоская задача математической теории пластичности при внешних силах, заданных на замкнутом контуре. Матем. сб., новая серия, 1938, т. I, вып. 4.
6. Кузнецов С. В. Распределение давления газа впереди движущегося угольного забоя. ПМТФ, 1961, № 3.
7. Ильюшин А. А. Вопросы теории течения пластического вещества по поверхности. ПММ, 1954, т. XVIII, вып. 3.