

Таблица 2. Параметры и положение аномальных зон на объектах Кузбасса

Объект	$H_{min}$ , м	$H_{max}$ , м	$R$ , м
1. Обогатительная фабрика (ОФ) «Каскад», разрез «Виноградовский»	8,3	10,5	4,9
2. Строительство ОФ, разрез «Талдинский»	2,5	3,5	3,16
3. Главный корпус закладочного комплекса, «Таштагольский рудник»	2,4	3,8	1,87
4. Участок ж/д пути ст. Угольная – ст. Тырган «Краснобродский угольный разрез»	1,4	2,1	2,89
5. Строительство ОФ «Краснобродский угольный разрез» поле «Вахрушевское», участок 1	1,4	2,4	2
6. Строительство ОФ «Краснобродский угольный разрез» поле «Вахрушевское», участок 2	2,1	3,6	3,24
7. Строительство ОФ «Краснобродский угольный разрез» поле «Вахрушевское», участок 3	1,7	2,7	2,24
8. Тоннель глубокого заложения, ОАО «ЗСМК»	10	13	3,87
9. Взлетно-посадочная полоса, аэропорт г. Кемерово	0,8	1,25	3,15
10. Управление лицензирования медико-фармацевтических видов деятельности, г. Кемерово	1,2	2,9	2,92
11. Здание филиала ОАО «СО-ЦДУ ЕЭС», ул. Кузбасская, 29, г. Кемерово	1,25	1,85	0,83
<b>Среднее значение <math>\bar{H}</math> и <math>\bar{R}</math>, м</b>	3,0	4,33	2,82
<b>Среднеквадратичное отклонение <math>S</math></b>	3,11	3,79	1,08

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации / С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский. – М. : Изд-во «Горная книга», МГГУ, 2008. – 196 с.
2. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
3. Основы георадиолокации : Курс лекций. - М. : НПЦ «Геотех», 2006. – 58 с.

 Авторы статьи

<p>Простов Сергей Михайлович, докт. техн. наук, проф., каф. теоретической и геотехнической механики КузГТУ, e-mail psm.kem@mail.ru.</p>	<p>Никулин Николай Юрьевич, аспирант каф. теоретической и геотехнической механики КузГТУ), e-mail n.y.nikulin@mail.ru.</p>
---	--

УДК 622.831.3

В.Г. Смирнов

### ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ ВПЕРЕДИ ЗАБОЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

В процессе горных работ в краевой зоне массива создается новая обнаженная поверхность, вблизи которой происходят релаксация и перераспределение напряжений, трещинообразование. Образование плоскостей трещин, параллельных поверхности обнажения, по мнению акад. Христиановича – ключевой момент в возникновении выбросоопасных состояний. К возникновению внезапных выбросов приводит сочетание, по крайней мере, трех факторов: газовый фактор, фактор трещинообразования и местной нарушенности массива, перераспределение горного давления вблизи поверхности обнажения. В настоящей работе обсуждается возможность образования трещин и неустойчивых напряженных состояний

при перераспределении горного давления ненарушенного пласта. Действие газового фактора следует считать усиливающим изучаемые в настоящей статье эффекты. Оно, в частности, подробно рассмотрено Христиановичем [1].

Акгад Шемякин [2] рассмотрел возможность образования трещин за счет упругой энергии, накопленной в объеме тела, прилегающем к рассматриваемой поверхности трещинообразования. Без учета деформаций, возникающих при разгрузке объема вблизи обнаженной поверхности.

Рассмотрим состояние объема угля вблизи поверхности обнажения. При отсутствии смещений по границам пласта с почвой и кровлей [3] происходит выгибание его средней части в сторону

меньшего горного давления. Для оценки подобных смещений, в [3] используется модель сдвиговых деформаций, которая не подходит при наличии ориентированных трещин, т.к. призабойный объем эквивалентен набору соприкасающихся слоев или пластин.

В общем случае, если на поверхность закрепленной по периметру пластины действует сила, она всегда вызывает и сдвиговые деформации, и деформации изгиба. При этом для тонкой пластины, если  $h^2 \ll R^2$  (рис. 1), определяющими являются деформации изгиба, а если поперечные и продольные размеры сравнимы  $h^2 \geq R^2$ , то определяющими являются деформации сдвига.

Предположим, что трещинообразование происходит, плоскости трещин ориентированы параллельно обнаженной поверхности и расстояние между плоскостями трещин существенно меньше мощности пласта. Предположим, что возможны смещения вдоль плоскостей трещин. В случае газонаполненных трещин эти предположения близки к реальности. При таком подходе для анализа можно использовать модель изгиба пластинок.

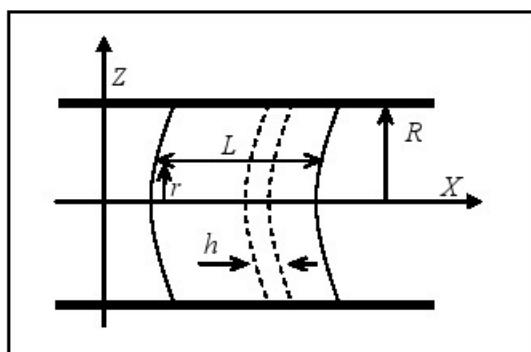


Рис. 1. Сечение вдоль оси выработки.

Рассмотрим (рис. 1) напряженное состояние объема пласта вблизи штreta в цилиндрической системе координат. Предположим, что амплитуда горизонтальных деформаций в центре пласта является величиной, зависящей от градиента горного давления связанным, в свою очередь, с размером зоны влияния выработки. Для оценки возможности трещинообразования введем параметр  $h$  – характерное расстояние между плоскостями образующихся трещин, т.е. толщина слоев.

Направим ось X вдоль оси цилиндра в сторону уменьшения горного давления. Пусть  $R$ ,  $r$  – координата границы пласта и текущая координата по оси Z, соответственно. Выделим слой пласта, толщиной  $h$  и радиуса  $R$ , на который действует (направленное горизонтально) суммарное давление  $P = -h \cdot (\text{grad } \sigma)_x = -h \cdot \gamma H / L$ , зависящее от толщины рассматриваемого слоя и градиента горного давления. Приближенно примем, что в рассматриваемом объеме градиент горного давления постоянен, а для удобства дальнейших оценок введем параметр  $L$  – длину, на которой изменение

напряжений равно  $k\gamma H$  – местному горному давлению. В отсутствии зоны концентрации напряжений  $k \leq 1$ , а  $L$  близко к размеру зоны влияния выработки. Ниже считается  $k=1$ . Примем также, что горизонтальная составляющая напряжений не зависит от радиальной координаты.

В качестве граничных условий примем отсутствие смещений и поворотов слоев по границе пласта и почвы/кровли, т.е. будем считать, что края слоя закреплены. Л.Д. Ландау [4], рассматривая с учетом изгиба деформации круглой пластины с аналогичными граничными условиями и силами, получил смещения элементов пластинки:

$$u_x = u_0 \left(1 - \left(r/R\right)^2\right)^2,$$

здесь максимальное смещение в центре пласта

$$u_0 = \frac{3PR^4(1-\mu^2)}{16h^3E},$$

$\mu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль Юнга.

Заметим, что амплитуда деформаций однозначно связана с толщиной образующихся слоев. Слои плотно прижаты друг к другу, следовательно, горизонтальные смещения соседних слоев почти одинаковы между собой на каждом из радиусов  $r$ . Значит, при растрескивании, толщина образующихся слоев должна быть постоянной при постоянном градиенте горного давления.

В линейно упругой модели потенциальная энергия деформированного состояния равна работе по деформированию. Представим, что выгибание происходит при очень медленном росте давления, горизонтальные смещения зависят от радиуса, т.е. от расстояния до центра пласта. Вертикальные смещения являются малыми величинами второго порядка по сравнению с горизонтальными. Разобъем рассматриваемый слой на концентрические кольца площадью  $S = 2\pi r dr$ , на такое кольцо действует сила  $F = p 2\pi r dr$ , а

$$du_x = \frac{3R^4(1-\mu^2)}{16h^3E} \left(1 - \left(r/R\right)^2\right)^2 dp$$

– горизонтальные смещения для всех точек кольца при дифференциальном изменении давления. Соответственно, полная работа (сила на перемещение) – интеграл по радиусам колец от 0 до  $R$  и по давлению от 0 до  $P$  ( $p$ ,  $r$  – переменные интегрирования,  $P$ ,  $R$  – пределы)

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_0^R \int_0^P p 2\pi r dr \frac{3R^4(1-\mu^2)}{16h^3E} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 dp = \\ &= \frac{\pi R^6 P^2 (1-\mu^2)}{32h^3 E} = \frac{\pi R^6 (\gamma H)^2 (1-\mu^2)}{32hEL^2} \end{aligned}$$

В последнем равенстве давление выражено через введенный ранее параметр  $L$ .

Горизонтальные деформации определяются разгрузкой от горного давления объема пласта вблизи обнажения. Амплитуда данных деформаций является внешним к нашей модели фактором,

заданной величиной. Учитывая введенную выше связь амплитуды деформаций с градиентом горного давления, выразим работу через амплитуду деформаций в центре слоя:

$$A_1 = \frac{8\pi h^3 E \cdot u_0^2}{9(1-\mu^2)R^2}.$$

Потенциальная энергия нового деформированного состояния пропорциональна толщине слоя в третьей степени, т.е. при наличии трещин работа, которую необходимо совершить пласту для разгрузки, уменьшается. Даже при фиксированной амплитуде отжима возникновение ориентированных трещин приводит к высвобождению упругой энергии. С другой стороны, для создания трещин необходимо совершить работу, зависящую от площади и  $g$  – удельной энергии образованной поверхности (потенциал Гриффитса) [5]. Обе работы совершаются за счет упругой потенциальной энергии рассматриваемого объема, равномерно сжатого горным давлением. Т.к. разгрузка происходит вдоль одной из трех осей координат, высвобождаемая энергия примерно равна трети от произведения плотности энергии на объем.

Чтобы оценить минимальную толщину, на которую возможно растрескивание, положим, что не происходит смещений по границам пласта и высвобождаемая при разгрузке энергия идет только на деформирование и образование трещин

$$\frac{(\gamma H)^2}{6E} \pi R^2 L = 2g \pi R^2 \frac{L}{h} + \frac{\pi R^6 (\gamma H)^2 (1-\mu^2)}{32hEL^2} \frac{L}{h},$$

здесь  $L/h$  – количество слоев, у каждого слоя две поверхности. Решая это уравнение, получим:

$$h = \frac{6gE}{(\gamma H)^2} + \sqrt{\left(\frac{6gE}{(\gamma H)^2}\right)^2 + \frac{3(1-\mu^2)R^4}{16L^2}}.$$

Первое слагаемое соответствует минимальной

толщине, на которую возможно растрескивание, если вся высвобождаемая упругая энергия пойдет только на образование трещин, это слагаемое можно сопоставить с линейным параметром, введенным акад. Шемякиным [2] без конкретизации величины удельной поверхностной энергии образования трещин. Второе слагаемое учитывает то, что при растрескивании происходит выгибание пласти в сторону забоя, на которое также расходуется энергия, так что эффективная толщина слоев увеличивается.

Количественно оценим толщину слоев при возможном трещинообразовании. Примем [5-7], что удельная поверхностная энергия  $g=1$  Дж/м<sup>2</sup>, модуль Юнга  $E=10$  ГПа,  $\gamma H=10^7$  Па, размер зоны влияния выработки  $L=6R$ ,  $R=2$  м, коэффициент Пуассона  $\mu=0.25$ . В этом случае:  $h=0.0006+0.14=14$  см, что сопоставимо с реально наблюдаемыми величинами впереди забоя подготовительной выработки на глубине порядка 400м.

В реальных условиях градиент горного давления, а также условия на границах пласта могут варьироваться в широких пределах, варьируется и расстояние между плоскостями трещин. Трещины могут образовываться непосредственно при проведении горных работ, а в отдельных случаях после существенной паузы.

В соответствии с построенной моделью можно утверждать, что трещинообразование в этом направлении энергетически более выгодно. Трещинообразование происходит при разгрузке краевой зоны массива от горного давления при наличии горизонтальной составляющей градиента горного давления. В областях, где градиент горного давления постоянен расстояние между плоскостями трещин одинаково.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы теории пластичности и геомеханики: к 100-летию со дня рождения акад. С.А. Христиановича. - М.: Наука 2008.
2. Шемякин, Е.И. О свободном разрушении твердых тел. // Доклады Академии наук СССР. - Том 300, - 1988. - №5 – С. 1090-1094.
3. Смирнов, В.Г. Особенности деформации пласта угля вблизи забоя. // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2010. Материалы XIII Международной научно-практической конференции, 28-29 октября, 2010., ГУ КузГТУ. Кемерово, 2010. – С. 330-334.
4. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учебное пособие для вузов в 10 т. Т. VII. Теория упругости. Ландау Л.Д., Либшиц Е.М. – М.: Физматлит, 2003. – 204 с.
5. Петухов, И.М. Механика горных ударов и выбросов. Петухов И.М., Линьков А.М. – М., Недра, 1983.
6. Ходот, В.В. Внезапные выбросы угля и газа. – М.: Гостехиздат 1961.
7. Мурашев, В.И. Механизм развязывания внезапных выбросов угля и газа в горных выработках. // Основы теории внезапных выбросов угля, породы, газа. - М.: Недра, 1978, с. 140-161.

□Автор статьи:

Смирнов  
Вячеслав Геннадьевич,  
старший преподаватель каф.  
физики КузГТУ.  
Email: smirnovvg@mail.ru