

3. Арцимович Г.В. Механофизические основы создания породоразрушающего бурового инструмента. – Новосибирск: Наука, 1985. – 265 с.
4. Спивак А.И., Попов А.Н. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1986. – 208 с.
5. Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении / Под ред. В.Н. Бакуля. – К.: Наук. думка, 1978. – 232 с.
6. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 282 с.
7. Виброиспытания и металлофизическое исследование структуры материала при вибрационном нагружении / И.Н. Овчинников, М.А. Бомер, Л.М. Рыбакова и др. // Вестн. машиностроения. 2003. – № 4. – с. 29–36.
8. Вибрации энергетических машин: Справоч. пособие / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Н.В. Григорьева. – Л.: Машиностроение, 1974. – 464 с.
9. Нагорный В.М., Черевко А.А. Увеличение глубины вибродиагностирования на основе учета физических причин отказа машины // Вісн. Сум. держ. ун-ту. Сер. Технічні науки. 2004. – № 2(61). – с. 144–151.
10. Зыбинский П.В. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении / Зыбинский П.В., Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М. – Донецк: Норд-Пресс, 2007, – 244 с.

МЕТОД РАСЧЕТА ОПОРНОГО ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРИЗАБОЙНУЮ ЧАСТЬ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

*Д.Л. Васильев, Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины
А. А. Ангеловский, И. Ф. Чугунков, ПАО «Краснодонуголь», Украина*

Предложен новый метод расчета опорного давления, основанный на линейном затухании согласно принципу Сен-Венана касательных напряжений от контактного трения между боковыми породами и угольным пластом. Метод позволяет описать эпюру горного давления, соответствующую экспериментальным данным, в виде квадратичной функции.

Несущая способность угольного пласта сопряжена с возникновением опорного горного давления в его призабойной зоне. Опорное давление характеризуется повышенными, по сравнению с величиной горного давления в нетронутом массиве, нормальными к пласту напряжениями, действующими вблизи обнаженной части пласта и отражает пригрузку угольного пласта около выработок, обусловленную обнажением массива. Опорное давление играет важную роль в возникновении горных ударов, внезапных выбросов, отжима угля, пучения, оказывает влияние на устойчивость выработок, вызывает завалы лав и т.д. Под действием пригрузки материал массива повреждается, возникают необратимые деформации в краевой части пласта, в последней образуются трещины, происходит смещение кровли. Опорное давление на определенном расстоянии от забоя достигает максимума и затем уменьшается до уровня значений, соответствующих состоянию нетронутого массива, что непосредственно сопряжено с распределением контактных нормальных напряжений призабойной зоны. Переход массива вблизи зоны возмущений (вблизи призабойной зоны) в новое состояние равновесия может протекать спокойно, а иногда и бурно в виде выбросов угля и газа. Для борьбы с негативными последствиями нарушения равновесного состояния массива, вызванного ведением горных работ, постоянно применяются дополнительные мероприятия, влияющие на переходные процессы в его призабойной зоне. Понятно, что закономерности проявлений опорного давления зависят от многих факторов, но, важно знать доминирующие из них. Это стало одной из важных проблем механики горных пород по вскрытию физической природы опорного давления, разработке способов управления не только проявлениями опорного давления, но и вызываемыми им физическими процессами. По механизму формирования опорного давления нет единого мнения среди ученых. Анализ различных гипотез опорного горного давления подробно изложен в работах многих авторов.

А.А. Борисов [1] подвергает критическому анализу различные теории на основании того, что они описываются восходящими и нисходящими, как правило, экспонентами, в то время как реальные эпюры горного давления имеют вид выпуклых квадратичных функций (рис. 1). Автор развивает свою концепцию балок на упругом основании, исключая влияние контактного трения между пластом и боковыми породами, но она не описывает достоверно экспериментальную параболу (рис. 1. кривая 2), поскольку начальное напряжение параболы А.А. Борисова равно нулю. Это напряжение согласно измерениям имеют значения, значительно отличающиеся от нуля.

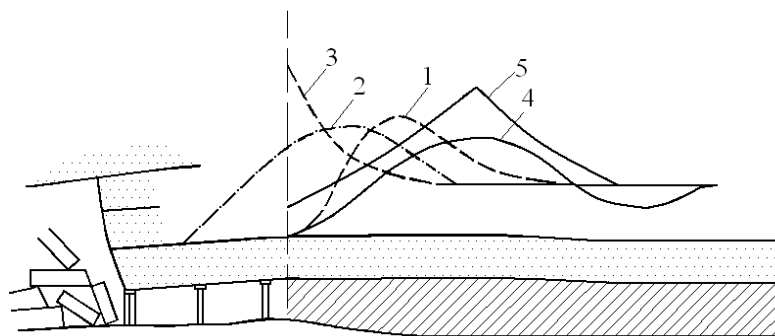
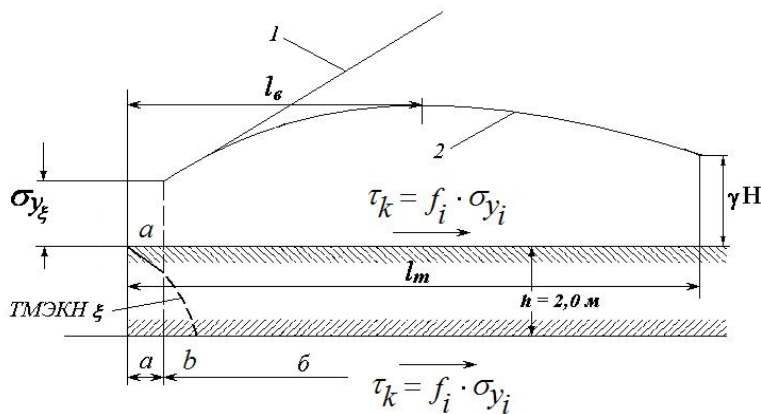


Рисунок 1 – Схемы распределения опорного давления в средней части лавы по различным данным [1]: 1 – по данным В.Д. Слесарева; 2 – по шахтным наблюдениям; 3 – по теории концентрации напряжений; 4 – по теории балок на упругом основании по А.А. Борисову; 5 – по В.В. Ходоту.

Разработанные аналитические построения опорного давления противоречивы и ни одно из них не описывает достоверно эпюру опорного горного давления в соответствии с экспериментальными данными (рис. 1, кривая 2). Попытаемся восполнить этот пробел [2].

Пласт (рис. 2) представляем вместе с вмещающими породами в виде упругой системы. Как показывают результаты многочисленных исследований, упругие константы вмещающих пород характеризуются модулем упругости, превышающем на целый порядок модуль упругости угля. Поэтому вмещающие породы при решении задачи считаются абсолютно жесткими и упругие свойства их не учитываются. Таким образом, угольный пласт представлен в виде полосы, заключенной между жесткими плитами, при этом на верхнюю плиту действует горное давление. Между вмещающими породами и пластом действуют касательные напряжения τ_k от контактного трения, возникающие вследствие деформирования угольного пласта, и направлены вглубь массива (рис. 2).



a – зона необратимых деформаций,

b – зона упругих (обратимых) деформаций

Рисунок 2 – Зависимости опорного давления по Л.Прандтлю (1) и по авторам (2)

В горной литературе [1, 3, 4] при построении экспериментальных эпюр в качестве начального напряжения имеет место попытки принимать предел прочности образца угля на одноосное сжатие. На наш взгляд, это положение верно в частном случае. Но давно известно, что вертикальное напряжение на кромке забоя значительно превышает предел прочности образца [4], что ставит под сомнение правомочность применения значения этого предела к массиву на больших глубинах залегания угольных пластов. Как раньше было указано, по А.А. Борису эти напряжения равны нулю. Как видно, то и другое неверно.

В качестве начального напряжения следует принимать нормальное напряжение в вершине трещины. Тогда аналитическая эпюра горного давления будет соответствовать экспериментальным данным. Нормальное напряжение в вершине трещины на траектории максимальных эффективных касательных напряжений (ТМЭКН) определяется системой формул [5].

$$\sigma_{y_\xi} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{k_n (1 + \mu d) \cdot (1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2}) \cdot \exp(-2\mu(\beta_\xi + \beta_b))}{1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_b^2}} - k_b \right); \quad (1)$$

$$k_b = \frac{(k_n + \mu \sigma_{y_\xi}) \cdot (1 - \sin \rho \sqrt{1 - b_\xi^2})}{(1 + \mu d) (1 + \sin \rho \sqrt{1 - b_b^2}) \cdot \exp(-4\mu\beta_b)}, \quad (2)$$

где k_b – эффективное касательное напряжение в точке b на ТМЭКН ξ на почве пласта;

$\mu = \operatorname{tg} \rho$ и ρ – коэффициент и угол внутреннего трения;

k_n – предел сопротивления материала при сдвиге;

$$d = \frac{1}{2} \arcsin b_\xi; \quad b_\xi = \frac{f_k \left(1 - \frac{2y}{h}\right) \cdot \sigma_y \left(1 + \frac{f_k}{h} \cdot x\right)}{k_n + \mu \sigma_{y_\xi} \left(1 + \frac{f_k}{h} \cdot x\right)}; \quad b_b = -\frac{f_k \cdot \sigma_y \left(1 + \frac{f_k}{h} \cdot x_b\right)}{k_b + \mu \sigma_{y_\xi} \left(1 + \frac{f_k}{h} \cdot x_b\right)};$$

f_k – коэффициент контактного трения в краевой части пласта;

$$\beta_{\xi(b)} = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_{\xi(b)}}{\sin \rho - \sqrt{1 - b_{\xi(b)}^2}}.$$

Угол наклона ТМЭКН ξ

$$\alpha_\xi = \frac{\pi}{4} + \rho/2 - \beta_\xi. \quad (3)$$

Решение системы уравнений (1)-(3) проводится на ЭВМ методом итераций. Отметим, что нормальное напряжение σ_{y_ξ} по мере развития призабойной трещины по ТМЭКН ξ имеет возрастающий характер. Трещина по ТМЭКН ξ в призабойной части пласта развивается до тех пор, пока напряжение в вершине трещины не достигнет значения, достаточного для уравновешивания вышележащих пород. Таким образом, призабойная часть пласта может быть разбита на две зоны (рис. 2): зона необратимых деформаций (a) и зона упругих обратимых деформаций (b). При этом в зоне необратимых деформаций, как известно, имеет место отжим угля в свободное пространство.

Теперь вернемся контактному трению, которое в формулах (1 – 3) учтено через коэффициент f_k . Автор книги [6] на основании принципа Сен-Венана утверждает, что трение по мере удаления от свободной поверхности по длине плиты затухает. Вообще очевидно, что смещение пласта по мере удаления от забоя должно, безусловно, на определенном расстоянии от забоя в нетронутой зоне прекратиться. Общепринято, что величина горного давления на пласт в нетронутой зоне определяется весом столба вышележащих пород единичного сечения согласно формуле

$$\sigma = \gamma H, \quad (4)$$

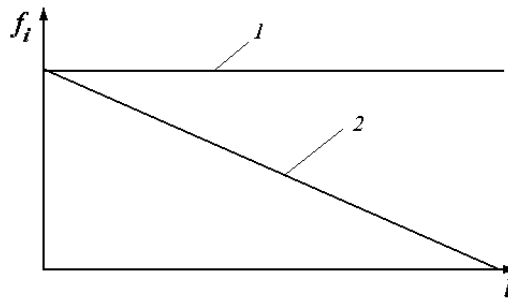
где γ – плотность вмещающих пород; H – высота столба пород.

Расстояние от забоя до зоны нетронутого массива по данным авторов [1, 3] в проходческих забоях составляет 10-15 м, в лавах оно больше. Принято считать на основании экспериментальных наблюдений, что максимум опорного давления располагается в очистных выработках обычно на расстоянии от забоя, равном 2-5 мощностям вынимаемого пласта и равен $(2-3) \cdot \gamma H$ [1]. В работе [5] представлено использование распределения контактных нормальных напряжений по Л. Прандтлю. Используя линейное затухание коэффициента контактного трения f_i по закону $f_i = f_k(1 - t \cdot l)$ (рис. 3), (где t – коэффициент затухания контактных касательных напряжений и l – расстояние от забоя до изучаемой контактной области) можем на основании закона Л. Прандтля записать эпюру горного давления в виде

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{y_\xi} (1 + f_k (1 - t \cdot l) \cdot l/h), \quad (5)$$

где σ_{y_ξ} – нормальное напряжение в вершине трещины ;

h – высота (мощность) пласта.



$$1 - f_i = f_k; \quad 2 - f_i = f_k \cdot (1 - t/l)$$

Рисунок 3 – Зависимости коэффициента контактного трения от расстояния от забоя: 1 – по Л. Прандтлю, 2 – по Е.М. Макушок

Здесь нужно записать важное условие, что при $f_i = f_k(1 - t \cdot l) = 0$ $\sigma_{y_i} = \gamma H$ (в зоне нетронутого массива). Для подтверждения близко к линейной зависимости контактных касательных напряжений приведем результаты исследований, позаимствованные из работы [7]. В работе приводится эпюра касательных напряжений τ_{xy} (рис. 4) на контактных плоскостях, полученная пересчетом экспериментальных измерений смещений пород по контакту с пластом.

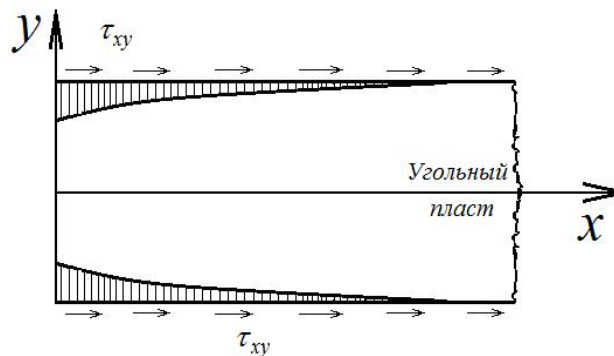


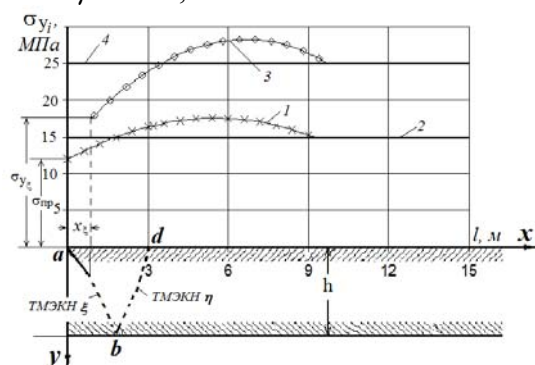
Рисунок 4 – Эпюры контактных касательных напряжений

На рис. 2 приведены аналитическая эпюра горного давления, по характеру соответствующая экспериментальной кривой (рис. 1, кривая 2). Между прочим, разработанный метод расчета опорного горного давления позволяет определить несущую способность призабойной части пласта. Для этого нужно найти удельное усилие, действующее на эту часть и равное γH . Удельное усилие определяется по формуле

$$p = \frac{\sigma_{y\xi}}{l_m} \int_0^{l_m} (1 + f_k(1 - t_l \cdot l)l/h) dl = \sigma_{y\xi} \left(1 + \frac{f_k l_m}{2h} - \frac{f_k \cdot t_l \cdot l_m^2}{3h} \right), \quad (6)$$

где l_m – длина опорной зоны;

При $\sigma_{y\xi} = 11,0$ МПа и $l_m = 8,0$ м оно равно 16,0 МПа. Этого удельного усилия достаточно, чтобы уравновесить кровлю на глубине 550 – 600 м ($\gamma H = 15-16$ МПа) при крепости угля в 1.1 по Протоdjeяконову. Ясно, что этого удельного усилия (в 16,0 МПа) недостаточно, чтобы уравновесить кровлю на глубине 900 м – 1000 м ($\gamma H = 25,0$ МПа). В этом случае в призабойной части развивается трещина по ТМЭКН ξ (рис. 5) и нормальное напряжение $\sigma_{y\xi}$ возрастает до тех пор, пока несущая способность σ_c в зоне опорного давления не достигнет значения $\gamma H = 25,0$ МПа.



1 – $H = 550 - 600$ м; 2 – $\gamma H = 15$ МПа; 3 – $H = 900 - 1000$ м; 4 – $\gamma H = 25$ МПа

Рис. 5. Эпюры опорного горного давления для залегания пластов на различных глубинах

Формула (6) сохраняет вид. Но значение $\sigma_{y\xi}$ не будет равно σ – пределу прочности образца угля, а будет равно нормальному напряжению в вершине трещины. Начало эпюры опорного давления смещается в глубину массива угля на величину абсциссы x_ξ вершины трещины. Образуется консоль величиной x_ξ , т.к. призабойная часть пласта выйдет из-под нагрузки. Формируется зона необратимых деформаций шириной x_ξ . Несущая способность зоны опорного давления не будет равна удельному усилию согласно формуле (6), а уменьшится и будет определяться с учётом консоли x_ξ по формуле

$$\sigma_c = \frac{p \cdot l_m}{l_m + x_\xi}. \quad (7)$$

Призабойная трещина будет развиваться до тех пор, пока не наступит равновесие, т.е. пока σ_c не станет равным γH .

На наш взгляд, разработанный метод позволяет по-новому провести исследование динамики опорного давления на угольный пласт. Здесь нами изложены только принципы подхода к расчету напряжений в призабойной части пласта. Метод пригоден к исследованию более сложных задач горного дела, например, к определению допустимого устойчивого

пролета выработок в подготовительных и очистных забоях в зависимости от несущей способности крепи или посадки кровли, а так же – параметров сдвига массива горных пород. Достоинством разработанного метода можно считать то, что известные закономерности были получены на основании предположений, гипотез, а в полученных нами закономерностях соблюдаются требования теорий упругости и классических решений Л. Прандтля и принципа затухания контактных касательных напряжений по Сен-Венану. Приведенная на рис. 4 эпюра контактных касательных напряжений, полученная по экспериментальным данным, практически является линейной, что, в целом, подтверждают идею аналитического метода. На основании обобщения многочисленных экспериментальных данных распределения контактных касательных напряжений значения параметра t могут быть подкорректированы в виде определенной зависимости от протяженности контактной поверхности, что в дальнейшем и предполагается осуществить. В отличие от авторов [6] мы ставим задачу разработки аналитического метода построения эпюры опорного горного давления с пониманием физической сущности ее формирования, по которой можно наметить пути управления напряженно-деформированным состоянием пласта. На основании изложенного можно прийти к выводу, что опорное горное давление на угольный пласт формируется контактными касательными напряжениями в соответствии с их близкому к линейному закону затухания вдоль кромки этого пласта в направлении от забоя в его глубь и описывается выпуклой квадратичной функцией, начальное значение которой равно нормальному напряжению в вершине призабойной трещины, а конечное – значению горного давления в нетронутом массиве (рис. 1, кривая 2).

Вывод. Разработан аналитический метод построения эпюр опорного горного давления. Установлено, что опорное горное давление на угольный пласт формируется контактными касательными напряжениями от контактного трения в соответствии с их близко к линейному затуханию согласно экспериментальных данных вдоль кромки пласта в направлении от забоя до зоны нетронутого массива и описывается выпуклой квадратичной функцией, начальное значение которой равно нормальному напряжению в вершине призабойной трещины, а конечное – значению горного давления в нетронутом массиве, что соответствует экспериментальной кривой 2 (рис. 1).

Список литературы

1. Борисов, А.А. Механика горных пород / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
2. Васильев Д.Л. Математическая модель расчёта пригрузки опорного давления на призабойную часть угольных пластов / Д.Л. Васильев // Збірник наукових праць НГУ № 45 – Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2014, – С. 189-194.
3. Шашенко, А.Н. Геомеханические процессы в породных массивах / А.Н. Шашенко, Т. Майхерчик, Е.А. Сдвижкова. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2005. – 319 с.
4. Булат, А.Ф. Управление состоянием предельно напряжённого породного массива малоэнергетическими воздействиями / А.Ф. Булат, А.Т. Курносков, Ю.А. Русанов – К.: Наук. думка, 1993. – 175 с.
5. Васильев, Д.Л. Совершенствование метода расчёта предела прочности горных пород при одноосном сжатии / Д.Л. Васильев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 108. – С. 199-106.
6. Макушок Е.М. Самоорганизация деформационных процессов // Е.М. Макушок – Минск: Наука и техника, 1999. – 272 с.
7. Грицко, Г.И. Экспериментально-аналитический метод определения напряжений в массиве горных пород. / Г.И. Грицко, Б.В. Власенко – Новосибирск: Наука, 1976. – 188 с.