

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байбатгаев А.Б. Применение геофизических методов для изучения литологии и физико-механических свойств угленосных пород в разрезах скважин /Геофизическое обеспечение бескернового бурения угольных скважин.- Ростов-на-Дону, 1976.-С.77-78.
2. Латышева М.Г., Вендельштейн Б.Н. Обработка и интерпретация материалов геофизических исследований скважин, -М.: Недра, 1975.-272 с.
3. Фейт Г.Н. Геомеханические и геофизические вопросы оценки перспективности извлечения метана из угольных пластов // Сокращение эмиссии метана.-Новосибирск, 2000.-С. 373-378.
4. Дзедзбань И.П. Акустический метод выделения коллекторов с вторичной пористостью. М.: Недра, 1981,-160 с.
5. Применение акустического каротажа для изучения физико-механических свойств терригенных пород каменноугольных отложений Донбасса, -Л.: НПО, Геофизика, 1974.-81 с.
6. Забигаило В.Е., Белый С. Геологические факторы разрушения керна при бурении нагруженных горных пород.- К.: Наукова думка, 1981,-179с.
7. Булатова Ж.М. Акустический каротаж.-Л.: Недра, 1970.-295 с.

УДК: 622.831:624.131 (043.3)

Канд. техн. наук Д.Л. Васильев
(ИГТМ НАН Украины)

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ОБРАЗЦОВ СЛАБЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

В основу методу покладений критерій міцності Кулона і диференціальне рівняння граничного стану матеріалу з урахуванням зовнішнього тертя.

CALCULATION OF LIMIT OF TOUGHNESS OF SAMPLES OF WEAK ROCK AT ONE-AXIS COMPRESSION

In the base of method prescribed criterion of toughness of Column and differential equation of limiting condition of material with provision for external friction.

Одним из основных параметров, по которым производится оценка напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и выбор силовых параметров горных машин, является предел прочности при одноосном сжатии.

В работе [1] проведена разработка метода расчета предела прочности пород с учетом внутреннего и внешнего трения, основанного на жестко-пластической модели теории линий скольжения, по которой принимается, что разрушение происходит при достижении по всей линии скольжения эффективных касательных напряжений по Кулону значений, равных постоянной пластичности k – сопротивляемости материала сдвигу. Однако, несмотря на совершенствование критерия Кулона с учетом внешнего трения, достичь высокой достоверности расчетного подхода с экспериментальными данными не удалось. Поэтому совершенствование метода расчета предела прочности требует дальнейшего продолжения. Данная статья подготовлена в соответствии с заданием госбюджетной темы 1.3.5.74 ИГТМ НАН Украины «Механика горных пород, техника и технология добычи угля высоконагруженными лавами».

В работе [2] предлагается исходить из условия предельного состояния, по

которому принимается, что разрушение происходит при достижении эффективных касательных напряжений τ , сопротивляемости материала сдвигу k в локальной области, в то же время, как остальные области, в которых напряжение τ , не достигают значения k , находятся в упругом состоянии. Для этого было разработано и решено дифференциальное уравнение предельного состояния материала в локальной области.

В работе [3] представлен метод расчета предела прочности на одноосное сжатие при линейной связи между контактными напряжениями. В данной статье применим этот метод для расчета предела прочности для слабых пород. К слабым породам мы условно отнесли породы с коэффициентом внутреннего трения μ , равным и меньше 0,8. В дальнейшем дадим обоснование этому показателю и проведем некоторое совершенствование этого метода применительно к этим породам, имеющих при $\mu \leq 0,8$ общность характера расчета. Схему нагружения образца представим на рис. 1. Ширину образца обозначим через a , высоту через h . Напряжения от внешнего трения на контактных угловых поверхностях изобразим в виде τ_k . Распределение внешних нагрузок на рисунке представим согласно [3]. Искривлением формы образца пренебрегаем. Для полноты расчета траектории максимальных эффективных касательных напряжений (ТМЭКН) центр осей координат располагаем в верхнем левом углу образца. Ось Y направим вдоль активной внешней нагрузки σ_y , ось X – вдоль левого напряжения трения τ_k . Оговорим принятое правило знаков касательных напряжений: если внешняя нормаль к площадке не совпадает с направлением одной из осей координат, то положительное касательное напряжение направлено вдоль соответствующей оси, если внешняя нормаль к площадке идет по положительному направлению оси, то положительное касательное напряжение имеет обратное направление. Угол, который составляет направление касательной к ТМЭКН в данной точке и отсчитываемый по часовой стрелке, обозначим через α . Согласно правилу знаков на верхней контактной плоскости левой продольной половины образца имеет положительное значение, на нижней – отрицательное. Для правой продольной части знак τ_k имеет обратные значения.

Теперь определимся с ТМЭКН. Углы наклона ТМЭКН относительно оси X определяются по формуле [3]

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \rho/2 + \beta_i, \quad (1)$$

где $\beta_i = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_i \operatorname{Cos} \rho}{\operatorname{Sin} \rho - \sqrt{1 - b_i^2}}$ - текущее значение угла поворота ТМЭКН от внешнего трения в точках x_i и y_i образца; $\rho = \operatorname{arctg} \mu$;

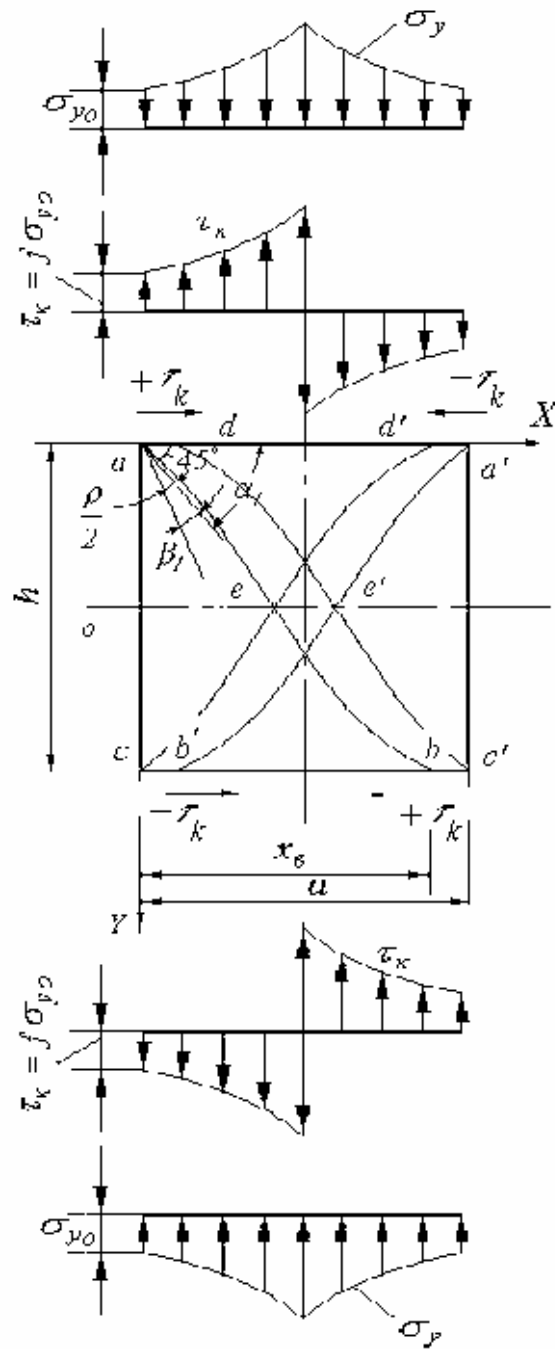


Рис. 1 – Схема контактных нагрузок и ТМЭКН в образце при наличии внешнего и внутреннего трения

$$b_i = \frac{f_k \left(1 - \frac{2y}{h}\right) \sigma_{y_0} e^{\frac{2f_k \cdot x}{h}}}{k + \mu \sigma_{y_0} e^{\frac{2f_k \cdot x}{h}}},$$

f_k – коэффициент контактного (внешнего) трения; σ_{y_0} – предельное сжи-

мающее напряжение в углах образца.

Как видно, для построения ТМЭКН требуется теоретическое определение главного параметра σ_{y_0} . Параметр σ_{y_0} нужен и для определения предела прочности горных пород – среднего сжимающего напряжения на контактной поверхности согласно формуле [3]

$$P = \sigma_{y_0} \cdot \frac{h}{f_k \cdot a} \left(e^{\frac{f_k \cdot a}{h}} - 1 \right). \quad (2)$$

В работе [3] приводится система уравнений для расчета этого напряжения. С учетом особенностей формирования ТМЭКН в образцах слабых пород модифицируем эту систему

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{y_0} &= \frac{1}{\mu} \left[\frac{k \cdot (1 + \text{Sin} \rho \sqrt{1 - b_i^2}) \cdot e^{2\mu(\beta_i - \beta_2 - \beta_3)}}{1 - \text{Sin} \rho \sqrt{1 - b_2^2}} - \tau_{\varepsilon 1} \right] \\ \tau_{\varepsilon 1} &= \frac{(k + \mu \sigma_{y_0}) \cdot (1 - \text{Sin} \rho \sqrt{1 - b_i^2})}{(1 + \text{Sin} \rho \sqrt{1 - b_2^2}) \cdot e^{2\mu(\beta_i - \beta_2 + \beta_3)}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где

$$\beta_2 = \frac{1}{2} \text{arctg} \frac{b_2 \text{Cos} \rho}{\text{Sin} \rho - \sqrt{1 - b_2^2}}; \quad (4)$$

$$b_2 = \frac{f_k \cdot \sigma_{y_0} e^{\frac{2f_k(x_{\max} - x_6)}{h}}}{\tau_{\varepsilon 1} + \mu \sigma_{y_0} e^{\frac{2f_k(x_{\max} - x_6)}{h}}}; \quad (5)$$

$$\beta_3 = \frac{1}{2} \text{arctg} \frac{b_3 \cos \rho}{\text{Sin} \rho - \sqrt{1 - b_3^2}}; \quad (6)$$

$$b_3 = \frac{2 \cdot f_k y_c e^{f_k}}{\tau_{\varepsilon 2} + \mu \sigma_{y_0} e^{f_k}}; \quad (7)$$

$$\tau_{\varepsilon 2} = \frac{(k + \mu \sigma_{y_0}) \cdot (1 - \text{Sin} \rho \sqrt{1 - b_i^2})}{(1 + \text{Sin} \rho \sqrt{1 - b_3^2}) \cdot e^{2\mu(\beta_i - \beta_2 + \beta_3)}}. \quad (8)$$

$\tau_{\varepsilon 1}$ и $\tau_{\varepsilon 2}$ – эффективные касательные напряжения соответственно в точке выхода x_6 ТМЭКН на нижнюю контактную плоскость и в точке пересечения ТМЭКН с продольной осью образца y_c ; $y_c = y - 0,5$ – ордината точки пересечения ТМЭКН с продольной осью образца при $x = 0,5 x_{\max}$; x_6 – абсцисса точки пересечения ТМЭКН с нижней плоскостью образца.

Совокупность уравнений (1)-(8) решалась методом итераций на ПЭВМ. На основании решения системы строится ТМЭКН, изображенная на рис. 1. Вид ТМЭКН диктует условия решения задачи. Она выходит с левой продольной части, где в верхней левой четверти образца касательные напряжения от внешнего трения имеют знак плюс, в правую часть, где в нижней четверти эти напряжения также положительны. В это время ТМЭКН пересекает нижнюю четверть левой продольной части, где касательные напряжения от внешнего трения отрицательны. Если в первых двух четвертях углы поворота от внешнего трения β_1 и β_2 имеют одинаковый знак, в конечном итоге, отрицательный, то в левой нижней четверти $-\beta_i$ имеет положительный знак. Эта особенность по сравнению с нашими прежними разработками [3] учитывается введением угла β_3 и параметра τ_{32} – эффективного касательного напряжения в точке пересечения ТМЭКН с продольной осью образца.

Теперь предстоит решить, откуда будет развиваться трещина из точки a или b ? Для решения этого вопроса нужно учесть критерий: трещина развивается из точки, в которой необходимое для разрушения продольное напряжение σ_y имеет наименьшее значение. Такой точкой является точка a вследствие отсутствия на боковой поверхности напряжений. Полученные расчетные данные проверялись по исходной формуле, позволяющей рассчитывать эффективное касательное напряжение на ТМЭКН

$$\frac{\sigma_x - \sigma_{y0} e^{\frac{2f_k x}{h}}}{2} \sin 2\alpha + f \sigma_{y0} e^{\frac{2f_k x}{h}} \cdot \sin 2\alpha - \mu \left(\frac{\sigma_x + \sigma_{y0} e^{\frac{2f_k x}{h}}}{2} - \frac{\sigma_{y0} e^{\frac{2f_k x}{h}} - \sigma_x}{2} \cos 2\alpha - f \sigma_{y0} e^{\frac{2f_k x}{h}} \right) = k, \quad (9)$$

где

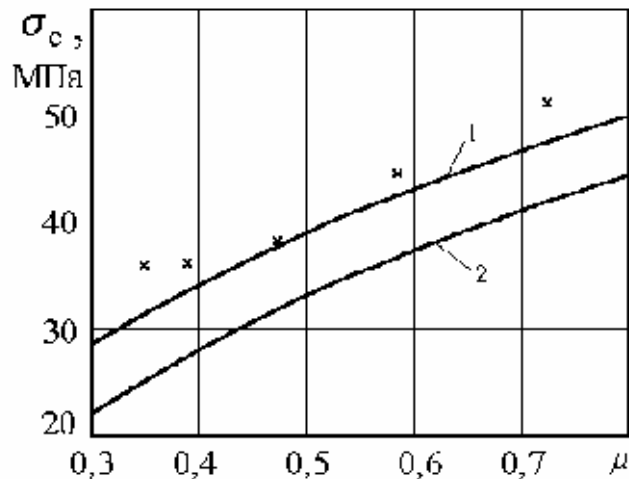
$$\sigma_x = \frac{2 \left(k + \mu \sigma_{y0} e^{\frac{2f_k x}{h}} \right)}{\cos \rho} \left(\sin \rho - \sqrt{1 - b_i^2} \right) + \sigma_{y0} e^{\frac{2f_k x}{h}},$$

представленное в работе [4].

Следует подчеркнуть, что при правильном решении задачи во всех точках ТМЭКН должно соблюдаться уравнение равновесия, т.е. левая часть выражения (9), равная максимальному эффективному касательному напряжению, должна быть равна сопротивляемости материала сдвигу k .

Теперь проверим метод расчета предела прочности по экспериментальным данным, позаимствованным из кадастра [5]. На рис. 2 приведены результаты расчета при $f_k=0,25$ и нанесены соответствующие экспериментальные данные

при $\mu \leq 0,8$. Предельное значение $\mu = 0,8$ принято из условия общности системы уравнений, т.е. при значении $\mu = 0,8$ ТМЭКН касательно выходит на продольную ось образца. Породы, характеризующиеся этими свойствами, нами отнесены к слабым.



1 – по жестко-пластической модели; 2 – по модели предельного состояния
Рис 2 – Зависимости предела прочности от коэффициента внутреннего трения при $k = 10$ МПа и $f = 0,25$:

Сходимость теоретических данных (кривая 1) с экспериментальными составляет 85-90 %, что значительно выше по сравнению с теоретическими данными, полученными на основании жесткопластической модели (кривая 2), по которой принимается значение эффективного касательного напряжения на линии скольжения равным постоянной пластичности k – сопротивлению материала сдвигу, и сходимость расчетных данных с экспериментальными составляет 70-75 % [1]. Следует отметить, что предложенный метод позволяет рассчитать предельные напряжения в вершине трещины и определить несущую способность неразрушенной части материала в любой точке на ТМЭКН, т.е. построить при знании модуля упругости запредельную кривую «напряжение сжатия – деформация», что является предметом дальнейших исследований.

Выводы

1. Предложен метод расчета предела прочности слабых горных пород, основанный на условии предельного состояния, по которому принимается, что разрушение происходит при достижении эффективных касательных напряжений сопротивляемости сдвигу в локальной области, в то время как остальные области находятся в упругом состоянии.

2. Теоретические данные предела прочности горных пород с коэффициентом внутреннего трения $\mu \leq 0,8$ при коэффициенте внешнего трения, полученные с использованием метода, с экспериментальными имеют довольно высокую сходимость – 85-90%.

3. Применение метода расчета предела прочности пород при практических расчетах позволяет повысить достоверность результатов с экспериментальными данными по сравнению с известными методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Д.Л. Определение влияния внутреннего и внешнего трения горных пород на их прочность при одноосном сжатии. Дисс. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 2002. – 145 с.
2. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Дифференциальное уравнение предельного состояния деформируемого твердого тела материала с учетом внутреннего и внешнего трения // Геотехническая механика. Выпуск 41. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2003. - С. 145-152.
3. Васильев Л.М., Васильев Д.Л. Метод расчета предела прочности горных пород на одноосное сжатие при линейной связи между контактными напряжениями // Геотехническая механика. Выпуск 42. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2003. - С. 73-80.
4. Васильев Д.Л. Закономерности формирования горизонтальных нормальных напряжений в массивах горных пород // Геотехническая механика. Выпуск 29. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. 2001. - С. 17-21.
5. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. – М.: «Недра», 1975. - 277 с.

УДК 531.555.1:531.384:532.51.542.012.4.001.24

Д-р техн. наук А.И. Волошин,
канд. техн. наук Б.В. Пономарёв,
канд. техн. наук О.Л. Кордюк

ПРЯМОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПНЕВОТРАНСПОРТНОМ КАНАЛЕ

Викладено алгоритм та результати прямого чисельного моделювання руху ансамблю частинок, що моделюють транспортування сипкого матеріалу у горизонтальному каналі. Застосовано алгоритм типу молекулярної динаміки.

DIRECT NUMERICAL MODELING OF PARTICLES IN PNEUMOCONVEYING CHANNEL

Algorithm & results of direct numerical modeling particles ensemble is described. These particles motion is modeling of bulk materials transportation in gas flow. Method of molecular dynamics is used.

Движение двухфазной среды газ - твёрдые частицы являлось предметом многочисленных исследований. В части работ не учитывается взаимодействие частиц между собой. В других работах принимаются феноменологические законы трения среды частиц о стенки канала. Целью настоящей работы является попытка определить величину трения частиц о стенки канала и законы движения частиц путём прямого моделирования ансамбля частиц методом молекулярной динамики. Известны два подхода рассмотрения движения потока частиц некоторой среды, предложенные один Лагранжем другой Эйлером [3]. Подход Лагранжа на основе уравнений динамики точки предусматривает изучение движения частиц данной среды так, что наблюдается каждая отдельная частица во времени и пространстве. Для этого необходимо следить за каждой частицей на всем протяжении потока, что не всегда удобно и, кроме того, в этом случае