

Н.Г. Малич, Д.Л. Васильев, О.А. Усов, С.В. Тынына

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СЖАТИИ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ

Аннотация. Приведены исследования прочности горных пород при различных видах сжатия с учетом контактного трения. Рассмотрена задача по разработке математических моделей локального контактного влияния характеристик трения на сопротивляемость сжатию и модели влияния характеристик трения на сопротивляемость одноосному скользящему сжатию. Разработан алгоритм расчета прочности горных пород при сжатии по математическим моделям влияния характеристик трения. Такой вид распределения напряжений в породе характерен при разрушении крепких материалов в зоне контакта с бронеплитами в щековых дробилках со сложным движением щеки и с конусами в конусных дробилках. Показана возможность управления режимами нагружения, а именно создания в зоне контакта так называемого скользящего сжатия для снижения энергозатрат процесса дробления.

Постановка проблемы и задачи. В работах Л.М. Васильева [1] показано, что прочность при сжатии зависит от трех факторов, перечисленных в порядке убывания – минимальной компоненты боковой нагрузки, коэффициентов внутреннего и внешнего трения. Поэтому для поиска наименее энергозатратных условий дезинтеграции горной породы необходима разработка методов оценки влияния контактного трения и поиска наиболее рациональных режимов нагружения породы. В связи с этим вопрос построения математических моделей прочности горных пород при различных видах сжатия с учетом контактного трения является актуальным.

В статье поставлена задача разработать математические модели локального контактного влияния характеристик трения на сопротивляемость сжатию и модели влияния характеристик трения на сопротивляемость одноосному скользящему сжатию

Основная часть. Формализуем условия сжатия образца следующим образом.

Линейность локальной зависимости предельной нагрузки Y_c от каждой из характеристик трения – и внутреннего [$0 \leq (\mu = \operatorname{tg} \rho) \leq 1$], и внешнего ($0 \leq f \leq 0,3$), позволяет использовать принцип суперпозиции – и представить общую зависимость в виде суммы локальных

$$Y_y / (2K) = F(\mu = \operatorname{tg} \rho) + C(\cdot) f \quad (1)$$

Для одноосного сжатия функция $F(\mu)$, вообще говоря, может быть выбрана линейной. Тогда можно записать

$$Y_y / (2K) = \alpha \mu + C f = \alpha \operatorname{tg} \rho + C f, \quad (2)$$

а при отсутствии внешнего трения на контакте

$$Y_y / (2K) = Y_c / 2 K = \mu,$$

или, заменяя μ на $\operatorname{tg} \rho$

$$Y_y / (2K) = 2 K \alpha \operatorname{tg} \rho. \quad (3)$$

Это выражение должно совпадать с классической формулой для прочности при одноосном сжатии $\sigma_c = 2kn \operatorname{ctg} (\pi/4 - \rho/2)$ [1].

В действительности – функция $\operatorname{ctg} (\pi/4 - \rho/2)$, пропорциональна $\operatorname{tg} \rho$. При этом, глядя на выражение (2)

$$Y_y / (2K) = \alpha \operatorname{tg} \rho + C(\cdot) f$$

не возможно уловить, что при переходе к случаю $f = 0$ получается приведенная классическая формула. Зато при выборе функции F в виде $F = \operatorname{ctg} (\pi/4 - \rho/2)$, этот предельный переход в выражении

$$Y_y / (2K) = \operatorname{ctg} (\pi/4 - \rho/2) + C(\cdot) f \quad (4)$$

очевиден.

Поэтому, математическую модель для одноосного сжатия мы будем формулировать в виде формулы (4).

Функция $C(\cdot)$, в первую очередь, должна отражать тот факт, что при условии $\operatorname{tg} \rho = 0$ прочность одноосного сжатия кубического образца не зависит от коэффициента внешнего трения. Она выбрана в виде:

$$C(\cdot) = \operatorname{tg} \rho / (\operatorname{tg} \rho + 0,01).$$

Слагаемое 0,01 в знаменателе введено только для исключения неопределенности вида $0 / 0$ при $\operatorname{tg} \rho = 0$.

В итоге, математическая модель влияния характеристик трения на сопротивляемость одноосному сжатию выглядит так

$$Y_y / (2K) = \operatorname{ctg} (\pi/4 - \rho/2) + f \operatorname{tg} \rho / (\operatorname{tg} \rho + 0,01). \quad (5)$$

График, в котором по вертикальной оси Y отложены значения левой части

уравнения, а по горизонтальной X – правой части, приведен на рис.1.

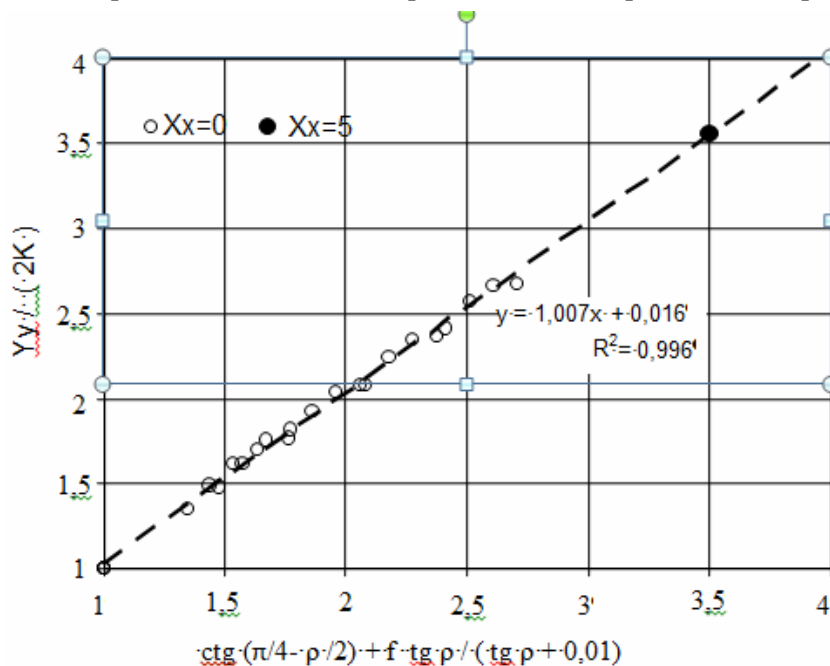


Рисунок 1- Зависимость прочности одноосного сжатия от характеристик трения

Светлые точки и линия тренда соответствуют одноосному сжатию. Очень высокий коэффициент корреляции, отличие множителя при переменной X от 1 только в третьем знаке, а свободного члена от 0 во втором знаке уравнения регрессии свидетельствуют о том, что построенная математическая модель вполне адекватно отражает влияние характеристик трения.

Черная точка на графике соответствует всестороннему сжатию с минимальной боковой нагрузкой $X_x = 5$ К. Для нее по горизонтальной оси откладывалось собственное значение.

Практическое совпадение этой точки с линией тренда одноосного сжатия хорошо иллюстрирует правильность выбранного подхода к построению универсальной математической модели сжатия.

При трехосном сжатии вид функции F принимается в соответствии с приведенным выше классическим уравнением.

$$F = \text{ctg} (\pi/4 - \rho / 2) + X_x [(1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)] / (2K). \quad (6)$$

Но функция Y_u умножается на коэффициент, зависящий от внешнего трения, который равен

$$\{1 + f X_x / [2 (X_x + K)]\} / (2K). \quad (7)$$

Тогда

$$Y_y \{1 + f X_x / [2 (X_x + K)]\} / (2K) = \text{ctg} (\pi/4 - \rho / 2) + X_x [(1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho)] / (2K) + C(\dots) f. \quad (8)$$

Функция C(.) выбирается из тех же соображений, что и для одноосного сжатия, но из двух одинаковых частей. Вторая часть вносится в квадратные скобки

$$Y_y \{1 + f X_x / [2 (X_x + K)]\} / (2K) = \text{ctg} (\pi/4 - \rho / 2) + f \text{tg} \rho / (\text{tg} \rho + 0,01) + X_x [(1 + \sin \rho) / (1 - \sin \rho) + f \text{tg} \rho / (\text{tg} \rho + 0,01)] / (2K). \quad (9)$$

На рис.2. приведен график, в котором по вертикальной оси у отложены значения левой части уравнения, а по горизонтальной х – правой части.

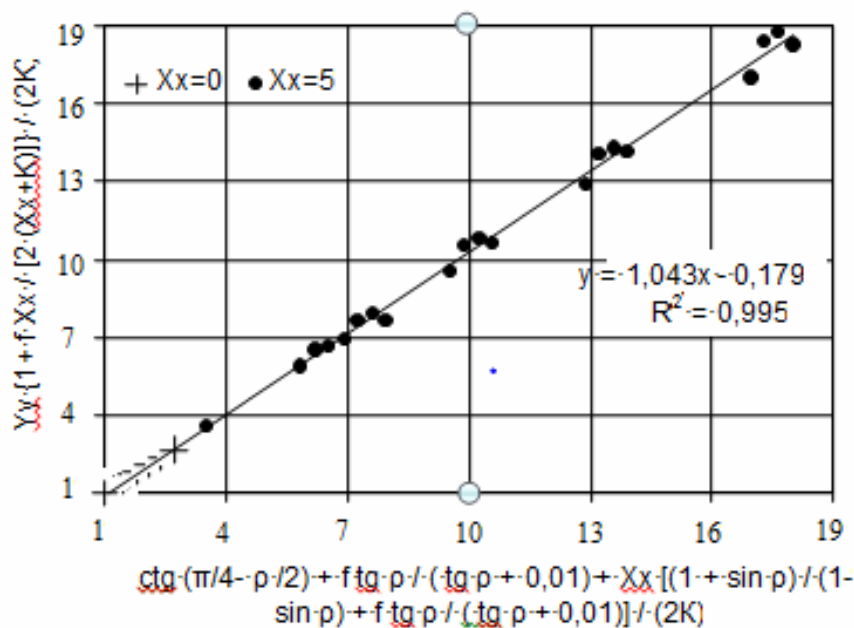


Рисунок 2 – Зависимость прочности трехосного сжатия от характеристик трения

Высокий коэффициент корреляции, отличие и множителя при переменной x от 1 во втором знаке, а свободного члена от 0 – в первом дробном знаке уравнения регрессии свидетельствуют о том, что построенная математическая модель вполне адекватно отражает влияние характеристик трения при трехосном сжатии.

На этом же графике крестиками нанесены значения, соответствующие случаю одноосного сжатия. Они полностью накладываются на линию тренда трехосного сжатия.

Исходя из изложенного, в качестве математической модели локального контактного влияния характеристик трения на сопротивляемость трехосному

сжатию выступает уравнение (9).

Эта форма записи уравнения удобна при работе с данными, в которых фигурируют углы внутреннего трения, выраженные в градусах, или радианах.

Если внутреннее трение оценивается величиной $\mu = \operatorname{tg} \rho$, то имеет смысл преобразовать (9) с помощью тригонометрических соотношений

$$\begin{aligned}\operatorname{ctg}(\pi/4 - \rho/2) &= \cos \rho / (1 - \sin \rho) \\ \sin \rho &= \operatorname{tg} \rho / (1 + \operatorname{tg}^2 \rho)^{1/2} \\ \cos \rho &= 1 / (1 + \operatorname{tg}^2 \rho)^{1/2},\end{aligned}\quad (10)$$

заменяя в них $\operatorname{tg} \rho$ на μ , получим

$$\begin{aligned}\operatorname{ctg}(\pi/4 - \rho/2) &= 1 / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] \\ \sin \rho &= \mu / (1 + \mu^2)^{1/2} \\ \cos \rho &= 1 / (1 + \mu^2)^{1/2}.\end{aligned}\quad (11)$$

Подставляя последние выражения в (9) получим

$$\begin{aligned}Y_y \{1 + f X_x / [2 (X_x + K)]\} / (2K) &= 1 / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] + f \mu / (\mu + 0,01) + \\ &+ X_x \{ [(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu] / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] + f \mu / (\mu + 0,01) \} / (2K).\end{aligned}\quad (12)$$

Последнее выражение можно записать в более компактной форме, если преобразовать выражение в квадратных скобках при X_x в правой части уравнения

$$\begin{aligned}[(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu] / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] &= \\ &= [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu + 2\mu] / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] = \\ &= [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] + (2\mu) / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] = \\ &= 1 + (2\mu) / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu].\end{aligned}$$

Подставив это выражение в (12) получим второй вариант записи математической модели – через параметр μ

$$\begin{aligned}Y_y \{1 + f X_x / [2 (X_x + K)]\} / (2K) &= 1 / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] + f \mu / (\mu + 0,01) + \\ &+ X_x \{ [1 + (2\mu) / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu]] + f \mu / (\mu + 0,01) \} / (2K).\end{aligned}\quad (13)$$

Еще раз подчеркнем, что формулы (9) и (13) применимы для диапазона параметров трения: внутреннего, μ - в пределах 0 – 1; внешнего, f - в пределах 0 – 0,3.

Разработанная модель относится к нагрузкам в локальной области (точке), находящейся в предельном состоянии и не учитывает неравномерность их распределения вдоль контактной поверхности. Тем не менее, можно указать условия проведения эксперимента по сжатию образцов, которые соответствуют именно этой модели локального контактного влияния характеристик трения.

Если вместо жесткой стальной плиты для передачи давления на поверхность образца использовать гибкую мембрану (рис.3), то усилия на ней будут распределены равномерно.

Влияние характеристик трения на величину нагрузки на верхнюю грань образца в целом будут описываться зависимостью (13).

Отметим важную особенность – хотя вертикальные напряжения по контакту с мембраной пресса распределены равномерно, внутри образца они увеличиваются от краев к центру.

На рис. 3 приведена эпюра нагрузок левой верхней четверти образца. Она полностью соответствует схеме изгиба со сжатием балки.

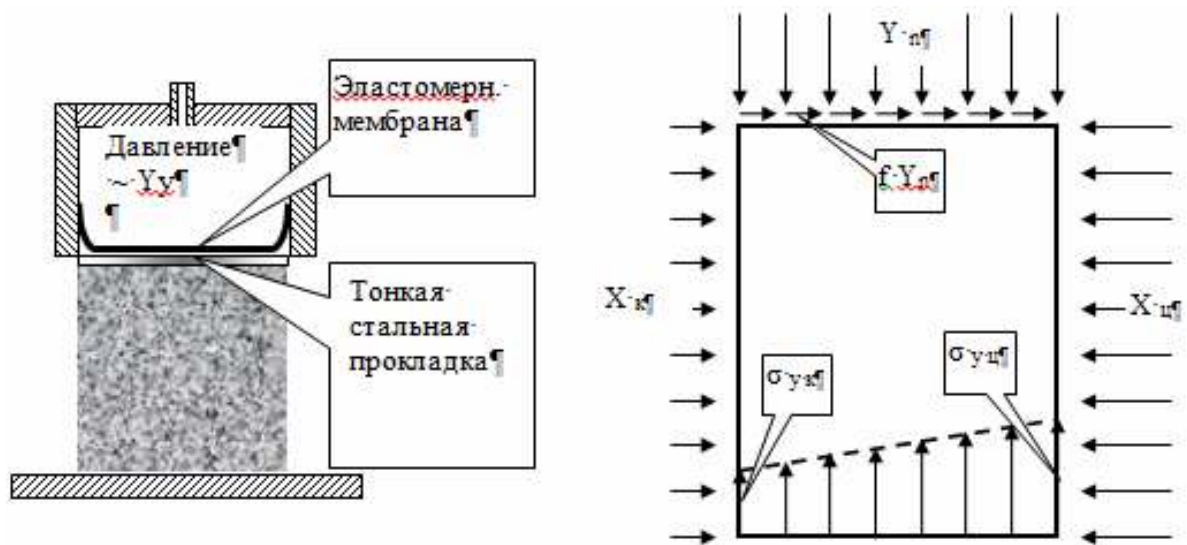


Рисунок 3 – Схема однокамерного мембранного пресса

Изгиб происходит в горизонтальном направлении.

Материал на левом крае стремится к растяжению в вертикальном направлении, а на правом крае – к сжатию. Поэтому общее сжимающее напряжение на крае уменьшается, а в центре – увеличивается.

Таким образом, внешнее трение не просто увеличивает контактную прочность, но и перераспределяет величину вертикальных нормальных напряжений внутри образца.

Рассмотрим модель влияния характеристик трения для скользящего сжатия

Практической областью применения модели локального контактного влияния характеристик трения являются процессы дробления и измельчения. Нагрузки в этих процессах носят характер «скользящего сжатия» образца – ко-

гда одна из жестких плит пресса перемещается в горизонтальном направлении. Схема нагружения и эпюра действующих усилий представлена на рис. 4.

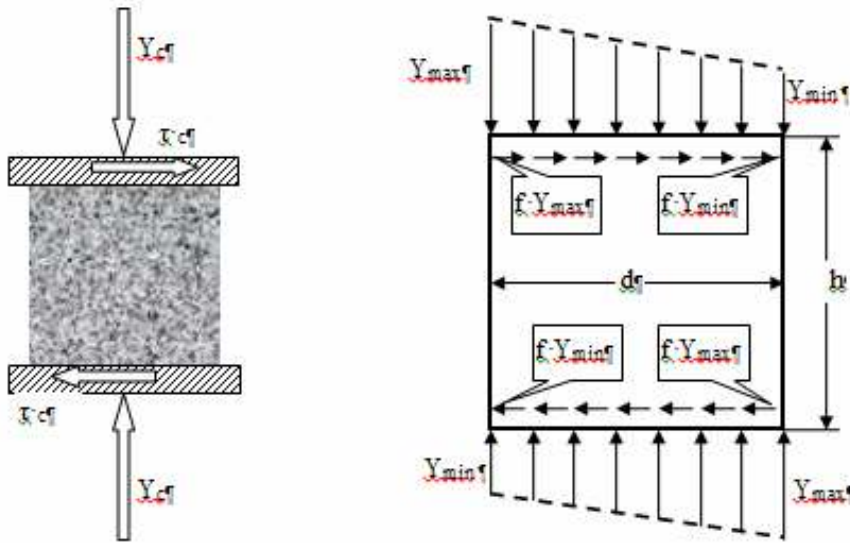


Рисунок 4 –Схема скользящего сжатия между жесткими плитами пресса

Наличие односторонне направленных касательных усилий на верхней и нижней гранях образца порождает крутящий момент. Этот момент компенсируется неравномерным распределением вертикальной нагрузки вдоль контактной линии.

Сделаем достаточно обоснованное предположение, что нормальная нагрузка распределена по линейному закону и

$$Y_c = (Y_{max} + Y_{min}) / 2 . \quad (14)$$

Расположение максимума и минимума нормальной нагрузки определяется условием равенства 0 суммарного крутящего момента от всех нагрузок. Поскольку момент от касательных усилий стремится повернуть образец по часовой стрелке, момент от нормальных усилий должен быть направлен против часовой стрелки.

Касательные нагрузки порождены внешним трением, их величина

$$\tau_c = f Y_c = f (Y_{max} + Y_{min}) / 2 , \quad (15)$$

а их крутящий момент относительно нижней грани образца.

$$M_\tau = f Y_c h = f (Y_{max} + Y_{min}) h d / 2 . \quad (16)$$

Моменты от нормальных нагрузок относительно правой боковой грани образца равны:

- для верхней грани

$$M_b = \int_0^d [Y_{min} + x (Y_{max} - Y_{min}) / d] x dx = [Y_{min} x^2/2 + x^3 (Y_{max} - Y_{min}) / (3d)]_0^d$$

- для нижней грани

$$M_H = \int_0^d [Y_{\max} - x (Y_{\max} - Y_{\min}) / d] x dx = [Y_{\max} x^2/2 - x^3 (Y_{\max} - Y_{\min}) / (3d)]_0^d$$

Подставляя в выражения первообразных пределы интегрирования, получим

$$M_B = [Y_{\min} d^2/2 + d^3 (Y_{\max} - Y_{\min}) / (3d)] = Y_{\max} d^2/3 + Y_{\min} d^2/6 \quad (17)$$

$$M_H = [Y_{\max} d^2/2 - d^3 (Y_{\max} - Y_{\min}) / (3d)] = Y_{\max} d^2/6 + Y_{\min} d^2/3. \quad (18)$$

Учитывая то обстоятельство, что верхняя нормальная нагрузка вращает образец против часовой стрелки, а нижняя – по часовой стрелке, общий момент равен разности моментов

$$M_{\sigma} = M_B - M_H = (Y_{\max} - Y_{\min}) d^2 / 6 \quad (19)$$

$$f (Y_{\max} + Y_{\min}) h d / 2 = (Y_{\max} - Y_{\min}) d^2 / 6 \quad (20)$$

$$3 f (Y_{\max} + Y_{\min}) h / d = (Y_{\max} - Y_{\min}) \quad (21)$$

$$Y_{\min} = Y_{\max} (1 - 3 f h / d) / (1 + 3 f h / d) \quad (22)$$

Тогда

$$Y_c = (Y_{\max} + Y_{\min}) = Y_{\max} [1 + (1 - 3 f h / d) / (1 + 3 f h / d)] / 2 = Y_{\max} [1 + \frac{3 f h / d}{1 + 3 f h / d} + 1 - \frac{3 f h / d}{1 + 3 f h / d}] / 2. \quad (23)$$

Окончательное выражение связи средней нагрузки с максимальной для условий скользящего сжатия имеет вид

$$Y_c = Y_{\max} / (1 + 3 f h / d). \quad (24)$$

После подстановки в него значения Y_{\max} , полученного по модели локального контактного влияния при условии отсутствия боковой нагрузки ($X_h = 0$) получается

$$Y_c = 2K\{1 / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] + f \mu / (\mu + 0,01)\} / (1 + 3 f h / d). \quad (25)$$

Уравнение (25) используется в качестве математической модели влияния характеристик трения на сопротивляемость одноосному скользящему сжатию.

Далее приведем алгоритм расчета прочности горных пород при сжатии по математическим моделям влияния характеристик трения

Под прочностью горной породы при сжатии мы будем понимать значение максимальной компоненты внешней нагрузки (в размерности сила / площадь), соответствующее началу разрушения – возникновению первой трещины.

Исходными данными для расчета являются:

- модуль сопротивления сдвигу K ;
- минимальная из трех компонента внешней нагрузки – X_h (в размерности сила / площадь). Если сжатие однокомпонентно, вместо X_h подставляется 0;

- тангенс угла внутреннего трения μ . Если внутреннее трение задано вели-

чиной угла ρ в градусах, то нужно перейти к μ по формуле

$$\mu = \text{tg} (\pi \rho / 180);$$

- коэффициент внешнего трения f ;
- форм-фактор (отношении ширины образца к высоте – d/h).

Результатом расчета является значение максимальной компоненты внешней нагрузки Y_c (в размерности сила / площадь). Оно определяется по формулам (25), или (9) в зависимости от схемы нагружения. Эта величина является усредненной по всей поверхности контакта, поэтому соответствующая ей компонента силы определяется, при необходимости, формулой $N = Y_c S$, где S – площадь контакта.

Расчет производится вводом перечисленных выше параметров в строку офисной таблицы (EXCEL), схема которой (компактный вариант) изображена на рис. 5.

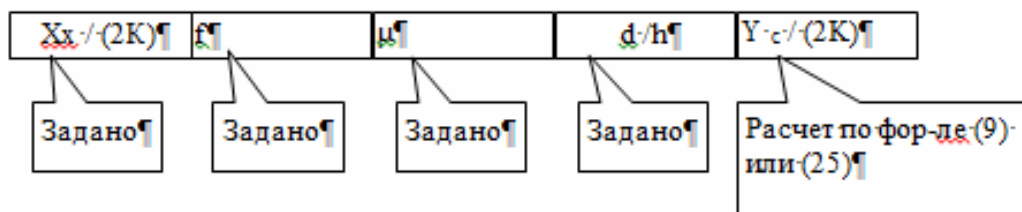


Рисунок 5 – Макет компактного варианта строки EXCEL

Если нужно определить серию значений прочности образца при различных значениях исходных данных, то строки располагаются друг под другом, образуя таблицу.

Компактный вариант строки требует повышенного внимания при заполнении правой ячейки.

Чтобы сократить количество скобок, вводимых в одну ячейку, можно разбить расчетные формулы на 3 легко обозримых составных части

$$A = 1 / [(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu] \quad (26)$$

$$B = f \mu / (\mu + 0,01) \quad (27)$$

$$C = Xx / (2K) + 0,2f (d / h)^2 . \quad (28)$$

После такого разбиения выражение максимальной компоненты нагрузки при трехосном сжатии примет вид

$$Y_c / (2K) = (A + B + C(1 + 2\mu A + B)) / (1 + fC / (2C + 1)). \quad (29)$$

Для одноосного скользящего сжатия формула (2.32) перейдет в формулу

$$Y_c / (2K) = (A + B) / (1 + 3 f h / d). \quad (30)$$

В расширенном варианте строки офисной таблицы (EXCEL) приведен в табл.1.

Таблица 1

Прочность образца кубической формы $Y_c / (2K)$ при одноосном сжатии ($X_x / K = 0$) для разных значений внутреннего трения

$X_x / (2K)$	f	μ	d / h	A	B	C	$Y_c / (2K)$
0	0,2	0,6	1	1,766	0,197	0,04	2,08
0	0,2	0,8	1	2,08	0,198	0,04	2,44
0	0,2	1	1	2,414	0,198	0,04	2,83

Кстати, таблица показывает, что изменение внутреннего трения с 0,6 до 1 увеличивает прочность образца на 38%.

Приведем оценку влияния внешнего трения на прочностные показатели одноосного сжатия (Рис 6). При увеличении коэффициента внутреннего трения прочность образцов всегда повышается, примерно на 50%.

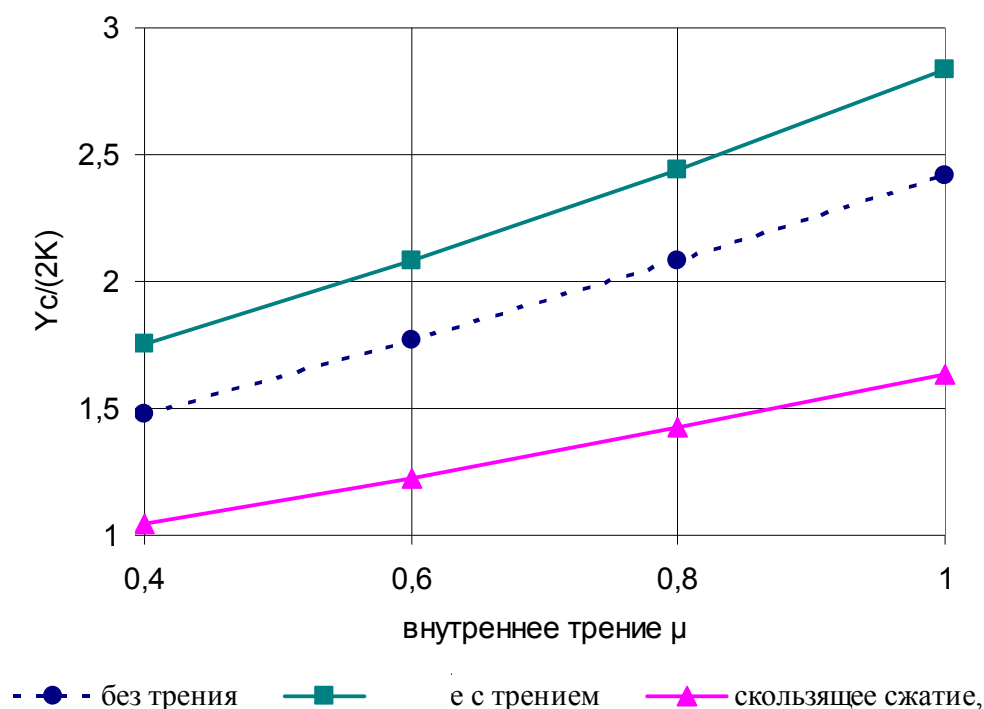


Рисунок 6 – Прочность образца без трения и с внешним трением при $f=2$

Иная картина наблюдается для внешнего трения. Прочность нешлифованного ($f= 0,2$) образца без смазки (линия зеленого цвета) при обычном сжатии примерно на 17% больше прочности шлифованного ($f=0$) смазанного (пунктирная линия).

В то же время при скользящем сжатии прочность нешлифованного ($f= 0,2$) образца без смазки (линия красного цвета) примерно на 32% меньше, чем шлифованного и смазанного.

Таким образом, шлифовка и смазка уменьшают предел прочности образца при обычном одноосном сжатии, но увеличивают его при скользящем сжатии – с поступательным сдвигом плит пресса относительно друг друга. А переход от обычного одноосного сжатия к скользящему уменьшает предел прочности почти на 50%.

Анализ рис.6 также показывает, что степень влияния внешнего трения почти не зависит от величины внутреннего трения – значит, приведенные цифры характерны для всех типов хрупких пород и минералов.

При организации технологических процессов разрушения в сжатой среде следует стремиться к созданию условий для скользящего сжатия.

Выводы:

1) Разработаны математические модели влияния характеристик трения при трехкомпонентном сжатии и при нагрузке типа «одноосное скользящее сжатие».

2) Разработанные модели соответствуют имеющимся экспериментальным данным, в частности учитывают т.н. «масштабный эффект» и эффект высокой чувствительности прочности образцов к изменению типа нагрузки – с одноосного сжатия на сжатие со скольжением.

3) Простота построенных моделей не требует применения специализированных средств компьютерного программирования. Для расчета предельных нагрузок достаточно ввести одну из формул в ячейку офисной таблицы (EXCEL).

4) Основными факторами влияния внешнего трения являются перераспределение нормальных напряжений на поверхности контакта и формирование поперечных (горизонтальных) напряжений внутри образца даже при действии только продольной (вертикальной) внешней нагрузки.

5) Анализ по математическим моделям позволил оценить степень влияния внешнего трения на прочность образцов. Наличие внешнего трения повышает прочность образцов на 17% при одноосном сжатии и снижает на 32% при скользящем сжатии. А относительная разница между одноосным сжатием и скользящим сжатием достигает 50% при коэффициенте внешнего трения 0,2.

Это свидетельствует о том, что наиболее энергоэффективным способом дезинтеграции является скользящее сжатие.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г, Ангеловский А.А.. Механика образования форм разрушения образцов горных пород при их сжатии / Монографія. Дніпро: ИМА-пресс, 2018. 174 с.

REFERENCES

1. Vasil`ev L.M., Vasil`ev D.L., Malich N.G, Angelovskij A.A.. Mekhanika obrazovaniya form razrusheniya obrazczov gornu`kh porod pri ikh szhatii / Monografi`ya. Dni`pro: IMA-press, 2018. 174 s.

Received 08.11.2020.

Accepted 13.11.2020.

Побудова математичної моделі міцності гірських порід при стиску з урахуванням контактної тертя

Наведено дослідження міцності гірських порід при різних видах стиснення з урахуванням контактної тертя. Розглянуто задачу по розробці математичних моделей локального контактної впливу характеристик тертя на опірність стисненню і моделі впливу характеристик тертя на опірність одноосьовому ковзному стиску. Розроблено алгоритм розрахунку міцності гірських порід при стисканні за математичними моделями впливу характеристик тертя. Такий вид розподілу напружень в породі характерний при руйнуванні міцних матеріалів в зоні контакту з бронеплитами в щоківних дробарках зі складним рухом щоки і з конусами в конусних дробарках. Показана можливість керування режимами навантаження, а саме створення в зоні контакту так званого ковзного стиснення для зниження енерговитрат процесу дроблення.

Construction of a mathematical model of rock strength under compression taking into account contact friction

Research of the strength of rocks under various types of compression is presented, taking into account contact friction.

In this work, mathematical models of the influence of friction characteristics under three-component compression and under a load of the "uniaxial sliding compression" type are developed. They correspond to the available experimental data and take into account the "scale effect" and the effect of the high sensitivity of the strength of the samples to a change in the type of load - from uniaxial compression to compression with sliding.

The simplicity of the constructed models does not require the use of specialized computer programming tools. To calculate the ultimate loads, it is enough to enter one of the formulas in the cell of the office spreadsheet (EXCEL).

The main factors of the influence of external friction are the redistribution of normal stresses on the contact surface and the formation of horizontal stresses inside the sample even under the action of only a vertical load.

The degree of influence of external friction on the strength of the samples is estimated.

The presence of external friction increases the strength of the specimens by 17% in uniaxial compression and decreases by 32% in sliding compression. The relative difference between uniaxial compression and sliding compression reaches 50% with an external friction coefficient of 0.2. This shows that the most energy efficient disintegration method is slip compression.

An algorithm has been developed for calculating the strength of rocks in compression using mathematical models of the influence of friction characteristics. This type of stress distribution in the rock is typical for the destruction of hard materials in the contact zone with armor plates in jaw crushers with a complex jaw movement and with cones in cone crushers. Thus, it has been shown that it is possible to control the loading modes to reduce the energy consumption of the crushing process.

Малич Николай Григорьевич - к.т.н., доц., Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина.

Васильев Дмитрий Леонидович - д.т.н., с.н.с., ИГТМ НАН Украины, г. Днепр, Украина.

Усов Олег Александрович, - к.т.н., с.н.с., ИГТМ НАН Украины, г. Днепр, Украина.

Тынына Сергей Владимирович - к.т.н., с.н.с., , ИГТМ НАН Украины, г. Днепр, Украина.

Маліч Миколай Григорович- к.т.н., доц., Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна.

Васильєв Дмитро Леонідович - д.т.н., с.н.с , ІГТМ НАН України, м Дніпро, Україна.

Усов Олег Олександрович - к.т.н., с.н.с., ІГТМ НАН України, м Дніпро, Україна.

Тинина Сергій Володимирович- к.т.н., с.н.с., ІГТМ НАН України, м Дніпро, Україна.

Malich Nikolay- ph.d., associate prof. National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Vasiliev Dmitry Leonidovich - d.t.s, s.n.s., IGTM NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Usov Oleg Aleksadrovich - ph.d., s.n.s., IGTM NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine .

Тунуна Sergey Vladimirovich - ph.d., s.n.s., IGTM NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.