

4-th International Symposium "Roofbolting in Mining", Aachen, 2001, pp.19-28.

7. Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2003. № 40, pp. 283-353.

8. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. – Butterworth-Heinemann, 2000. – 690 p.

9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М. Недра, 1987. – 224 с.

УДК 622.838

А.В. Ведмедев

КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ В РАСЧЁТАХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Розглянуті розподіли нормальних напружень і характер руйнування в ціликах різноманітної форми. Приведені і узагальнені вирази коефіцієнтів форми різних авторів. Проаналізовані деякі параметри камерно-стовпової системи розробки в залежності від різних виразів коефіцієнтів форми.

SHAPE FACTOR FOR UNDERGROUND CONSTRUCTIONS DESIGNS

Normal stresses distributions and failure mode in various form pillars are considered. Shape factor expressions of different authors are given and generalized. Some room-and-pillar system parameters depending on various shape factor expressions are analyzed.

Изучение проявлений горного давления на шахтах, разрабатывающих мощные пласты полезного ископаемого, включает исследование влияния формы на прочностные характеристики опорных целиков для получения или корректировки исходных данных, необходимых при выборе рациональных параметров камерно-столбовой системы разработки.

Вопросами изучения зависимости несущей способности от формы целиков занималось множество исследователей, в работах которых были получены самые разнообразные эмпирические зависимости. Во всех этих выражениях коэффициента формы прослеживается следующая наблюдаемая в лабораторных условиях закономерность: с увеличением высоты образцов прочность уменьшается и, наоборот, с увеличением ширины образцов прочность увеличивается.

Многими исследователями [1, 2] давно установлено, что при испытании хрупких образцов горных пород в классе напряжений $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ в их объеме возникает неравномерное напряженное состояние, анализ и математическое описание которого затруднено из-за целого ряда причин [3].

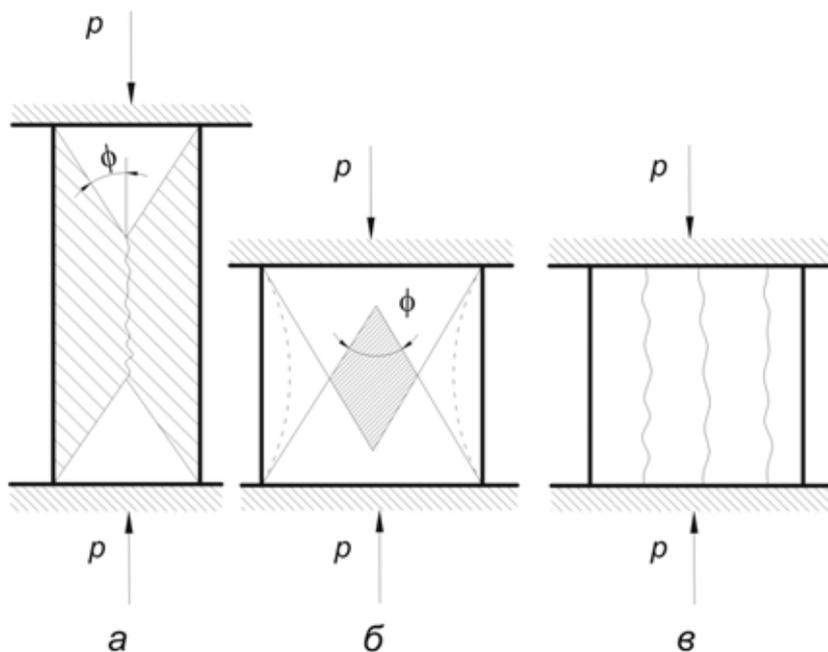
Авторами работы [4] в результате моделирования методом фотоупругости были получены распределения напряжений в моделях целиков. Когда целик однороден и составляет одно целое с потолочиной, то при нагрузках он деформируется как в продольном, так и поперечном направлениях. Перемещение целика в поперечном направлении сдерживается потолочиной. В результате в целике у контакта с потолочиной образуется клиновидная область всестороннего сжатия, являющаяся наиболее устойчивой частью целика.

Наибольшей абсолютной величины сжимающие напряжения σ_y достигают в точках контакта, расположенных вблизи углов камер на контактах целика с бо-

ковыми породами. Сжимающие напряжения σ_y уменьшаются к центру целика и охватывают некоторую область. В случае низких целиков эти области накладываются друг на друга. Область распространения сжимающих напряжений зависит от отношения высоты целика (h) к его ширине (a). При $h/a \leq 1,5$ весь целик испытывает сжимающие напряжения; при $h/a > 1,5$ в средней части целика появляются растягивающие напряжения, которые увеличиваются с увеличением высоты целика.

Напряжения σ_x в целиках на контакте с потолочиной распределены также весьма неравномерно. Максимальная концентрация их наблюдается в углах камер, где их абсолютная величина определяется в основном радиусом закругления углов камер. Вглубь целика σ_x уменьшаются и в центре достигают минимума [5].

Разное напряженное состояние оказывает влияние и на характер разрушения образцов. При одноосном сжатии разрушение может происходить по схемам, показанным на рисунке 1. Так, наличие трения на опорных поверхностях образцов приводит к образованию двух конусов, идущих от периметра оснований образцов. Вершины этих конусов направлены к середине образца. При низких образцах (Рис. 1, б) верхний конус накладывается на конус нижней опорной поверхности, образуя в средней части образца ядро, находящееся в объемном напряженном состоянии. Разрушение такого образца происходит при более высоких напряжениях, необходимых для разрушения ядра, находящегося в условиях объемного сжатия.



а – образование конусов разрушения в высоких образцах; б – образование конусов разрушения в образцах с отношением $1 \leq h/a \leq 1,5$; в – разрушение образцов при одноосном сжатии со смазкой торцов путём отрыва.

Рис. 1 – Схемы разрушения образцов при сжатии

При разрушении высоких образцов (рис. 1,а) их средняя часть, находящаяся в однородном напряженном состоянии, раскалывается под действием полностью развившихся конусов. Разрушение таких образцов происходит при более низких напряжениях.

При испытании на одноосное сжатие образцов со смазкой или прокладкой по их торцам происходит разрушение, схема которого показана на рисунке 1, в.

В этом случае образец разрушается не от сжимающих, а от разрывающих напряжений [3].

Учитывать влияние формы на прочность целиков впервые было предложено Церном для угольных шахт США в результате испытаний малых образцов при одноосном сжатии [6].

В аналитических выражениях влияние формы на прочность целиков учитывается в виде коэффициента формы K_f , который представляет собой функцию $K_f = f\left(\frac{h}{a}\right)$. Коэффициент формы вводится как поправка к прочности на одноосное сжатие кубических или цилиндрических образцов горных пород:

$$\sigma_{сжс} = \sigma_k \cdot K_f,$$

где $\sigma_{сжс}$ – несущая способность целика с учётом коэффициента формы; σ_k – прочность кубических или цилиндрических образцов горных пород на одноосное сжатие, определяемая согласно [7].

В результате испытаний образцов горных пород разными авторами [8-13] были получены зависимости, которые можно разделить на следующие группы:

1. Прямая зависимость или совокупность прямых (Г.Т. Нестеренко, А.М. Ильштейн, Ю.М. Либерман, Н.П. Ерофеев). Описываются уравнением

$$K_f = A - B \frac{h}{a},$$

где A и B – здесь и далее константы, полученные в результате аппроксимации данных лабораторных испытаний.

2. Гиперболическая зависимость или совокупность гипербол, описывается несколькими типами уравнений:

а)
$$K_f = A \sqrt{\frac{a}{h}}, \text{ (Церн, А.Ж.Машанов и др.)};$$

б)
$$K_f = A + B \frac{a}{h}, \text{ (Баушингер, Бантинг и др.)};$$

$$в) \quad K_f = \frac{A \frac{h}{a} + B}{C \frac{h}{a} + D}, \text{ (Б.М.Усаченко, ВНИИСоль, А.Р.Серая и др.)}$$

3. Логарифмическая зависимость (А.Н.Шашенко и др.)

$$K_f = A + B \ln \frac{a}{h}.$$

Все эти зависимости непротиворечивы, потому что получены экспериментально в лабораторных условиях из испытаний образцов различных горных пород (уголь, мрамор, песчаник, известняк, гипс, каменная соль и др.) из разных месторождений.

Большие исследования по изучению влияния формы на несущую способность целиков в натуральных условиях на образцах большой формы были проведены З.Бенявски [14]. Испытания проводились в ЮАР на угольных месторождениях в пластах большой мощности. При изучении результатов, полученных З.Бенявски и др. можно выделить два типа уравнений коэффициента формы:

$$1) \quad K_f = A + B \frac{d}{h}, \text{ (З.Бенявски и др.)};$$

$$2) \quad K_f = \frac{d^a}{h^b}, \text{ (Кук, Вагнер и др.)},$$

где d и h – ширина и высота целика соответственно, м; A , B , a и b – константы, полученные при испытании угольных целиков.

Выражения для определения коэффициента формы, полученные З.Бенявски и др. на больших образцах в натуральных условиях, хорошо согласуются с известными выражениями, которые были получены при обработке данных лабораторных испытаний образцов малого размера.

Для такого многообразия выражений для определения влияния формы на несущую способность целиков следует оценить зависимость количества извлекаемых полезных ископаемых от коэффициентов формы разных авторов. Для этого возьмём известную формулу для определения размеров целиков при камерно-столбовой системе разработки, основанную на гипотезе Турнера-Шевякова о том, что вес вышележащей толщи пород равномерно распределяется между целиками [15]:

$$\gamma H n (a + l) (b + l') = ab R_c K_c K_f \quad (1)$$

где a и b – ширина и длина целика, м; l и l' – ширина камеры и сбойки, м; γ –

объёмный вес вышележащих пород, кг/м³; H – глубина от поверхности до кровли камеры, м; R_c – предел прочности породы целика на одноосное сжатие, кг/см²; n – коэффициент запаса прочности; K_c – коэффициент структурного ослабления; K_f – коэффициент формы.

Применим (1) к горно-геологическим условиям Артёмовского месторождения гипса [16]: глубина залегания – 100 м, мощность пласта – 25 м, угол залегания – 3-7°. Зададимся параметрами камерно-столбовой системы разработки исходя из следующих соображений. Мощность защитной пачки гипса в потолочине – 5,5 м, в почве – 1,0-1,5 м. Шириной камеры невозможно варьировать, так как она принимается предельно возможной (на Артёмовской гипсовой шахте – 8 м). Длина целика из технологических соображений принимается равной 30 м. Получаем следующие параметры: $h=18$ м, $b=30$ м, $l=l'=8$ м, $\gamma=2200$ кг/м³, $H=100$ м, $n=3$, $R_c=230$ кг/см², $K_c=0,9$.

Изменение коэффициента извлечения определяем вариацией ширины целика в зависимости от коэффициентов формы разных авторов. Для определения изменения значения ширины целика a необходимо решить уравнение (1) для каждого выражения коэффициента формы целика.

Решение уравнения (1) удобнее графически находим с помощью значений функций вида:

$$A = f_1(a) = \frac{\gamma H n (a+l)(b+l')}{ab R_c K_c}, \quad (2)$$

$$A = f_2(a) = K_f(a), \quad (3)$$

предварительно задавая ширину опорного целика a .
Для нашего случая имеем:

$$f_1(a) = 0,4 \frac{(a+8)}{a}.$$

Решения уравнения (3) дают искомые величины ширины целика для различных выражений коэффициентов формы, которые занесены в таблицу 1.

Из табл. 1 видно, что максимальная ширина целика равная 12 м образуется при использовании коэффициента формы по Ерофееву. Сравнив это значение с другими получаем, что при изменении коэффициента формы в диапазоне от 0,66 до 0,9 ширина целика изменяется от 53 до 100%.

Важнейшей характеристикой разработки полезных ископаемых является коэффициент извлечения. Для камерно-столбовой системы разработки без учёта защитных пачек полезного ископаемого в почве и потолочине имеем следующее выражение коэффициента извлечения полезного ископаемого K_i :

$$K_i = \frac{S-s}{S} = 1 - \frac{s}{S} = 1 - \frac{ab}{(a+l)(b+l')}, \quad (4)$$

где s – площадь оставляемого целика; S – площадь шахтного поля, приходящаяся на целик.

Таблица 1 – Некоторые параметры камерно-столбовой системы разработки в зависимости от выражений коэффициента формы разных авторов

Автор	Выражение коэффициента формы	Входящие параметры	Ширина целика a , м	Относительная ширина целика	Значение коэффициента формы A	Коэффициент извлечения K_i
Церн	$K = \sqrt{\frac{a}{h}}$	a – ширина образца h – высота образца	9,65	0,80	0,732	0,45
Г.Т.Нестеренко	$K = 1,15 - 0,15 \frac{h}{a}$	–	7,9	0,66	0,807	0,50
А.Н.Шашенко	$K = 1,02 + 0,11 \ln \frac{a}{h}$	–	6,4	0,53	0,898	0,55
Б.М.Усаченко	$K = \frac{1,88 - 0,21 \frac{h}{a}}{0,67 \frac{h}{a} + 1}$	–	10,45	0,87	0,706	0,43
Баушингер	$K = 0,775 + 0,222 \frac{a}{h}$	–	6,95	0,58	0,86	0,53
Бантинг	$K = 0,7 + 0,3 \frac{a}{h}$	–	7,5	0,63	0,825	0,52
А.Ж.Машанов	$K = \sqrt{\frac{a}{h} \operatorname{tg} \Theta}$	Θ – угол наклона сколовых систем	7,3	0,61	0,838	0,52
Н.П.Ерофеев	$K = 1 - \frac{m_1 a}{\pi d}$, $m_1 = \frac{\mu}{\mu - 1}$	μ – коэффициент Пуассона	12	1,00	0,666	0,40
З.Т.Бенявски	$K = 0,64 + 0,36 \frac{a}{h}$	–	8	0,67	0,8	0,50
Саламон, Монро	$K = \left(\frac{a}{h}\right)^{0,46}$	–	9,4	0,78	0,74	0,46
ВНИИСоль	$K = \frac{0,21 \frac{h}{a} + 0,79}{0,7 \frac{h}{a} + 0,28}$	–	9,45	0,79	0,738	0,46
А.Р.Серая	$K = \frac{0,44 \frac{h}{a} + 0,32}{0,9 \frac{h}{a} - 0,14}$	–	9,5	0,79	0,736	0,46

С учётом (4) функцию (2) можно представить в виде:

$$f_1(a) = \frac{\gamma H n}{(1 - K_i) R_c K_c}. \quad (5)$$

Отсюда коэффициент извлечения

$$K_i = 1 - \frac{\gamma H n}{R_c K_c f_1(a)}. \quad (6)$$

Для рассматриваемого случая имеем:

$$K_i = 1 - \frac{0,4}{A},$$

где A – значение функций (2) и (3) при их равенстве, т.е. $f_1(a) = f_2(a)$.

Значения коэффициента извлечения без учёта потерь в почве и потолочине для коэффициентов формы разных авторов показаны в таблице 1.

Анализ результатов вычисления показывает, что при изменении значений коэффициента формы, обусловленном применением выражений разных авторов, коэффициент извлечения изменяется от 0,4 до 0,55.

Из всего выше сказанного сделаны следующие выводы:

1. Коэффициент формы – важнейшая характеристика, входящая в аналитический расчёт параметров камерно-столбовых систем разработки и определяется выражением $K_f = f\left(\frac{h}{a}\right)$.

2. На распределение нормальных напряжений и характер разрушения в однородных целиках существенно влияет отношение вертикального размера целика к горизонтальному.

3. Для различных пород с изменением отношения вертикального размера образца к горизонтальному изменение прочности проявляется по-разному.

4. Вариация K_f вызывает вариацию параметров камерно-столбовой системы разработки в пределах 50-100%, а также вариацию приведенного коэффициента извлечения в диапазоне 0,4-0,55.

Несмотря на то, что в литературе имеется большое число испытаний для определения коэффициента формы, крайне важным является определение коэффициента формы для сложноструктурных элементов конструкции камерно-столбовых систем разработки, имеющих различную геометрическую форму.

Будущее направление исследований необходимо сосредоточить на изучении влияния формы на несущую способность сложноструктурных целиков, имеющих как неоднородное строение, так и сложную геометрическую форму, при лабораторных испытаниях на моделях из эквивалентных материалов и при

компьютерном моделировании с привлечением численных методов, таких как метод конечных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат, 1947.
2. Руппенейт К.В. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат, 1956. –
3. Свойства горных пород и методы их определения / Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
4. Трумбачёв В.Ф., Мельников Е.А. Распределение напряжений в междукамерных целиках и потолочинах. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 106 с.
5. Трумбачёв В.Ф., Мельников Е.А. Исследование влияния мелких прослоек на напряжённое состояние междукамерных целиков и потолочин // Методы определения размеров опорных целиков и потолочин. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 133-139.
6. Zern E.N. Coal Miners' Pocketbook. McGraw – Hill Book Co, New-York, 1928.
7. ГОСТ 21153.2-84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. Взамен ГОСТ 21153.2-75; введ. 19.06.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 10 с.
8. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П. Расчёт несущих элементов подземных сооружений. – К.: Наук. дум-ка, 2001. – 168 с.
9. Методы расчёта целиков и потолочин камер рудных месторождений / А.М. Ильштейн, Ю.М. Либерман, Е.А. Мельников и др. – М.: Наука, 1964. – 141 с.
10. Ерофеев Н.П. Прогнозирование устойчивости горных выработок. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1977. – 81 с.
11. Усаченко Б.М. Геомеханические основы технологии подземной разработки месторождений гипса и охраны выработанных пространств. Автореф. дис. ...докт. техн. наук. – Днепропетровск, 1986. – 31 с.
12. Методика определения параметров системы разработки / согласно научно-исследовательской работе по теме №21 ВНИИСоль / для условий Артёмовской гипсовой шахты.
13. Серая А.Р., Левицкий П.Д., Щёголь А.С. Исследование прочностных свойств каменной соли Илецкого и Солотвинского месторождений / Техника и технология добычи и переработки каменной соли // Труды ВНИИСоль. – Артёмовск, 1971. – Выпуск 17 (25). – С. 25-30.
14. Бенявски З. Управление горным давлением: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 254 с.
15. Шевяков Л.Д. О расчёте прочных размеров и деформаций опорных целиков // Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук. – 1941. – №7, 8. – С. 3-13.
16. Усаченко Б.М. Геомеханика подземной добычи гипса. – К., Наук. дум-ка, 1986. – 216 с.
17. Слесарев В.Д. Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. – М.: Углетехиздат, 1984. – 196 с.

УДК 622.411.332:533.17

В.В. Круковская

К РАСЧЕТУ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТОЙ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Дано огляд методів розрахунку фільтрації метану навколо гірських виробок. Приводиться їхній короткий опис. Розглянуто умови й області їх ефективного застосування.

TO CALCULATION OF GAS FILTRATION IN THE CRACK-POROUS NON-UNIFORM ENVIRONMENT

Methods of calculation of methane filtration around of excavation are analyzed. Their brief description is resulted. Conditions and areas of their of their effective application are considered.

При решении различных задач, связанных с проблемами метановыделения в угольных шахтах, дегазации и добычи метана из газосодержащих пород угленосного массива в зоне влияния очистной выработки, необходимо знать границы области фильтрации метана и характер его движения в этой области.