

УДК 622.272: 516.02

С.В. Черданцев, С.Н. Рогозин

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВОЙ КРЕПИ НА РАЗМЕРЫ ЗОН НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ МАССИВА ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

При проектировании и строительстве горных выработок важнейшей является проблема их устойчивости\*. Выработка считается устойчивой, если за ее контуром не образуются зоны нарушения сплошности (ЗНС) окружающего массива, представляющие собой некоторые области вокруг выработки, в которых произошло разрушение пород.

Если выработка сооружается в слабых породах или в породах средней прочности, но на большой глубине, то размеры ЗНС могут быть достаточно большими и выработка теряет устойчивость, вследствие чего происходит обрушение пород. По данным многочисленных исследований выработки, сооружаемые на глубине более 400м на угольных шахтах, как правило, неустойчивы, а основным мероприятием по обеспечению их устойчивости является крепление [1]. Отметим, что традиционные типы крепей (деревянные, металлические, монолитные бетонные и железобетонные, тюбинговые и блочные), как правило, на процесс формирования ЗНС не влияют, поскольку не создают реактивного отпора.

Дополнительно к существующим техническим

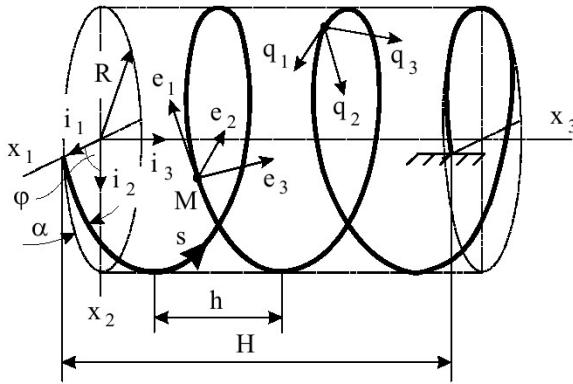


Рис. 1. Геометрические параметры винтовой крепи

решениям крепления горных выработок в России в конце прошлого века появилась идея использования винтовых крепей (спиральных, пружинных и т.д.) [2 – 8]. В отличие от традиционных типов крепей, винтовая крепь, представляющая собой цилиндрическую пружину (рис. 1), обладает естественной податливостью, которая является ее внутренним качеством без каких-либо конструк-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-08-33470).

тивных мероприятий.

Еще одна особенность винтовой крепи проявляется в том, что она способна «активно» влиять на напряженно - деформированное состояние массива, если ее устанавливать в выработке не в естественном состоянии, а предварительно обжатой по боковой поверхности. Стремясь восстановить свои первоначальные размеры, крепь создает отпор на окружающий массив. Регулируя величину обжатия крепи и изменяя ее параметры можно изменять величину реактивного отпора крепи и, тем самым, управлять состоянием массива вокруг выработки.

Модель взаимодействия винтовой крепи с массивом горных пород, представленным моделью однородной, изотропной, линейно деформируемой среды, построена на базе интегрального уравнения теории потенциала [9], имеющего вид

$$\frac{1}{2} \vec{a}(Q_0) - \iint_S \Phi(Q_0, M_0) \cdot \vec{a}(M_0) dS = T^\infty \vec{n}(Q_0) - \vec{F}(Q_0), \quad (1)$$

где  $\vec{a}(Q_0)$  – вектор плотности, подлежащий определению;  $\vec{F}(Q_0)$  – реактивный отпор крепи на окружающий массив;  $T^\infty$  – тензор напряжения на бесконечности;  $Q_0$  и  $M_0$  – произвольные точки, принадлежащие поверхности выработки, площадь которой  $S$ ;  $\vec{n}(Q_0)$  – единичный вектор внешней к поверхности выработки нормали в точке  $Q_0$ ;  $\Phi(Q_0, M_0)$  – «силовой» тензор влияния, определяемый зависимостью [9]

$$\Phi(Q_0, M_0) = \frac{1-2\nu}{8\pi(1-\nu)r^3} \times \left[ x_q n_m - n_q x_m + \left( \delta_{qm} + \frac{3x_q x_m}{(1-2\nu)r^2} \right) n_t x_t \right], \quad (2)$$

в которой  $\nu$  – коэффициент Пуассона пород массива,  $\delta_{mt}$ ,  $\delta_{qt}$ ,  $\delta_{qm}$  – символы Кронекера;  $x_q$ ,  $x_m$ ,  $x_t$  – координаты точки  $M_0$  относительно точки  $Q_0$ ; индексы  $q$ ,  $m$ ,  $t$  = 1, 2, 3 означают номера координатных осей;  $r$  – расстояние между точками  $Q_0$  и  $M_0$ .

Отметим, что интегральное уравнение (1) неоднородное, так как его правая часть содержит два вектора. Первый вектор определяется тензором напряжения на бесконечности, а второй  $\vec{F}(Q_0)$  – является реактивным отпором крепи, отражающим ее деформационные свойства, учитывать которые следует только в том случае, если крепь перед ус-

тановкой в выработку предварительно обжата.

Реактивный отпор, создаваемый предварительно обжатой винтовой крепью имеет две составляющих  $\bar{F}_1(Q_0)$  и  $\bar{F}_2(Q_0)$ , направленных соответственно вдоль осевой линии крепи и вдоль ее главной нормали и определяемых по формулам [6]

$$\bar{F}_1(Q_0) = f\bar{F}_2(Q_0), \quad \bar{F}_2(Q_0) = \frac{\bar{q}_2 0,1 \bar{d}^4 G}{2\pi \operatorname{tg}\alpha \gamma H}, \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент трения крепи о массив,  $\bar{d} = d/R$  – безразмерный диаметр поперечного сечения крепи,  $G$  – модуль сдвига материала крепи,  $\alpha$  – угол подъема осевой линии крепи;  $\gamma$  – объемный вес пород массива;  $H$  – глубина расположения выработки.

Входящая в формулу (4) функция  $\bar{q}_2$  представляет собой безразмерный погонный отпор предварительно обжатой винтовой крепи, определяемый по формуле [4]

$$\bar{q}_2 = \frac{A_{11}}{R^3} (\bar{\kappa}_{10} + \bar{M}_1) \bar{Q}_3 e^{-k(\bar{s}-0,5\bar{l})}, \quad (4)$$

где

$$\bar{Q}_3 = \bar{\kappa}_{30} \bar{M}_1 - m \bar{\kappa}_{10} M_3 + \bar{M}_1 \bar{M}_3 (1-m) \quad (5)$$

является перерезывающей силой, действующей вдоль бинормали осевой линии крепи, а

$$\bar{M}_1 = \bar{\kappa}_{10} \cos \vartheta_2 - \bar{\kappa}_{30} \sin \vartheta_2 - \bar{\kappa}_{10}, \quad (6)$$

$$\bar{M}_3 = \bar{\kappa}_{10} \sin \vartheta_2 + \bar{\kappa}_{30} \cos \vartheta_2 - \bar{\kappa}_{30}$$

соответственно крутящий и изгибающий моменты в произвольном сечении крепи.

В формулах (4) – (6) приняты следующие обозначения:  $\bar{s} = s/R$  – безразмерная координата (рис. 1);  $l$  – длина осевой линии крепи;  $\bar{\kappa}_{10} = \sin \alpha \cos \alpha$ ,  $\bar{\kappa}_{30} = \cos^2 \alpha$  – безразмерные кручение и кривизна осевой линии крепи;  $A_{11}$ ,  $A_{33}$  – жесткости поперечного сечения крепи соответственно на кручение и изгиб;  $m = A_{33}/A_{11}$ , коэффициенты  $k$  и  $\lambda$  определяются как

$$k = \frac{f}{\bar{\lambda}} (\bar{\kappa}_{30} + \bar{M}_3), \quad \bar{\lambda} = \cos \alpha.$$

Угол поворота  $\vartheta_2$  относительно главной нормали, входящий в формулы (6) определяется из квадратного уравнения [4]

$$\operatorname{tg}^2 \vartheta_2 - a \operatorname{tg} \vartheta_2 + b = 0, \quad (7)$$

в котором

$$a = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{(1-\bar{u}_2)^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad b = \frac{(1-\bar{u}_2)^2 - 1}{(1-\bar{u}_2)^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha}.$$

Уравнение (7) имеет два корня, один из которых (отрицательный) соответствует правой навивке винтовой крепи ( $\kappa_{10} > 0$ ), а другой (положительный) – отвечает левой навивке ( $\kappa_{10} < 0$ ). В дальнейшем рассматривается крепь с правой на-

вивкой.

Для решения интегрального уравнения (1) использован приближенный метод Крылова–Боголюбова, подробно описанный в [10] и систематически использованный в [11]. ЗНС вокруг выработки определяются как совокупность точек, в которых произошло разрушение пород согласно критерию прочности Мора [1]

$$\tau_n = K + \sigma_n \operatorname{tg} \phi,$$

где  $\tau_n$ ,  $\sigma_n$  – касательное и нормальное напряжения на площадке с нормалью  $n$ , на которой происходит разрушение пород;  $K$  – коэффициент сцепления,  $\phi$  – угол внутреннего трения пород.

На рис. 2а показаны ЗНС (в виде затемненных областей) вокруг незакрепленной выработки, а на рис. 2б – вокруг выработки, закрепленной предварительно обжатой на  $u_2=0,1$  винтовой крепью,

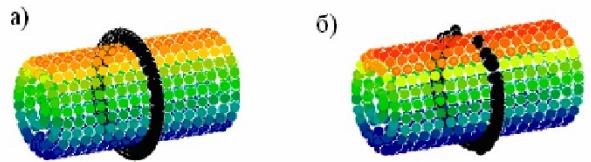


Рис. 2. Зоны нарушения сплошности вокруг незакрепленной (а) и закрепленной (б) выработки

диаметр поперечного сечения которой  $\bar{d} = 0,1$ , а угол подъема витков  $\alpha = 5^\circ$ . В обоих случаях выработка пройдены на глубине  $H = 400$  м в изотропном массиве, коэффициент сцепления пород которого равен  $K = 0,25 \gamma H$ , а угол внутреннего трения  $\phi = 20^\circ$ .

Из рис. 2 видно, что ЗНС вокруг незакрепленной выработки представляет собой симметричную фигуру, ограниченную внешним круговым контуром и контуром выработки, а вокруг закрепленной выработки ЗНС имеет вид подковы, симметричной относительно вертикали, разомкнутые концы которой расположены в своде выработки.

Влияние винтовой крепи на процесс образования

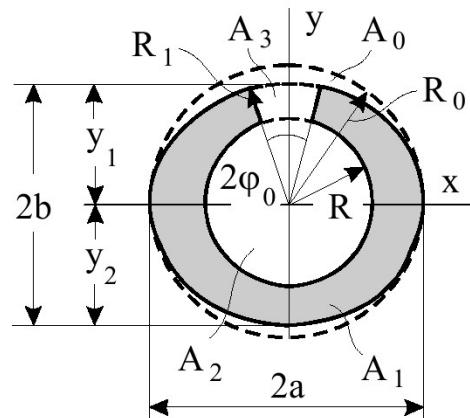


Рис. 3. К определению площади ЗНС вокруг выработки

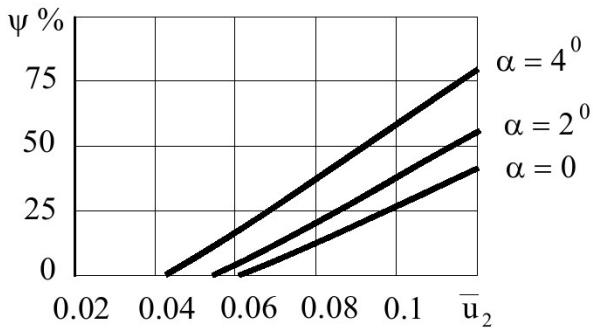


Рис. 4. Зависимости параметра  $\psi$  от величины обжатия крепи  $u_2$

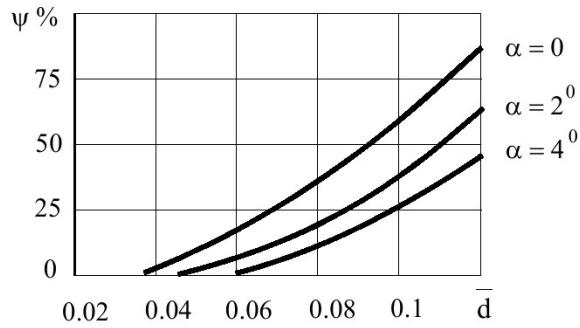


Рис. 5. Зависимости параметра  $\psi$  от диаметра крепи  $\bar{d}$

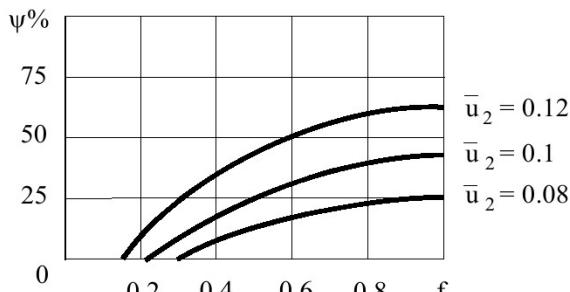


Рис. 6. Зависимости параметра  $\psi$  от коэффициента трения  $f$  крепи о породный массив

ния ЗНС вокруг выработки оценим параметром  $\psi$ , определяемым как

$$\psi = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100\%, \quad (8)$$

в котором  $A_0$  и  $A$  – площади ЗНС соответственно вокруг незакрепленной и закрепленной винтовой крепью выработки, определяемые как (рис. 3).

$$A_0 = \pi(R_0^2 - R^2), A = A_1 - A_2 - A_3,$$

где

$$A_1 = \pi ab, A_2 = \pi R^2, A_3 = \varphi_0(R_1^2 - R^2),$$

$$b = \frac{R_1 - y_2}{2}, R_1 = \frac{y_1}{\cos \varphi_0}.$$

Из формулы (8) вытекает, что параметр  $\psi$  может изменяться от нуля – когда размеры ЗНС вокруг незакрепленной и закрепленной выработки одинаковы, до 100% – если ЗНС вокруг выработки с винтовой крепью отсутствуют. В частности, в приведенном на рис. 2 примере снижение размера ЗНС составляет  $\psi = 27,48\%$ .

Формулы (3) – (7) показывают, что величина

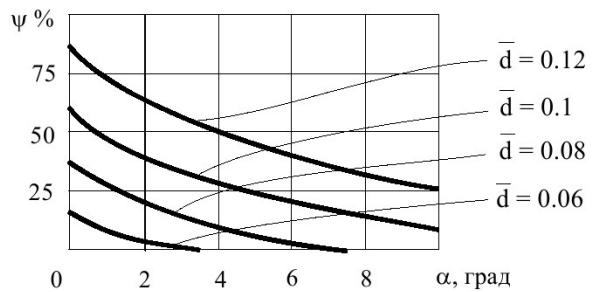


Рис. 7. Зависимости параметра  $\psi$  от угла подъема  $\alpha$  осевой линии винтовой крепи

отпора винтовой крепи зависит от величины ее обжатия, диаметра поперечного сечения крепи, угла подъема ее осевой линии и коэффициента трения о породный массив. Изменяя эти параметры можно изменять величину реактивного отпора крепи, а, следовательно, и размеры ЗНС, что отражено на графиках рис. 4 – 7, анализ которых позволяет сделать следующий выводы:

- с ростом предварительного обжатия винтовой крепи параметр  $\psi$ , характеризующий уменьшение относительной площади ЗНС (по сравнению с незакрепленной выработкой) увеличивается линейно (рис. 4);

- с увеличением диаметра поперечного сечения крепи и коэффициента трения о массив горных пород параметр  $\psi$  увеличивается нелинейно (рис. 5, 6);

- рост угла подъема осевой линии крепи сопровождается снижением параметра  $\psi$  по нелинейной зависимости (рис. 7).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1992. – 544 с.
2. Эллер А.Ф., Горбунов В.Ф., Аксёнов В.В. Винтоворотные проходческие агрегаты. – ВО Наука Новосибирск. – 1992. – 192 с.
3. Черданцев С.В. Цилиндрическая пружина как возможный вариант крепи горных выработок. // Со-

вершенствование технологии строительства горных предприятий. Кемерово: КузГТУ, 1997. – С. 151 – 155.

4. Черданцев С.В., Кучер Н.А., Рогозин С.Н. Краевые задачи о равновесии обжатого винтового стержня. – Кемерово: КузГТУ, 2003. – 204 с.

5. Черданцев С.В. Определение параметров винтовой крепи в условиях ее совместного деформирования с массивом горных пород. // Вест. КузГТУ. – 2004. – № 5. – С. 5–9.

6. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. О влиянии предварительно обжатой пружины на зону нарушения сплошности вокруг цилиндрической полости. // ПМТФ. – 2005. – № 3. – С. 141 – 148.

7. Черданцев С.В. Крепь для горных выработок // Патент на полезную модель № 57827; опубл. 27.10.2006, Бюл. № 30. – 1 с.:ил.

8. Игнатов Е.В., Игнатов И.Е. Разработка технологических требований и конструкции механизма ручного возведения пружинной крепи. // Вест. КузГТУ. – 2001. – № 1. – С. 53 – 56.

9. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.

10. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближенные методы высшего анализа. 5-е изд. М., Л.: Физматгиз, 1962. – 708 с.

11. Черданцев Н.В., Изаксон В.Ю. Некоторые трехмерные и плоские задачи геомеханики. – Кемерово: КузГТУ, 2004. – 189 с.

□ Авторы статьи:

Черданцев

Сергей Васильевич

– канд.техн. наук, доц. каф. строительства подземных сооружений и шахт

Рогозин

Сергей Николаевич

– канд. техн. наук, доц. каф. технической механики и упаковочных технологий Кемеровского технологического института пищевой промышленности