

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-3-75-81

УДК 622.831

РАСЧЕТ КРЕПИ С УЧЕТОМ ТАМПОНАЖА ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА

CALCULATION OF THE SUPPORT WITH FILLING OF THE SPACE BEHIND THE SUPPORT

Тациенко Виктор Прокопьевич,
доктор техн. наук, e-mail: ipeb@kuzstu.ru
Victor P. Tatsienko, Dr. Sc. in Engineering

Гоголин Вячеслав Анатольевич,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: gva.py@kuzstu.ru
Vyacheslav A. Gogolin, Dr. Sc. in Engineering

Ермакова Инна Алексеевна,
доктор техн. наук, профессор, e-mail: cia.pm@kuzstu.ru
Inna A. Ermakova, Dr. Sc. in Engineering

Лесин Юрий Васильевич,
доктор техн. наук, профессор,
Yury V. Lesin, Dr. Sc. in Engineering

Лисковец Александр Сергеевич,
старший научный сотрудник, e-mail: promsnab_kmr@mail.ru
Alexander S. Liskovets, senior research scientist

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация:

В работе впервые рассчитывается напряженно-деформированное состояние системы «крепь – тампонажный слой – массив горных пород». Поведение массива горных пород описывается с учетом образования зоны нарушенных горных пород. Использован критерий прочности горных пород при объемном сжатии, который позволил выделить зону нарушенных горных пород. Приведено уравнение гиперболической зависимости окружных напряжений и деформаций в этой зоне. С учетом пропорциональности окружных и радиальных напряжений в этой зоне получено решение уравнений равновесия для этих напряжений. С учетом непрерывности радиальных смещений и радиальных напряжений на границах кольцевых блоков «крепь – тампонажный слой – нарушенные породы – массив ненарушенных пород» получены уравнения для расчета давления на крепь и смещений верхняка. Проверяется прочность крепи по критерию Мора и прочность тампонажного слоя по критерию разрушения при объемном сжатии. Приводятся критерии образования зоны нарушенных горных пород, учитывающий глубину разработки и прочность пород на сжатие. Разработанная методика позволяет рассчитать давление на крепь и смещение верхняка в зависимости от ширины тампонажного слоя и его модуля деформаций.

Ключевые слова: крепь, тампонажный слой, давление на крепь, смещение верхняка.

Abstract:

In the article, the calculation of the stress-strain state of the system «support – filling layer – rock mass» is shown for the first time. The behavior of the rock mass is described taking into account the formation of a zone of disturbed rocks. The strength criterion of rocks with bulk compression is used to highlight the zone of disturbed

rocks. The equation of the hyperbolic dependence between circumferential stresses and deformations in the zone of disturbed rocks is given. The solution of the equilibrium equations is obtained taking into account the proportionality of the circumferential and radial stresses in this zone. The equations for calculating the pressure on the lining and the displacements of the upper member were obtained taking into account the continuity of radial displacements and radial stresses at the boundaries of the ring blocks «support – filling layer – disturbed rocks – an array of undisturbed rocks». The strength of the support is checked by the criterion of More, the strength of the filling layer is checked by the criterion of failure under bulk compression. The criterion for the formation of a zone of disturbed rocks has been developed and takes into account the depth of development and the compressive strength of rocks. The developed method allows to calculate the pressure on the support and displacement of the roof girder depending on the width of the filling layer and its deformation modulus.

Key words: support, filling layer, pressure on support, displacement of the roof girder.

Проблема расчета рамных крепей в настоящее время не является полностью решенной. Для решения данной проблемы использовались различные методы: инженерные эмпирические методы и методы строительной механики [1–4], аналитические методы теории упругости [5, 6], численные методы геомеханики [7, 8]. В работах [9, 10] сделана попытка оценки несущей способности крепи с тампонажем закрепного пространства. Общие подходы к решению проблемы расчета крепи изложены в [11–14]. В данной работе предлагается комплексный подход к расчету крепи с тампонажем закрепного пространства, учитывающий результаты стендовых испытаний крепей, численное моделирование этих испытаний [15] и аналитические расчеты взаимодействия геомеханической системы «крепь – тампонажный слой – слой нарушенных пород – массив ненарушенных горных пород».

1. Напряженно-деформированное состояние крепи

Распределение радиальных и окружных напряжений крепи получено в работе [15] и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = \frac{q \cdot R_1^2}{R_1^2 - R^2} - \frac{R^2 \cdot R_1^2 \cdot q}{R_1^2 - R^2} \cdot \frac{1}{r^2}; \\ \sigma_\theta(r) = \frac{q \cdot R_1^2}{R_1^2 - R^2} + \frac{R^2 \cdot R_1^2 \cdot q}{R_1^2 - R^2} \cdot \frac{1}{r^2}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь R , R_1 – внутренний и внешний радиус крепи, r – расстояние от центра выработки, q – давление на крепь со стороны тампонажного слоя.

Напряжения на внутренней поверхности крепи при $r = R$ находятся из выражений (1).

$$\begin{cases} \sigma_r(R) = 0; \\ \sigma_\theta(R) = \frac{2 \cdot q \cdot R_1^2}{R_1^2 - R^2}. \end{cases} \quad (2)$$

Смещение (прогиб) верхняка крепи вычисляется как

$$u(R) = \frac{1}{E_k} \cdot \frac{q \cdot R^2}{h_k}, \quad (3)$$

где E_k – модуль деформации материала крепи, h_k – высота профиля крепи.

2. Напряженно-деформированное состояние тампонажного слоя

Распределение напряжений в тампонажном слое описывается выражениями (1) с учетом следующих граничных условий.

Давление на тампонажный слой со стороны крепи равно давлению на крепь $p_1 = q$, давление на тампонажный слой со стороны нарушенных пород равно p_t .

Тогда уравнения (1) принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = \frac{p_t \cdot R_t^2 - q \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - \frac{R_t^2 \cdot R_1^2 \cdot (p_t - q)}{R_t^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{r^2}; \\ \sigma_\theta(r) = \frac{p_t \cdot R_t^2 - q \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} + \frac{R_t^2 \cdot R_1^2 \cdot (p_t - q)}{R_t^2 - R_1^2} \cdot \frac{1}{r^2}, \end{cases} \quad (4)$$

Здесь R_1 и R_t – внутренний и внешний радиус тампонажного слоя.

Напряжения на внутренней поверхности тампонажного слоя определяются из (4) при $r = R_1$ и равны:

$$\begin{cases} \sigma_r(R_1) = q; \\ \sigma_\theta(R_1) = \frac{2 \cdot p_t \cdot R_t^2 - q \cdot (R_t^2 + R_1^2)}{R_t^2 - R_1^2}. \end{cases}$$

Напряжения на внешней поверхности тампонажного слоя определяются из (4) при $r = R_t$ и равны:

$$\begin{cases} \sigma_r(R_t) = p_t; \\ \sigma_\theta(R_t) = \frac{p_t \cdot (R_t^2 + R_1^2) - 2 \cdot q \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2}. \end{cases}$$

Окружная деформация тампонажного камня для осесимметричного плоскодеформированного состояния рассчитывается как:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E_t} \cdot (\sigma_\theta \cdot (1 - \nu_t^2) - (\nu_t + \nu_t^2) \cdot \sigma_r), \quad (5)$$

где E_t – модуль линейных деформаций; ν_t – коэффициент поперечных деформаций тампонажного камня.

Подставляя выражения для напряжений (4) в (5), с учетом малости ν_t^2 , получаем радиальное смещение тампонажного камня на крепь

$$u(R_1) = \varepsilon_\theta(R_1) \cdot R_1 = \frac{R_1}{E_t} \cdot \left[\frac{2 \cdot p_t \cdot R_t^2 - q \cdot (R_t^2 + R_1^2)}{R_t^2 - R_1^2} - \nu_t \cdot q \right]. \quad (6)$$

Аналогично находится радиальное смещение тампонажного камня со стороны нарушенного слоя пород:

$$u(R_t) = \varepsilon_\theta(R_t) \cdot R_t = \frac{R_t}{E_t} \cdot \left[\frac{p_t \cdot (R_t^2 + R_1^2) - 2 \cdot q \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - \nu_t \cdot p_t \right].$$

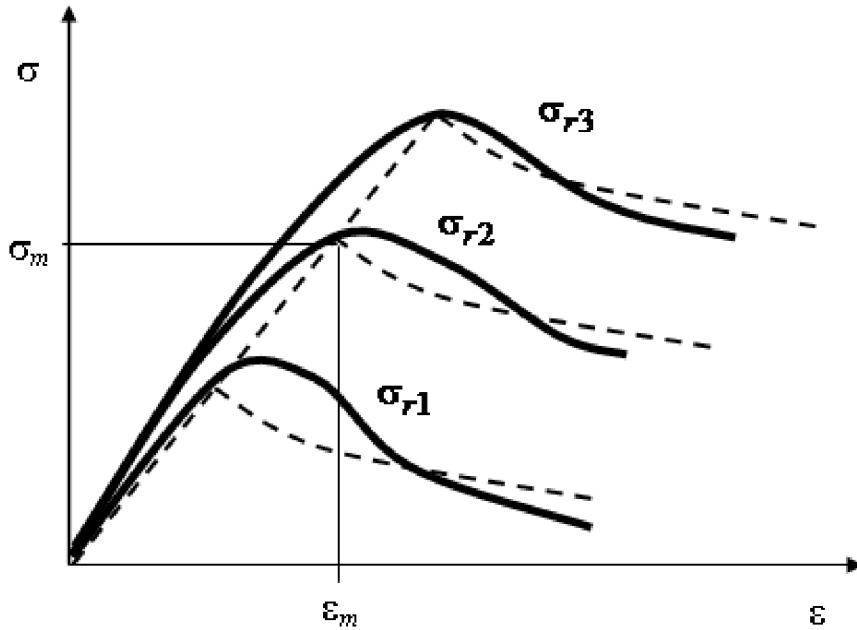


Рис. 1. Диаграммы объемного сжатия горных пород: экспериментальные кривые – сплошные линии; теоретические кривые – пунктирные линии; $\sigma_{r1} < \sigma_{r2} < \sigma_{r3}$
Fig. 1. Volumetric compression diagrams of rocks: experimental curves - solid lines; theoretical curves - dashed lines; $\sigma_{r1} < \sigma_{r2} < \sigma_{r3}$

$$v_t \cdot p_t]. \quad (7)$$

Приравняв радиальные смещения на границе крепь – тампонажный слой, из уравнений (5) и (7) получаем соотношение давлений на крепь и на тампонажный слой:

$$p_t = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{E_t \cdot R \cdot (R_t^2 - R_1^2)}{E_k \cdot h_k \cdot R_t^2} + \frac{R_t^2 + R_1^2}{R_t^2} + v_t \cdot \frac{R_t^2 - R_1^2}{R_t^2} \right] \cdot q, \quad (8)$$

или $p_t = \beta \cdot q$, где $\beta = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{E_t \cdot R \cdot (R_t^2 - R_1^2)}{E_k \cdot h_k \cdot R_t^2} + \frac{R_t^2 + R_1^2}{R_t^2} + v_t \cdot \frac{R_t^2 - R_1^2}{R_t^2} \right]. \quad (9)$

Для определения необходимой прочности тампонажного камня используется критерий прочности горных пород при объемном сжатии [16]:

$$\sigma_\theta(r) = \frac{1 - v_t}{v_t} \sigma_r(r) + \frac{\sigma_{сж}}{1 + v_t}.$$

На границе тампонажного слоя с крепью минимальная прочность на сжатие тампонажного камня с учетом граничных значений напряжений определяется как:

$$\sigma_{сж}^t(R_1) = (1 + v_t) \cdot \left[\frac{(2 \cdot \beta - 1) \cdot R_t^2 - R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - c_t \right] \cdot q. \quad (10)$$

Здесь $c_t = (1 - v_t)/v_t$.

Ширина тампонажного слоя $h_t = R_t - R_1$ должна быть такая, чтобы выполнялось следующее условие:

$$\frac{(2 \cdot \beta - 1) \cdot R_t^2 - R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - c_t > 0. \quad (11)$$

При невыполнении условия (11) ограничения

на прочность тампонажного камня не предусматриваются.

На границе тампонажного слоя с породой соотношения на прочность тампонажного камня имеют аналогичный вид:

$$\sigma_{сж}^t(R_t) = (1 + v_t) \cdot \left[\frac{\beta \cdot (R_t^2 + R_1^2) - 2 \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - \beta \cdot c_t \right] \cdot q. \quad (12)$$

$$\frac{\beta \cdot (R_t^2 + R_1^2) - 2 \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - \beta \cdot c_t > 0. \quad (13)$$

При невыполнении условия (13) ограничения на прочность тампонажного камня также не предусматриваются.

Требуемая прочность тампонажного камня равна наибольшему значению прочности из двух найденных (10, 12).

3. Напряженно-деформированное состояние пород

Напряженное состояние ненарушенных и частично разрушенных пород описывается уравнением (1) с граничными условиями равенства радиальных напряжений на границе с тампонажным слоем $\sigma_r(R_t) = p_t$ и напряженным состоянием массива горных пород $\sigma_r(\infty) = \sigma_\theta(\infty) = p$.

В зоне ненарушенных пород решение имеет вид:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = p - \frac{a}{r^2}; \\ \sigma_\theta(r) = p + \frac{a}{r^2}. \end{cases} \quad (14)$$

В зоне частично разрушенных пород окружающие

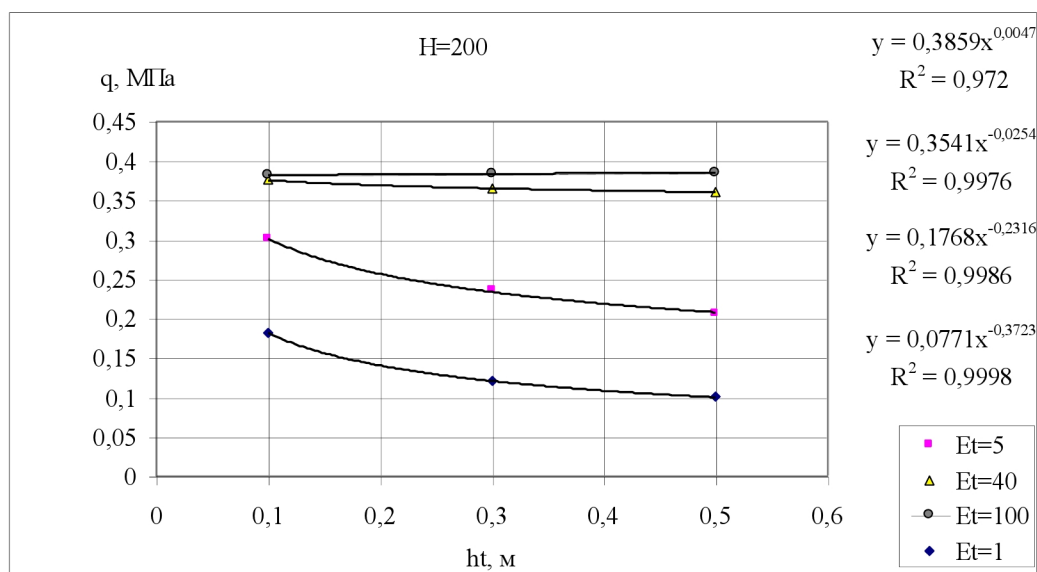


Рис. 2. Закономерности изменения смещений верхняка и от ширины тампонажного слоя h_t
Fig. 2. Patterns of change of the roof girder u to the width of the filling layer h_t

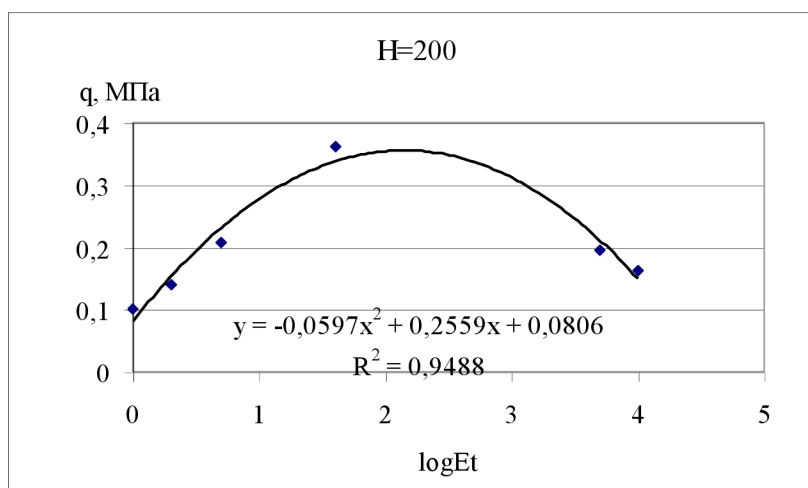


Рис. 3. Закономерность изменения давления на крепь q от модуля деформаций тампонажного слоя E_t
Fig. 3. The pattern of pressure change on the support q from the module of deformations of the filling layer E_t

и радиальные напряжения пропорциональны: $\sigma_\theta = k \cdot \sigma_r$. С учетом этого решение уравнения (1) запишем как:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = p_t \cdot \left(\frac{r}{R_t}\right)^{k-1}; \\ \sigma_\theta(r) = k \cdot p_t \cdot \left(\frac{r}{R_t}\right)^{k-1}. \end{cases} \quad (15)$$

Переход горных пород из ненарушенного состояния в частично разрушенное состояние происходит на расстоянии R_p от центра выработки. На этом расстоянии напряженное состояние горных пород (14) переходит в напряженное состояние (15). На расстоянии R_p от центра выработки происходит потеря прочности горных пород и переход их в запредельное состояние. На рис. 1 показаны диаграммы объемного сжатия «напряжения-деформации», описывающие переход из упругого состояния

горных пород в запредельное (частично разрушенное) состояние. В точках максимума выполняется условие разрушения пород при сжатии [14]:

$$\sigma_\theta(R_p) = \frac{1-\nu}{\nu} \sigma_r(R_p) + \frac{\sigma_{сж}}{1+\nu}. \quad (16)$$

С учетом непрерывности напряжений при $r = R_p$ и критерия прочности (16) были получены значения расчетных величин.

Коэффициент, определяющий распределение напряжений в зоне частично разрушенных пород,

$$k = \frac{2cP + k_c \cdot \sigma_{сж} / (1+\nu)}{2P - k_c \cdot \sigma_{сж} / (1+\nu)}, \quad (17)$$

Радиус зоны разрушенных пород

$$R_p = R_t \cdot \left(\frac{2P}{(k+1)p_t} \right)^{\frac{1}{k-1}}; \quad (18)$$

Коэффициент, определяющий распределение напряжений в зоне ненарушенных пород,

$$a = k \cdot p_t \cdot \frac{R_p^{k+1}}{R_t^{k-1}} - P \cdot R_p^2; \quad (19)$$

Максимальное окружное напряжение вмещающих пород

$$\sigma_m = \frac{2cP + k_c \cdot \sigma_{сж} / (1 + \nu)}{c + 1}, \quad (20)$$

где ν – модуль поперечных деформаций вмещающих пород;

$c = \frac{1 - \nu}{\nu}$ – коэффициент, определяющий величину максимального окружного напряжения;

$\sigma_{сж}$ – прочность образца пород на одноосное сжатие;

k_c – коэффициент структурного ослабления прочности пород на сжатие.

Теоретическая зависимость окружного напряжения от окружной деформации горных пород (см. рис. 1) представлена гиперболической кривой и имеет вид:

$$\begin{cases} \sigma_\theta = E \cdot \varepsilon_\theta, & \varepsilon_\theta < \varepsilon_m; \\ \sigma_\theta = \frac{\sigma_m^2}{E \cdot \varepsilon_\theta}, & \varepsilon_\theta > \varepsilon_m. \end{cases} \quad (21)$$

Из (21) выражаем окружную деформацию без учета малых упругих деформаций пород, получим:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_m^2}{E \cdot \sigma_\theta}.$$

Радиальные смещения частично разрушенных пород на границе с тампонажным слоем выражаются как

$$u(R_t) = \varepsilon_\theta \cdot R_t = \frac{\sigma_m^2 \cdot R_t}{E \cdot k \cdot p_t}. \quad (22)$$

Радиальные смещения со стороны тампонажного слоя имеют вид

$$u(R_t) = \varepsilon_\theta(R_t) \cdot R_t = \frac{R_t}{E_t} \cdot \left[\frac{p_t \cdot (R_t^2 + R_1^2) - 2 \cdot q \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - \nu_t \cdot p_t \right]. \quad (23)$$

Приравнявая эти смещения и учитывая связь давления на тампонажный слой с давлением на крепь, после преобразований получим следующую формулу для расчета давления на крепь:

$$q = \sigma_m \cdot \sqrt{\frac{E_t}{\alpha \cdot k \cdot E}}. \quad (24)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{\beta^2 \cdot (R_t^2 + R_1^2) - 2 \cdot \beta \cdot R_1^2}{R_t^2 - R_1^2} - \nu_t \cdot \beta^2.$$

С учетом упругих деформаций горных пород радиальное смещение пород на границе с тампонажным слоем принимает следующий вид:

$$u(R_t) = \varepsilon_\theta \cdot R_t = \left(\frac{\sigma_m^2}{E \cdot k \cdot p_t} + \frac{\sigma_m}{E} \right) \cdot R_t \quad (25)$$

Приравнявая радиальные смещения со стороны тампонажного слоя (23) и радиальные смещения нарушенных пород (25), получим следующее выражение для нагрузки на крепь:

$$q = \frac{\sigma_m}{2} \cdot \left(\frac{E_t \cdot \beta}{E \cdot \alpha} + \sqrt{\left(\frac{E_t \cdot \beta}{E \cdot \alpha} \right)^2 + \frac{4 \cdot E_t}{E \cdot k \cdot \alpha}} \right). \quad (26)$$

В случае малой глубины проведения выработки или значительной прочности пород

нарушенная зона в массиве горных пород может не образоваться. Горные породы будут оставаться в ненарушенном, упругом состоянии. Этой ситуации соответствует следующее условие, вытекающее из (17):

$$\sigma_{сж} > \frac{2 \cdot P \cdot (1 + \nu)}{k_c} \quad (27)$$

По полученному значению нагрузки на крепь рассчитывается смещение верхняка в соответствии с формулой (3), проверяется прочность крепи по критерию Мора и устанавливается требуемая прочность тампонажного камня по (11, 13).

Полученные формулы позволили рассчитать давление на крепь в зависимости от ширины тампонажного слоя и модуля деформации тампонажного камня. На рисунках 2, 3 приведены результаты расчетов, иллюстрирующие зависимости величины давления на крепь от рассматриваемых факторов. Расчеты проведены при следующих геометрических, деформационных и прочностных параметрах: $H = 200$ м, $R = 2,82$ м, $h_k = 0,14$ м, $h_t = 0,1 \div 0,5$ м, $E = 10^4$ МПа, $\nu = 0,25$, $E_k = 2 \cdot 10^3$ МПа, $\nu_k = 0,2$; $E_t = 1 \div 10^4$ МПа, $\nu_t = 0,25$. Площадь сечения выработки $S = 25$ м².

Приведенное выше обоснование методики расчета крепи и указанные на рис. 2, 3 закономерности изменения давления на крепь в зависимости от ширины тампонажного слоя и его модуля деформации позволяют сделать следующие выводы.

Выводы.

1. Разработана методика расчета крепи, учитывающая взаимодействие блоков «крепь – тампонажный слой – слой нарушенных горных пород – массив ненарушенных горных пород».

2. Переход ненарушенных горных пород в нарушенное состояние определяется критерием прочности пород при объемном сжатии. В области нарушенных пород окружные напряжения пропорциональны радиальным напряжениям и меняются в гиперболической зависимости от окружных деформаций.

3. Наличие в закрепном пространстве тампонажного камня шириной от 0,1 до 0,5 м монотонно уменьшает давление на крепь в рассматриваемом диапазоне модуля деформации тампонажного камня от 1 МПа до 100 МПа.

4. Зависимость давления на крепь от модуля деформации тампонажного камня имеет параболический вид. При увеличении модуля деформации тампонажного камня до 10^3 МПа давление на крепь возрастает. Дальнейшее увеличение жесткости тампонажного слоя приводит к снижению давления на крепь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штумпф Г.Г. Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт / Г. Г. Штумпф, П.В. Егоров, А.И. Петров, Б.В. Красильников М.: Недра, 1996. – 353 с.
2. Основные виды крепления горных выработок и методика расчета технических параметров / А.В. Ремезов, В.Г. Харитонов, Д.Н. Макшанкин, А.Ф. Брынько, В.В. Ермак. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2007. – 306 с.
3. Шаламанов В.А. Расчет крепей горных выработок/ В.А. Шаламанов, В.В. Першин, М.Н. Будников//Учебное пособие для студентов специальности 130406 «Шахтное и подземное строительство». – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 86 с.
4. Карасев В.А. Разработка и обоснование параметров многозвенной спиральной крепи восстающих горных выработок. Дис. к-та техн. наук. – Кемерово, 1998. – 128 с.
5. Клыков А.Е. Дилатансия горных пород и смещения в выработке в зависимости от состояния закрепного пространства // Форум гірників – 2013: матеріали міжнар. конф., 2-5 жовтня 2013 р. – Дніпропетровськ, 2013. – Т.2. – С. 264–271.
6. Деев П.В. Влияние величины технологического зазора на напряженное состояние обделок тоннелей // П.В. Деев, А.С. Саммаль, С.В. Анциферов, Н.В. Шелепов. – Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2018.– №4, с. 287–293.
7. Черданцев С.В. Математическая модель управления процессом формирования зон нарушения сплошности вокруг выработок с винтовой крепью. / С.В. Черданцев // ГИАБ, 2006. – № 11, с. 390–395.
8. Макшанкин Д.Н. Геомеханическое обоснование крепления горных выработок металлической крепью с профилем ШП. Дис. к-та техн наук – Кемерово, 2012. –168 с.
9. Росстальной Е.Б. Лабораторные исследования влияния тампонажа закрепного пространства на несущую способность крепей методом эквивалентных материалов / Е.Б. Росстальной // Вестник КузГТУ. - 2006. - №6.2. - С. 47–49
10. Тациенко В.П. Увеличение несущей способности рамной крепи путем полного заполнения закрепного пространства тампонажным материалом / В.П. Тациенко, А.С. Лисковец, М.В. Саблин // Вестник КузГТУ. - 2018. - №2. - С. 45–52.
11. Brady, B.H., & Brown, E.T. (2013). Rock Mechanics: For Underground Mining. New York: Springer Science & Business Media.
12. Jaeger, J.C., Cook, N.G., & Zimmerman, R. (2009). Fundamentals of Rock Mechanics. Hoboken: John Wiley & Sons.
13. Jing, L. (2003). A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics and Rock Engineering. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(3), 283–353.
14. Hudson, J.A., & Harrison, J.P. (2000). Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. New York: Elsevier.
15. Тациенко В.П. Постановка задачи расчета крепи с тампонажем закрепного пространства / В.П. Тациенко, В.А. Гоголин, И.А. Ермакова, А.С. Лисковец // Вестник КузГТУ, 2019, № 3.
16. Гоголин В.А. Деформационные и прочностные характеристики хрупких горных пород при сжатии/ В.А. Гоголин // Вестник КузГТУ, 2016, № 3. – С. 3–7.

REFERENCES

1. Shtumpf G.G. Gornoe davlenie v podgotovitel'nyh vyrabotkah ugol'nyh shaht / G. G. Shtumpf, P. V. Egorov, A.I. Petrov, B.V. Krasil'nikov M.: Nedra, 1996. – 353 p.
2. Osnovnye vidy krepneniya gornyh vyrabotok i metodika rascheta tekhnicheskikh parametrov / A. V. Remezov, V.G. Haritonov, D.N. Makshankin, A.F. Bryn'ko, V.V. Ermak. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2007. – 306 p.
3. Shalamanov V.A. Raschet krepej gornyh vyrabotok/ V.A. Shalamanov, V.V. Pershin, M.N. Budnikov //Uchebnoe posobie dlya studentov special'nosti 130406 «SHAhtnoe i podzemnoe stroitel'stvo». – Kemerovo: KuzGTU, 2011. – 86 p.
4. Karasev V.A. Razrabotka i obosnovanie parametrov mnogozvennoj spiral'noj krepri vosstayushchih gornyh vyrabotok. Dis. k-ta tekhn. nauk. – Kemerovo, 1998. – 128 p.
5. Klykov A. E. Dilatansiya gornyh porod i smeshcheniya v vyrabotke v zavisimosti ot sostoyaniya zakrepnogo prostranstva // Forum girkiv – 2013: materialy mizhnar. konf., 2-5 zhovtnya 2013 r. – Dnipropetrovs'k, 2013. – Т.2. – pp. 264–271.
6. Deev P.V. Vlyanie velichiny tekhnologicheskogo zazora na napryazhennoe sostoyanie obdelok tonnelej //

P.V. Deev, A.S. Sammal', S.V. Anciferov, N.V. Shelepov. – Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle, 2018. – №4, pp. 287–293.

7. Cherdancev S.V. Matematicheskaya model' upravleniya processom formirovaniya zon narusheniya sploshnosti vokrug vyrabotok s vintovoj krep'yu. / S.V. Cherdancev // GIAB, 2006. – № 11, pp. 390–395.

8. Makshankin D.N. Geomekhanicheskoe obosnovanie krepleniya gornyh vyrabotok metallicheskoj krep'yu s profilem SHP. Dis. k-ta tekhn nauk – Kemerovo, 2012. –168 p.

9. Rosstal'noj E.B. Laboratornye issledovaniya vliyaniya tamponazha zakrepnogo prostranstva na nesushchuyu sposobnost' krepej metodom ekvivalentnyh materialov / E.B. Rosstal'noj // Vestnik KuzGTU. - 2006. - №6.2. - С. 47–49

10. Tacienko V.P. Uvelechenie nesushchej sposobnosti ramnoj krep'i putem polnogo zapolneniya zakrepnogo prostranstva tamponazhnym materialom / V.P Tacienko., A.S. Liskovec, M.V. Sablin // Vestnik KuzGTU, 2018 – №2. – С. 45–52.

11. Brady, B.H., & Brown, E.T. (2013). Rock Mechanics: For Underground Mining. New York: Springer Science & Business Media.

12. Jaeger, J.C., Cook, N.G., & Zimmerman, R. (2009). Fundamentals of Rock Mechanics. Hoboken: John Wiley & Sons.

13. Jing, L. (2003). A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics and Rock Engineering. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(3), 283–353.

14. Hudson, J.A., & Harrison, J.P. (2000). Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. New York: Elsevier.

15. Tacienko V.P. Postanovka zadachi rascheta krep'i s tamponazhem zakrepnogo prostranstva / V.P. Tacienko, V.A. Gogolin, I.A. Ermakova, A.S. Liskovec // Vestnik KuzGTU, 2019, №3.

16. Gogolin V.A. Deformacionnye i prochnostnye harakteristiki hрупких gornyh porod pri szhatii/ V.A. Gogolin// Vestnik KuzGTU, 2016, № 3. – pp. 3–7.

Поступило в редакцию 22.06.2019

Received 22 June 2019