

УДК 622.281:622.283

С.В. Борщевский (д-р техн. наук, проф.),
Е.В. Прокопенко (канд. техн. наук), **В.В. Глебо** (магистр)
Донецкий национальный технический университет
М.С. Плешко (д-р техн. наук, проф.)
Шахтинский институт ЮРГТУ (НПИ), г.Шахты, Россия

РАСЧЕТ АНКЕРНОЙ КРЕПИ В ПОРОДАХ, СКЛОННЫХ К ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

В статье рассмотрен алгоритм расчета анкерной крепи в породах, склонных к ползучести. Определены зависимости натяжения анкеров от основных факторов. Выполнена оценка эффективности использования анкеров с ограниченной податливостью. Определена область применения анкерной крепи в различных породах.

Основным критерием надежной работы анкерной крепи является ее несущая способность, которая определяется пределом прочности анкерного стержня на разрыв или сопротивлением распорного замка скольжению при приложенном усилии. В отличие от рамных поддерживающих крепей, для выбора и оценки рациональных конструкций анкерной крепи необходимы соответствующие приборы с обязательными измерениями и контролем работоспособности анкерной крепи [1].

Рассмотрим взаимодействие анкерной крепи с породным массивом, проявляющим свойства ползучести, в призабойной зоне ствола.

Используем теорию линейной наследственной ползучести, предложенной Л.Больцманом и развитой В. Вольтерра.

Ползучесть пород описывается интегральным уравнением Вольтера второго рода

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t L(t-\tau) \cdot \sigma(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ – напряжения и деформации в момент времени t ;
 τ – время, предшествующее моменту времени t ;
 $L(t - \tau)$ – функция влияния (ядро ползучести).

При постоянных напряжениях из уравнения (1) получаем

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 + \int_0^t L(\tau) d\tau \right). \quad (2)$$

Академик Ж.С. Ержанов показал, что деформирование горных пород до определенного уровня нагружения соответствует уравнению (1) с ядром типа Абеля

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 + \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right), \quad (3)$$

где δ , α – характеристики ползучести, получаемые экспериментально.

Академик Работнов Ю.Н. показал, что задачу теории линейной наследственной ползучести можно формально рассматривать как задачу теории упругости, в которой вместо упругих постоянных необходимо использовать временные операторы с ядром ползучести. Тогда уравнение (2) можно представить в виде

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\bar{E}}, \quad (4)$$

где \bar{E} – временный оператор.

Проф. Линьковым А.М. и д.т.н. Амусиным Б.З. доказано, что в задачах механики подземных сооружений, в которых граничные условия и объемные силы являются независимыми от времени, операторные выражения для упругих постоянных можно заменить алгебраическими выражениями, соответствующими ядру интегрального уравнения (метод переменных модулей).

На основании изложенного уравнение ползучести (3) приобретает вид:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 + \Phi), \quad (5)$$

где Φ – функция ползучести:

$$\Phi = \left(1 + \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{1-\alpha} \right). \quad (6)$$

Временные функции для модуля деформации, модуля сдвига и коэффициента Пуассона имеют вид:

$$E_t = \frac{E}{1 + \Phi}; \quad (7)$$

$$G_t = \frac{G}{1 + \frac{3\Phi}{2(1+\nu)}}; \quad (8)$$

$$\nu_t = 0,5 - \frac{0,5 - \nu}{1 + \Phi}. \quad (9)$$

По мере отхода забоя ствола изменение напряженно-деформированного состояния массива описывается выражением $\alpha^* \lambda \gamma H$. Коэффициент α^* , учитывающий отставание рассматриваемой точки от забоя, может быть определен из соотношения

$$\alpha^* = 1 - \frac{u_0}{u_\infty} = \exp\left(-1,3 \frac{l}{r_0}\right), \quad (10)$$

где u_0 – начальные смещения массива;

u_∞ – полные смещения массива;

l – расстояние рассматриваемой точки до забоя ствола;

r_0 – радиус ствола вчерне;

Отсюда получим

$$\frac{u_0}{u_\infty} = \tilde{u} = 1 - \exp\left(-1,3 \frac{l}{r_0}\right). \quad (11)$$

Доля приращения общего коэффициента α^* на каждый момент времени t , определяющий расстояние l , составит

$$\Delta \alpha^* = \tilde{u}(t_{i+1}) - \tilde{u}(t_i). \quad (12)$$

Тогда общее значение коэффициента α^* можно выразить в виде

$$\alpha^* = \sum_1^n \Delta \alpha^*. \quad (13)$$

Для определения натяжения анкеров, вызванного перемещением массива, воспользуемся аналитическим методом расчета крепи, разработанным Д.И. Колиным [1].

Натяжение анкеров равно:

$$F_a = B_a \frac{\Delta_r}{1 + B_a K_a}, \quad (14)$$

Δ_r – относительные радиальные смещения точек массива при неподкрепленной выработке, соответствующих концам анкеров;

B_a – характеристика жесткости анкера

$$B_a = \frac{E_a A_a}{l}, \quad (15)$$

E_a – модуль упругости материала анкера;

A_a – площадь поперечного сечения анкера;

l – длина анкера;

K_a – коэффициент взаимного влияния анкеров

$$K_a = K_{ii} + 4K_{ij}, \quad (16)$$

K_{ii} – коэффициент влияния усилий F_a , приложенных к массиву на концах i -го анкера, на относительные смещения пород на концах данного (i -го анкера);

K_{ij} – коэффициент влияния усилий F_a , приложенных к массиву на концах соседних j -х анкеров, на относительные смещения пород на концах i -го анкера.

Радиальные смещения поверхности ствола будут обусловлены движением забоя и ползучестью пород.

В каждый момент времени t , соответствующий определенному времени проходческого цикла и положению забоя, относительные смещения составят

$$\Delta_{rm} = \Delta'_{rm} + \Delta''_{rm}; \quad (17)$$

Δ'_{ri} – доля относительных смещений точек массива, соответствующих концам анкеров, вызванных удалением забоя от рассматриваемого сечения ствола, приходящуюся на каждую заходку

$$\Delta'_{rm} = \lambda \gamma H r_0 \frac{\bar{l}}{1 + \bar{l}} \cdot \frac{\Delta \alpha^*}{2G_t}; \quad (18)$$

Δ''_{ri} – доля относительных смещений точек массива, соответствующих концам анкеров, вызванных ползучестью пород, за период равный продолжительности проходческого цикла

$$\Delta''_{rm} = \lambda \gamma H r_0 \frac{\bar{l}}{1 + \bar{l}} \cdot \frac{\alpha^*}{2} \cdot \left(\frac{1}{G_m} - \frac{1}{G_{m-1}} \right), \quad (19)$$

где $\bar{l} = l/r_0$.

Коэффициенты влияния в каждые рассматриваемые моменты времени и положения забоя равны

$$K_{ii} = \frac{1}{2G_m l} \left[(1 - \nu_m) \frac{l}{r_s} - 2 \frac{1 - \nu_m^2}{\pi^2} + \frac{l^*}{\pi(2l^* - 1)} \left(l^* + 0,5 - \nu_m + \frac{1}{4(1 - \nu_m)} \cdot \frac{l^* - 1}{(2l^* - 1)^2} \right) \right]; \quad (20)$$

$$K_{ij} = \frac{1-\nu_m}{2\pi G_m l} \left[1 + \frac{3-4\nu_m}{8(1-\nu_m)^2} \right] \cdot \left(l' - \frac{1}{\sqrt{(l')^2 + 1}} \right), \quad (21)$$

где r_s – радиус опорной шайбы;

$l^* = l/l_z$;

l_z – длина закрепляемой части анкера;

$l' = 1/a_{ij}$;

a_{ij} – расстояние от j -го анкера до рассматриваемого.

На основании рассмотренного алгоритма выполнено исследование взаимодействия анкерной крепи с породным массивом в призабойной зоне при следующих исходных условиях: породный массив представлен аргиллитами: $E=1 - 5 \cdot 10^3$ МПа; $\nu=0,36$, $\alpha=0,71$; $\delta=0,008 \text{ с}^{-0,29}$. Глубина ствола $H=500 - 1000$ м; $\gamma=0,02$ МН/м³; $r_0=3,25 - 4,75$ м. Продолжительность проходческого цикла $T_u=24, 30, 36, 42$ ч, шаг заходки $l_3=4,0$ м, отставание постоянной крепи от забоя – 25 м. Параметры анкерной крепи: $l=2,0$ м; $A_a=2,01; 2,54; 3,14; 3,8; 4,52$ см²; $E_a=2,1 \cdot 10^5$ МПа; $a_{ij}=1,0$ м; $r_s=5$ см; $l_z=50$ см.

В результате выполнения расчетов определялась величина натяжения анкеров от момента установки до начала возведения постоянной крепи. Таким образом, рассматривались 7 проходческих заходов и период времени 7 - 12,25 сут, в зависимости от продолжительности цикла.

На рис. 1 приведена динамика увеличения натяжения анкеров от первой до седьмой заходки крепи в момент времени окончания 30-часового проходческого цикла. Варьируемые параметры составили: $E=5 \cdot 10^3$ МПа; $H=800$ м; $r_0=3,25$ м; $A_a=4,52$ см².

На рис. 2 - 6 рассмотрены зависимости величины натяжения анкеров после выполнения 7 проходческих циклов с момента установки рассматриваемого анкера от варьируемых параметров.

Анализ представленных зависимостей показывает, что основными влияющими параметрами, определяющими величину полного натяжения анкера, являются глубина ствола, модуль деформации пород и площадь поперечного сечения анкера.

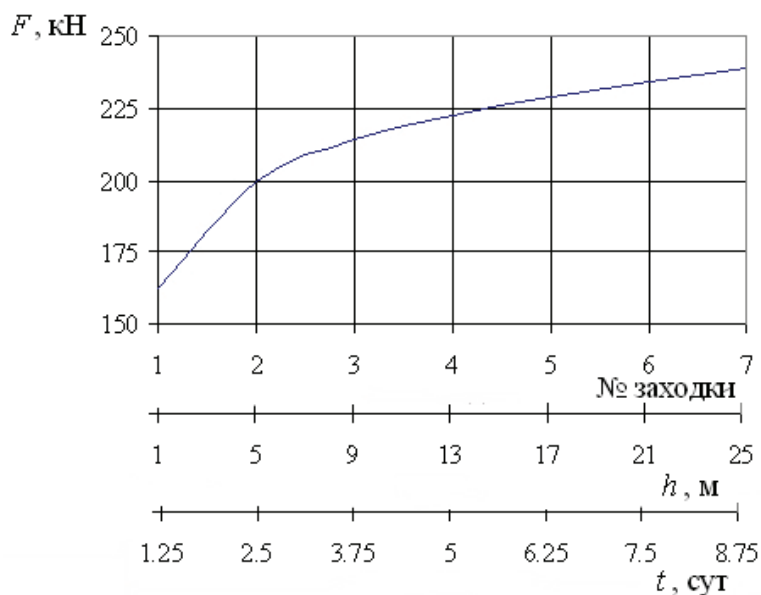


Рис. 1. Динамика увеличения натяжения анкера по мере подвигания забоя

Зависимость $F_a(H)$ имеет линейный характер, $F_a(A_a)$ – параболический, зависимость $F_a(E)$ с высокой степенью точности представляется в виде степенной функции.

Остальные варьируемые параметры не оказывают значительного влияния на величину натяжения анкера, и их влияние имеет не ярко выраженный параболический характер.

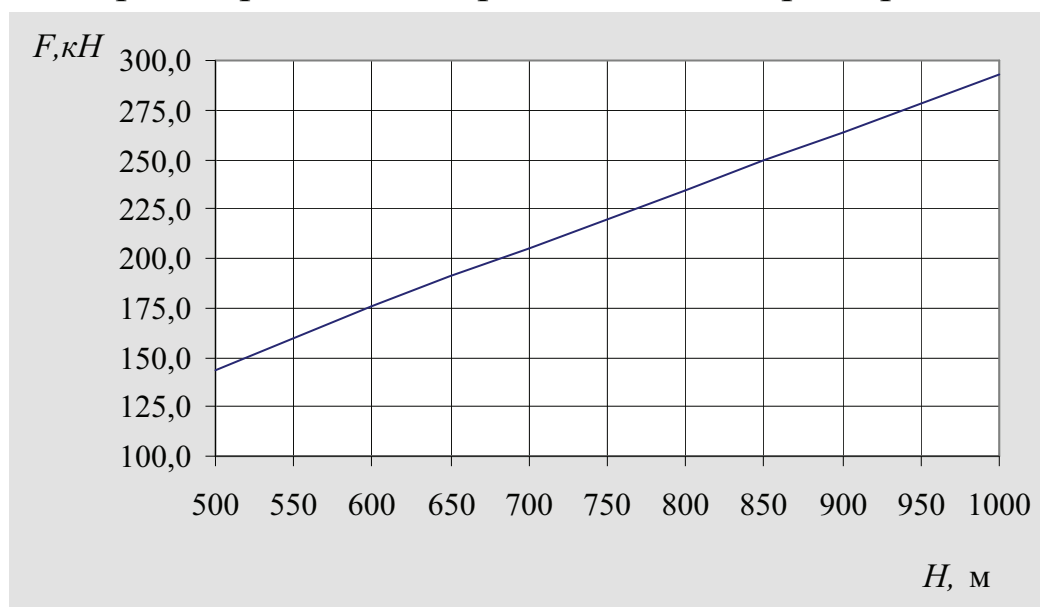


Рис. 2. Зависимость полного натяжения анкера от глубины участка ($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $r_0=3,25$ м; $A_a=4,52$ см²; $t_y=24$ ч).

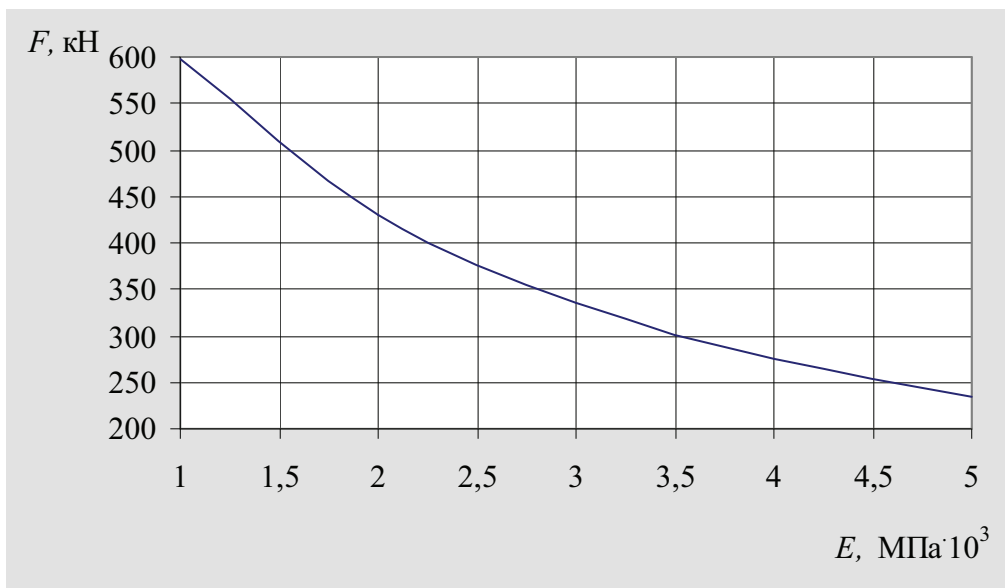


Рис. 3. Зависимость полного натяжения анкера от модуля деформации массива

($H=800$ м; $r_0=3,25$ м; $A_a=4,52$ см²; $t_y=24$ ч)

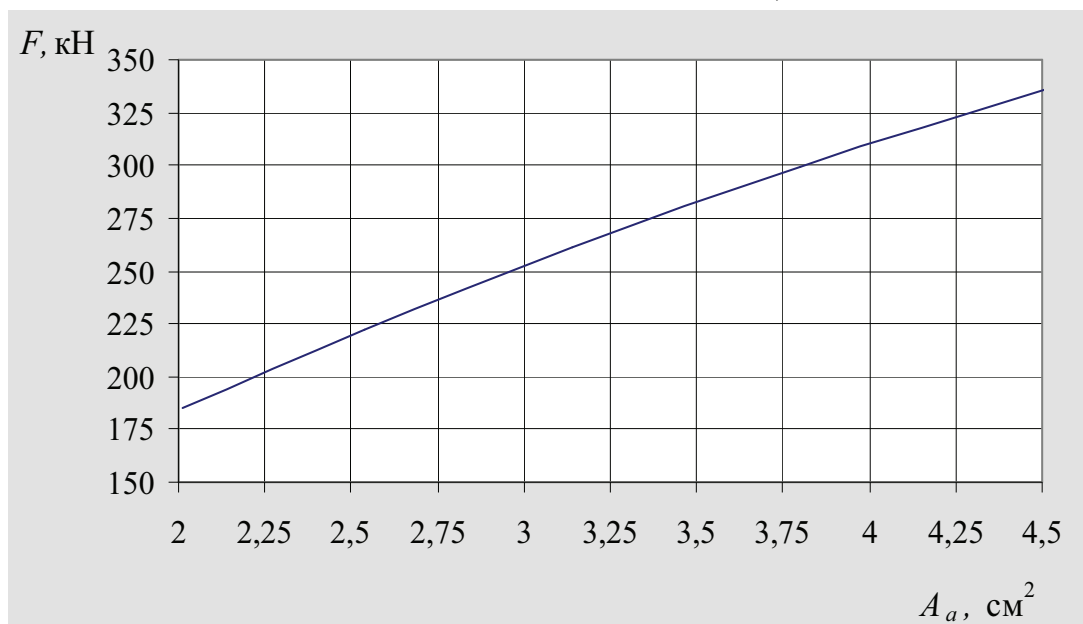


Рис. 4. Зависимость полного натяжения анкера от площади поперечного сечения анкера

($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $H=800$ м; $r_0=3,25$ м; $t_y=24$ ч)

В целом количественный анализ полученных данных показывает, что в большом диапазоне рассмотренных условий величина натяжения превышает максимальную расчетную нагрузку на принятый тип анкера [2]:

$$P_{\max} = S_{cm} \cdot R_p \cdot m_y, \quad (22)$$

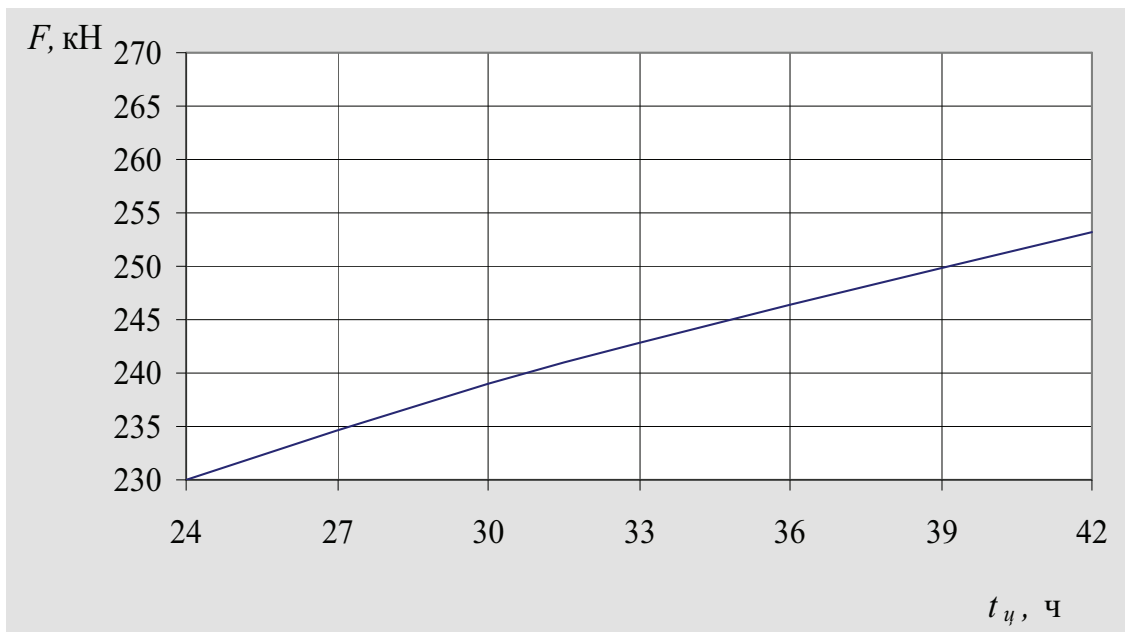


Рис. 5. Зависимость полного натяжения анкера от продолжительности цикла
($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $H=800$ м; $r_0=3,25$ м; $A_a=4,52$ см²)

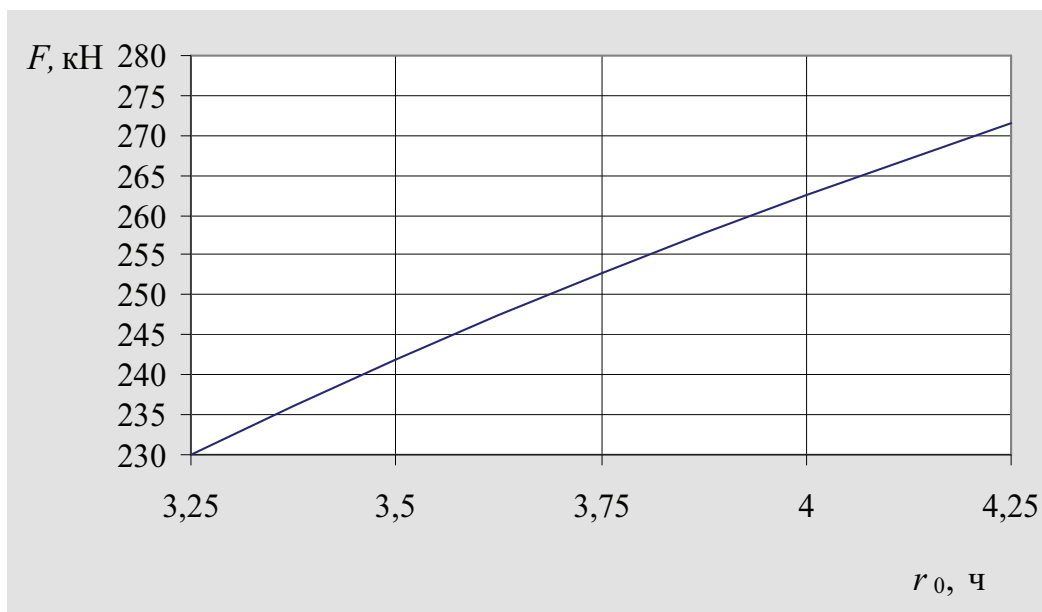


Рис. 6. Зависимость полного натяжения анкера от радиуса ствола вчерне
($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $H=800$ м; $A_a=4,52$ см²; $t_u=24$ ч)

где S_{cm} – площадь стержня, м²;

R_p – расчетное сопротивление материала стержня растяжению, для арматурной стали класса А-I, $R_p = 210$ МПа; для класса А-II –

$R_p = 270$ МПа, А-III – $R_p = 340$ МПа;

m_y – коэффициент условий работы, в сухих скважинах $m_y = 0,9$; во влажных $m_y = 0,7 - 0,8$.

В связи с этим рассмотрим возможность увеличения области применения анкерной крепи путем обеспечения ограниченной податливости анкеров.

Для этого определим величину полного натяжения анкеров, обладающих ограниченной радиальной податливостью в пределах $p_a = 5 - 30$ мм, при следующих значениях варьируемых параметров: $E = 2,5 \cdot 10^3$ МПа; $r_0 = 3,75$ м; $A_a = 2,01$ см²; $t_u = 24$ ч.

Расчет натяжения анкеров производится по приведенному выше алгоритму, с вступлением в работу анкеров после исчерпания податливости.

Снижение величины натяжения при применении податливых анкеров составит $F_{отн} = F_{a,p} / F_a$, где $F_{a,p}$ – величина натяжения податливого анкера, F_a – величина натяжения жесткого анкера в аналогичных условиях.

На рис. 7 представлена полученная зависимость параметра $F_{отн}$ от величины податливости анкера.

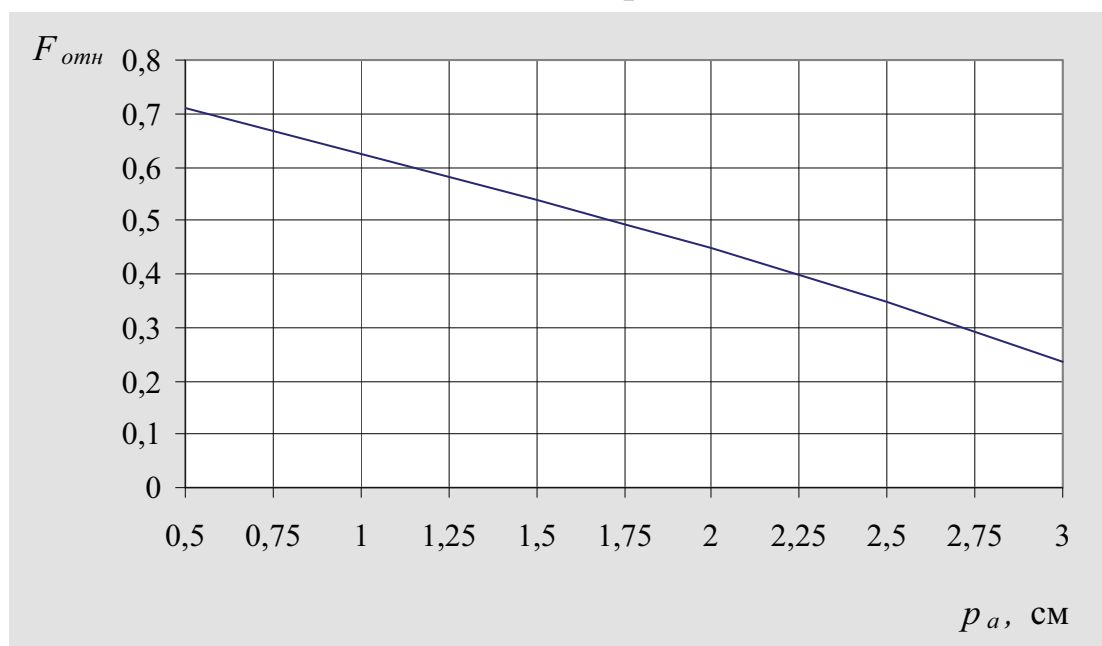


Рис. 7. Зависимость параметра $F_{отн}$ от величины податливости анкера

Анализ полученных результатов показывает, что зависимость параметра $F_{отн}$ от величины податливости анкера имеет параболический характер, и в целом включение податливого элемента в конструкцию штанги является эффективным способом по увеличению области применения анкеров.

В то же время необходимо отметить, что в общем случае снижение натяжения анкера уменьшает величину упрочнения армированного массива, поэтому использование податливых конструкций анкеров должно обеспечить величину параметра F_a , близкую к максимальной несущей способности.

Так автором была определена максимальная область применения жестких анкеров в трех типах пород (табл. 1), для анкерной крепи с наиболее часто применяемыми на практике параметрами: $l=1,8 - 2,2$ м; $A_a=3,14$ см² (диаметр стержня 20 мм); $l_z=100$ см, тип используемой арматурной стали – АП, АШ. Диаметр ствола в свету составил 6,5 м

Область применения представлена в виде графиков на рис. 8 - 10.

Таблица 1

Реологические характеристики пород

№ п/п	Наименование пород	Коэффициент Пуассона	α	$\delta, c^{\alpha-1}$
1	Аргиллиты	0,36	0,710	0,008
2	Алевролиты	0,34	0,726	0,0094
3	Песчаники	0,31	0,670	0,0021

Из графиков видно, что склонность пород к ползучести в значительной степени определяет область применения анкеров. Если в песчаниках практически во всем диапазоне горно-геологических условий можно осуществлять крепление жесткими конструкциями анкеров, то в склонных к ползучести аргиллитах и алевролитах в широкой области возникает необходимость использования податливых конструкций.

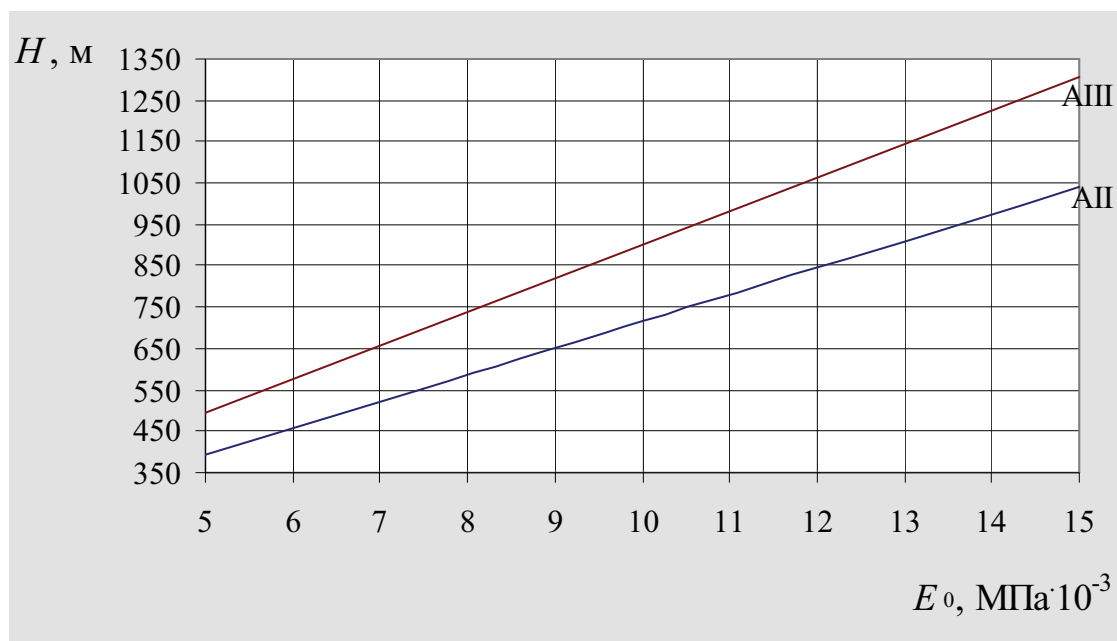


Рис. 8. Максимальная область применения жестких анкеров в аргиллитах

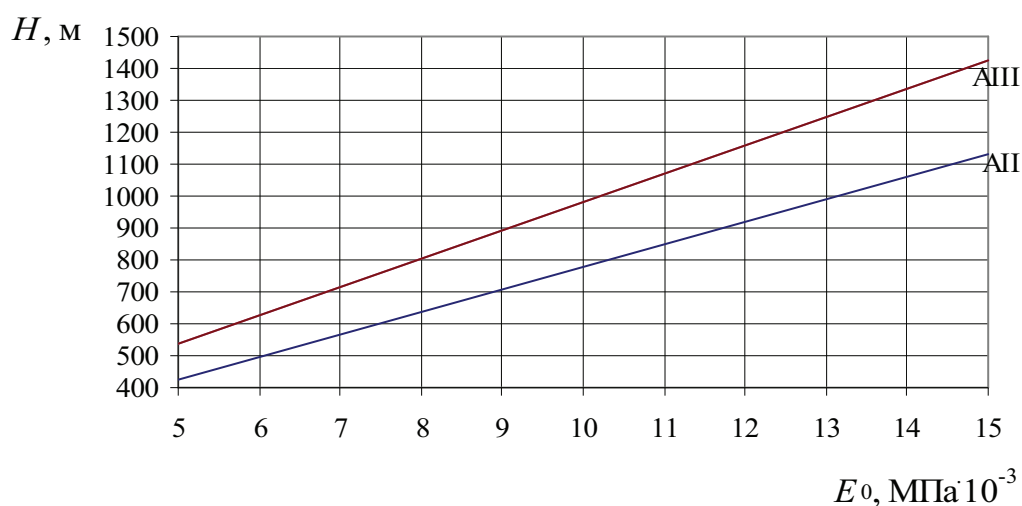


Рис. 9. Максимальная область применения жестких анкеров в алевролитах

Окончательное определение необходимой податливости анкеров в породах, склонных к ползучести, должно производиться по результатам натурных измерений значений радиальных перемещений в забое ствола, предварительный подбор возможен по рассмотренному выше алгоритму.

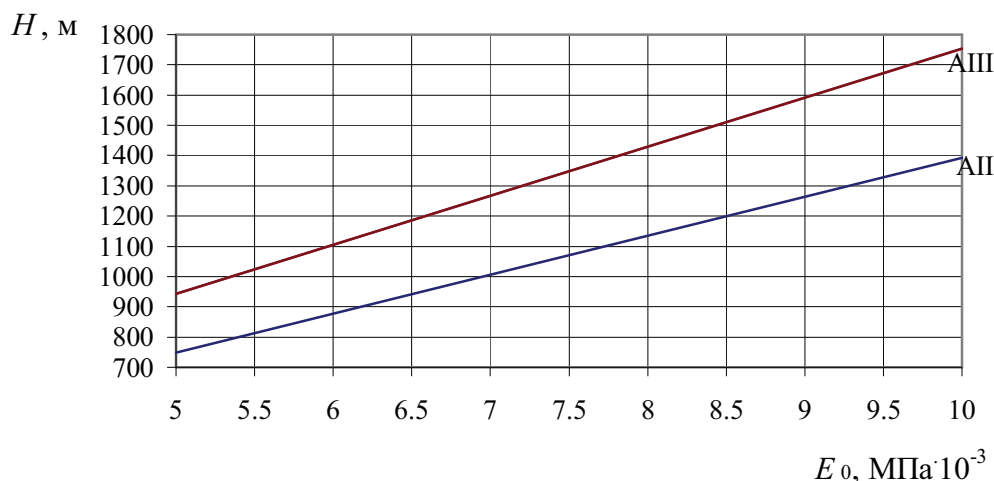


Рис. 10. Максимальная область применения жестких анкеров в песчаниках

Список литературы

1. Мельников Н.И. Анкерная крепь. – М.: Недра, 1980.
2. Н.С. Булычев. Механика подземных сооружений. Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994.-382 с.
3. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи /ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. – М.: Стройиздат. – 1983. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 11.11.2012.

Рекомендовано до друку д-ром техн.наук Є.І. Кольчиком

С.В. Борщевський, О.В. Прокопенко, В.В. Глєбко

Донецький національний технічний університет

М.С. Плєшко

Шахтинський інститут ЮРГТУ (НПІ), м.Шахти, Росія

ДО ПИТАННЯ ЩОДО РОЗРАХУНКУ АНКЕРНОГО КРІПЛЕННЯ У ПОРОДАХ, СХИЛЬНИХ ДО ПОВЗУЧОСТІ ПРИ ПРОХОДЦІ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТВОЛІВ

У статті розглянутий алгоритм розрахунку анкерного кріплення в породах, схильних до повзучості. Визначені залежності натягнення анкерів від основних чинників. Виконана оцінка ефективності використання анкерів з обмеженою податливістю. Визначена область застосування анкерного кріплення в різних породах.

S. Borshchevsky, E. Prokopenko, V. Glebko

Donetsk National Technical University

M. Pleshko

Shakhty Institute (NPI), Shakhty, Russia

CALCULATING ANCHORS IN CREEPY ROCKS IN THE PROCESS OF VERTICAL SHAFTS ADVANCING

The paper considers the algorithm of calculating anchoring in creepy rocks. We estimated the efficiency of using anchors with limited pliability and defined the field of anchor support application in different rocks.