

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АНКЕРНОЙ КРЕПИ С ПОРОДНЫМ МАССИВОМ ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА ПО ПОТОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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.

RESEARCH OF INTERACTION ANCHOR PROP WITH BREEDS BY VERTICAL SHAFT SINKING ON LINE TECHNOLOGY

The algorithm of calculation of anchor fasten is considered in breeds, inclined to the creep. Dependences of pull of anchors are certain on basic factors. The estimation of efficiency of the use of anchors is executed with the limited pliability. An application of anchor fasten domain is certain in different breeds.

Поиск и разработка эффективных направлений сокращения продолжительности строительства вертикальных стволов, снижения расходов материально-технических ресурсов является актуальной научно-технической проблемой, имеющей особо важное народно-хозяйственное значение в связи с острой необходимостью реконструкции и развития угольной промышленности Украины. Наиболее перспективным направлением является разработка поточных технологических схем проходки, но для этого необходимы исследования взаимодействия системы «анкер – крепь – породный массив».

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 в черне;

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

$$\Delta_m = \Delta'_m + \Delta''_m; \quad (17)$$

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

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

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

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

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;

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

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; $A_a=2,01; 2,54; 3,14; 3,8; 4,52 \text{ см}^2$; $E_a=2,1 \cdot 10^5$ 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 заходок 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; $A_a=4,52 \text{ см}^2$.

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.

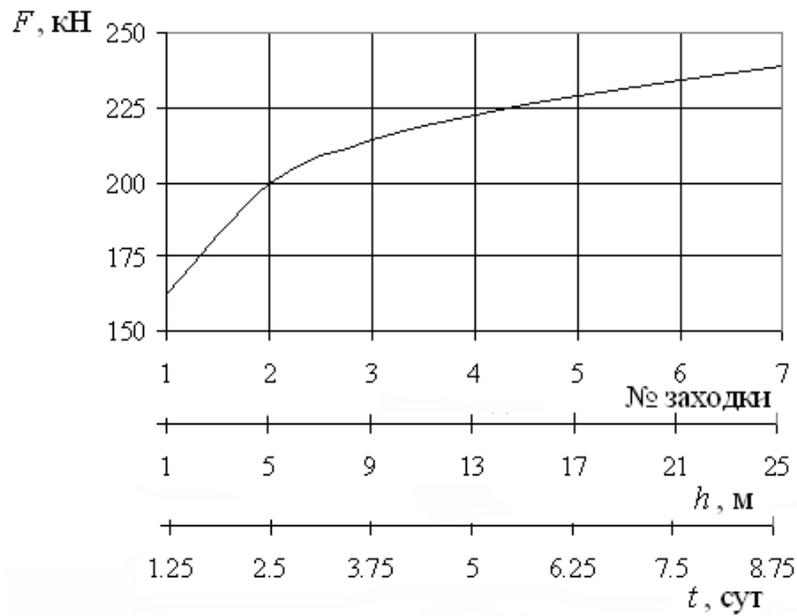


Рис. 1. – Динамика увеличения натяжения анкера по мере подвигания забоя

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.

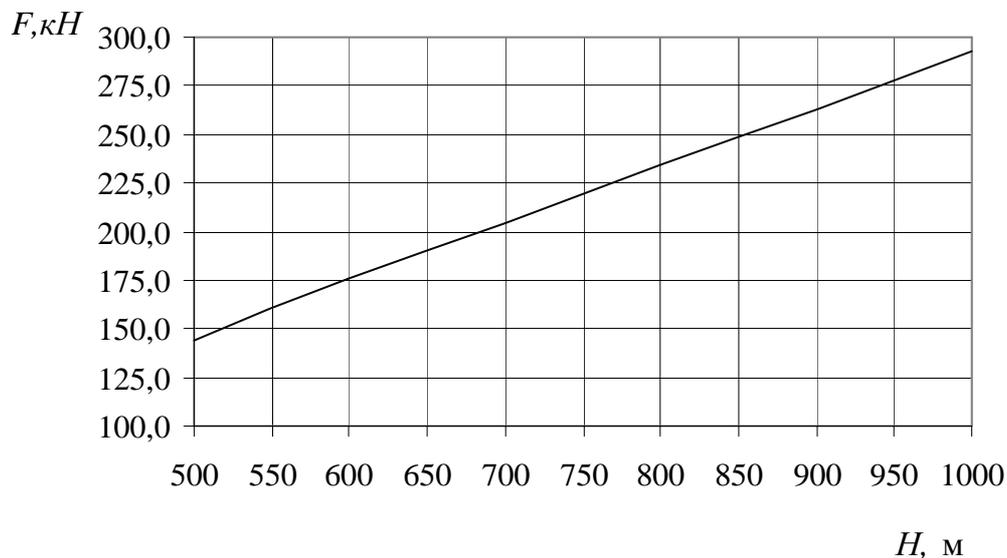


Рис. 2. – Зависимость полного натяжения анкера от глубины участка ($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $r_0=3,25$ м; $A_a=4,52$ см²; $t_y=24$ ч).

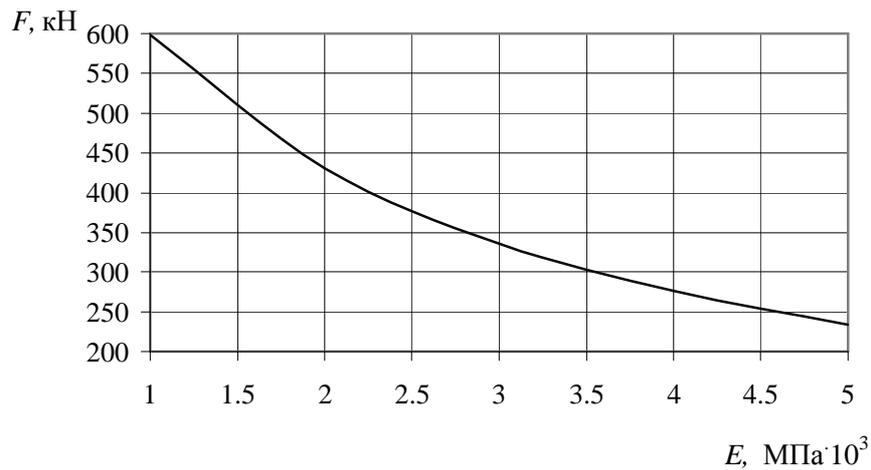


Рис. 3. – Зависимость полного натяжения анкера от модуля деформации массива
($H=800$ м; $r_0=3,25$ м; $A_a=4,52$ см²; $t_u=24$ ч)

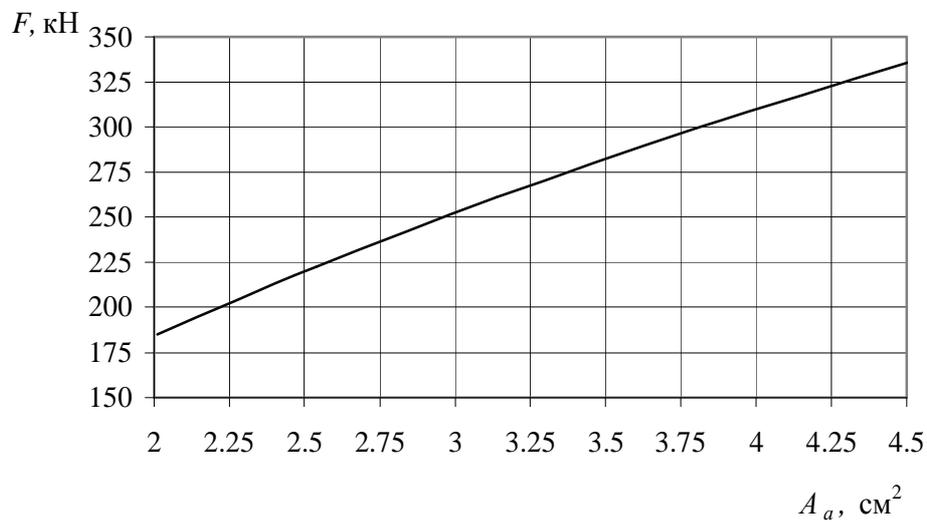


Рис. 4. – Зависимость полного натяжения анкера от площади поперечного сечения анкера
($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $H=800$ м; $r_0=3,25$ м; $t_u=24$ ч)

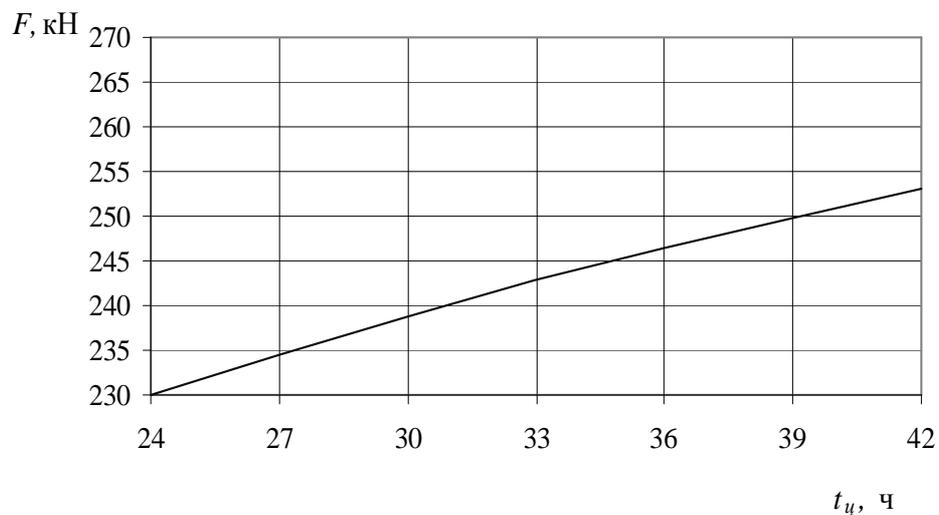


Рис. 5. – Зависимость полного натяжения анкера от продолжительности цикла
($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $H=800$ м; $r_0=3,25$ м; $A_a=4,52$ см²)

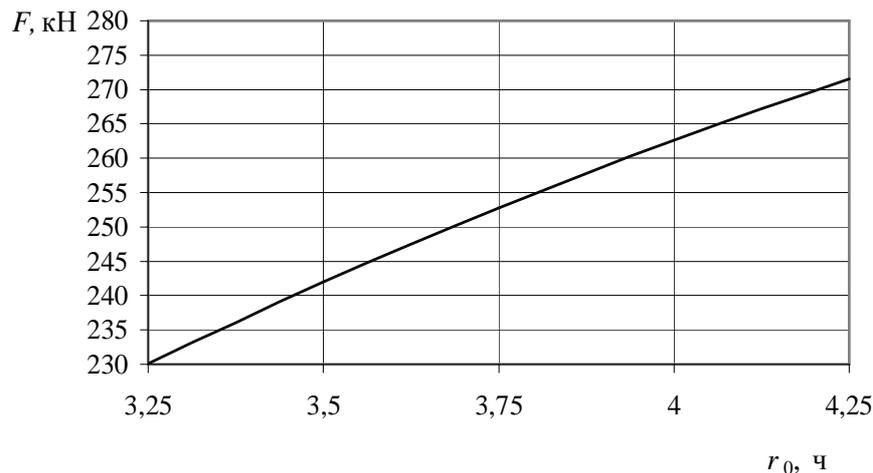


Рис. 6. – Зависимость полного натяжения анкера от радиуса ствола вчерне ($E=5 \cdot 10^3$ МПа; $H=800$ м; $A_a=4,52$ см²; $t_y=24$ ч)

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

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

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; $t_y=24$ 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.

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.

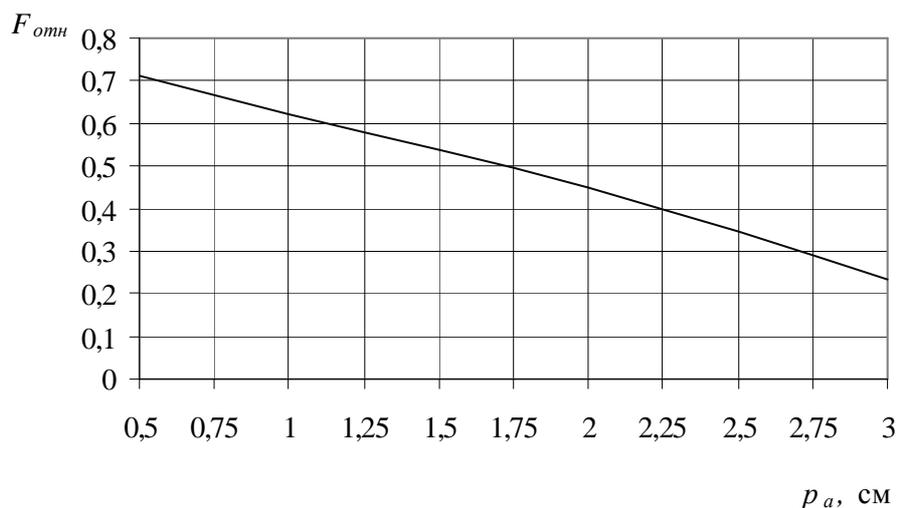


Рис. 7. – Зависимость параметра $F_{отн}$ от величины податливости анкера

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; $A_a=3,14 \text{ см}^2$ (диаметр стержня 20 мм); $l_z=100$ см, тип используемой арматурной стали – АII, АIII. Диаметр ствола в свету составил 6,5 м

Таблица 1. – Реологические характеристики пород

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

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

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.

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.

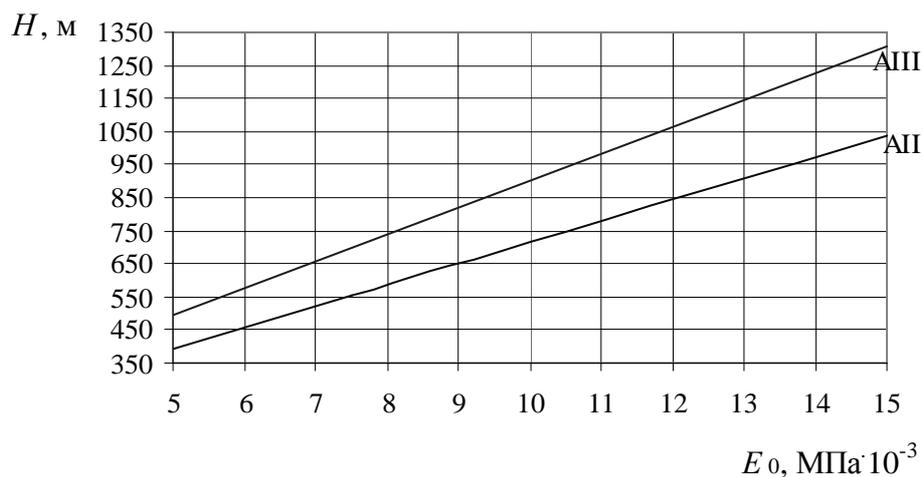


Рис. 8. – Максимальная область применения жестких анкеров в аргиллитах

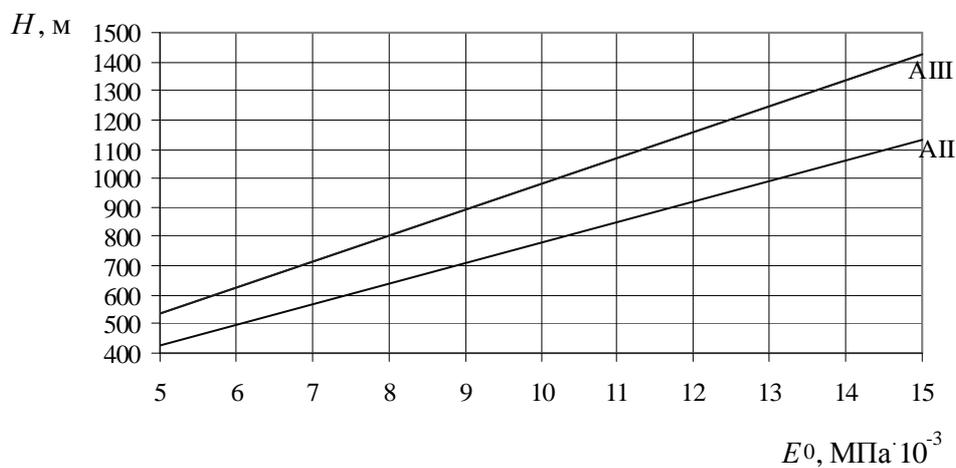


Рис. 9. – Максимальная область применения жестких анкеров в алеволитах

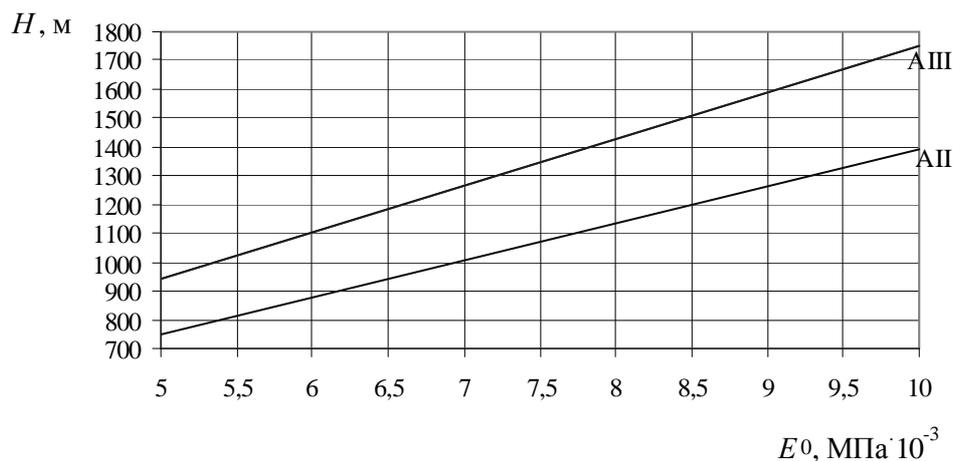


Рис. 10. – Максимальная область применения жестких анкеров в песчаниках

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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