

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРЕПИ СТВОЛОВ И
СТВОЛОВ-ФУНДАМЕНТОВ НАДШАХТНЫХ СООРУ-
ЖЕНИЙ НА ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Донецк-1990

Строительство шахт и рудников в северной климатической зоне СССР связано с необходимостью возведения крепи вертикальных стволов в вечномерзлых четвертичных отложениях большой мощности и неустойчивых при оттаивании породах, а также возведением над ними различного типа надшахтных сооружений. Так, например, в Печорском угольном бассейне мощность вечномерзлых отложений достигает 80-90м, а в Северо-Восточных районах СССР - 300м и более.

При эксплуатации надшахтных зданий, сооружений и вертикальных стволов вечномерзлые породы вокруг ствола и в основании надшахтных сооружений оттаивают под воздействием положительных температур внутреннего воздуха, переходят в пластичное состояние, проседают и не могут воспринимать нагрузки от фундаментов. Поэтому в этих районах надшахтные сооружения возводят на столбчатых или свайных фундаментах, а при мощности неустойчивых вечномерзлых пород 40-90м - на четырех шурф-фундаментах диаметром в свету 2,5-3,0м, пройденных вокруг ствола до невыветрелой зоны скальных пород.

На шурф-фундаментах глубиной 40-90м в Печорском угольном бассейне в настоящее время построено шесть башенных копров и одно надшахтное здание клетового ствола. Суммарная стоимость шурф-фундаментов превысила 2,0 млн.руб. капложений и значительно увеличила трудоемкость и продолжительность строительства надшахтных сооружений.

В районах, где мощность вечномерзлых четвертичных отложений достигает 130-150 м, продолжительность возведения шурф-фундаментов вокруг ствола составит 10-12 мес, а их стоимость - 1 млн.руб. на каждом надшахтном сооружении.

Учитывая, что возведение шурф-фундаментов невозможно вести параллельно с возведением ствола, монтаж надшахтных сооружений увеличит общую продолжительность строительства шах-

ты или рудника.

В институте "Гипрошахт" Минуглепрома СССР ведется разработка нового прогрессивного метода возведения различного типа надшахтных сооружений в северной климатической зоне СССР с опиранием их на крепь стволов-фундаментов.

Крепь ствола (рис.1) на уровне невыветрелой зоны скальных пород разрезается упругой прокладкой, выполняется кольцевой опорный башмак, на который передаются вертикальные нагрузки от массы надшахтного сооружения, ствола-фундамента и вертикальная составляющая горного давления от оттаивающих за крепью вечномерзлых пород. Горизонтальные нагрузки и момент сил в вертикальной плоскости, приложенные к устью ствола-фундамента от надшахтного сооружения, полностью или частично передаются на окружающие крепь породы. Таким образом ствол-фундамент совмещает технологические функции ствола и фундамента надшахтного сооружения.

Внедрение в практику шахтного строительства нового прогрессивного метода возведения надшахтных сооружений в северной климатической зоне СССР с опиранием на крепь стволов-фундаментов связано с необходимостью разработки методики их расчета на различные виды загрузки, в том числе и на горное давление вмещающих ствол-фундамент пород.

Существующие методы расчета радиальных нагрузок на крепь (горного давления) вертикальных горных выработок, пройденных в четвертичных отложениях большой мощности (40 м и более) и неустойчивых породах, базирующиеся на жесткопластической модели взаимодействия пород и крепи, в том числе включенные в нормативные документы [1,2], не полностью отражают физические процессы, происходящие в породах за крепью вертикальной горной выработки в период ее строительства и эксплуатации, и действительный характер взаимодействия пород и крепи.

Крепь нагружается в процессе совместного деформирования (контактного взаимодействия) с массивом пород, вследствие чего нагрузки на крепь (напряжения на контакте крепи с массивом) принципиально не могут быть заданы априорно, как исходные данные к расчету, а должны определяться в процессе единого расчета всей деформируемой системы "крепь-массив" [3].

Анализ экспериментальных исследований деформирования сыпучей и связной среды вокруг вертикальных выработок на моделях из эквивалентных материалов [4, 5, 6], натуральных [7] и аналитических исследований [8] показывает, что процесс вза-

иодействия массива пород с крепью вертикальной горной выработки сложный и включает элементы различных механических моделей.

Выполненные аналитические исследования процессов деформирования пород за крепью вертикального ствола и формирования горного давления на крепь показали, что их можно разделить на три основные стадии (рис.2).

Первая-стадия пластического деформирования пород и формирования зависающего объема пород с поддерживающей их крепью.

Глубина H_0 , до которой породы вокруг устья вертикального ствола устойчивы без крепи [7,8], определяется из соотношений:

в сыпучих породах ($c=0; \varphi \neq 0$)

$$H_0 \leq 0,5 R_1 \operatorname{tg} \varphi; \quad (1)$$

в связных породах ($c \neq 0; \varphi \neq 0$)

$$H_0 \leq \frac{2c(1+\sin \varphi) \operatorname{ctg} \varphi}{\gamma(1-\sin \varphi)}. \quad (2)$$

Идеально пластичные породы ($c \neq 0; \varphi = 0$) устойчивы вокруг устья вертикального ствола без крепи при

$$c \geq 0,75 R_1 \gamma. \quad (3)$$

Условие зависания крепи устья вертикального ствола на породах зоны пластических деформаций, при котором устройство дополнительных опорных венцов на наружном контуре крепи не требуется, определяется из соотношений:

в сыпучих породах

$$\gamma_k \left(1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}\right) \leq \gamma, \quad (4)$$

в связных породах

$$\gamma_k \left(1 - \frac{R_0^2}{R_1^2}\right) + \frac{c}{R_1} \leq \gamma. \quad (5)$$

На глубине большей H_0 , породы вокруг крепи устья ствола теряют устойчивость, смещаются к оси ствола, вступают в контакт с крепью, обжимают ее и совместно с крепью зависают на недеформированных породах, окружающих зону пластических деформаций.

Глубина вертикального ствола H_1 , в пределах которой вокруг него формируется устойчивый зависающий объем пород с поддерживающей их крепью, может быть определена из соотношений:

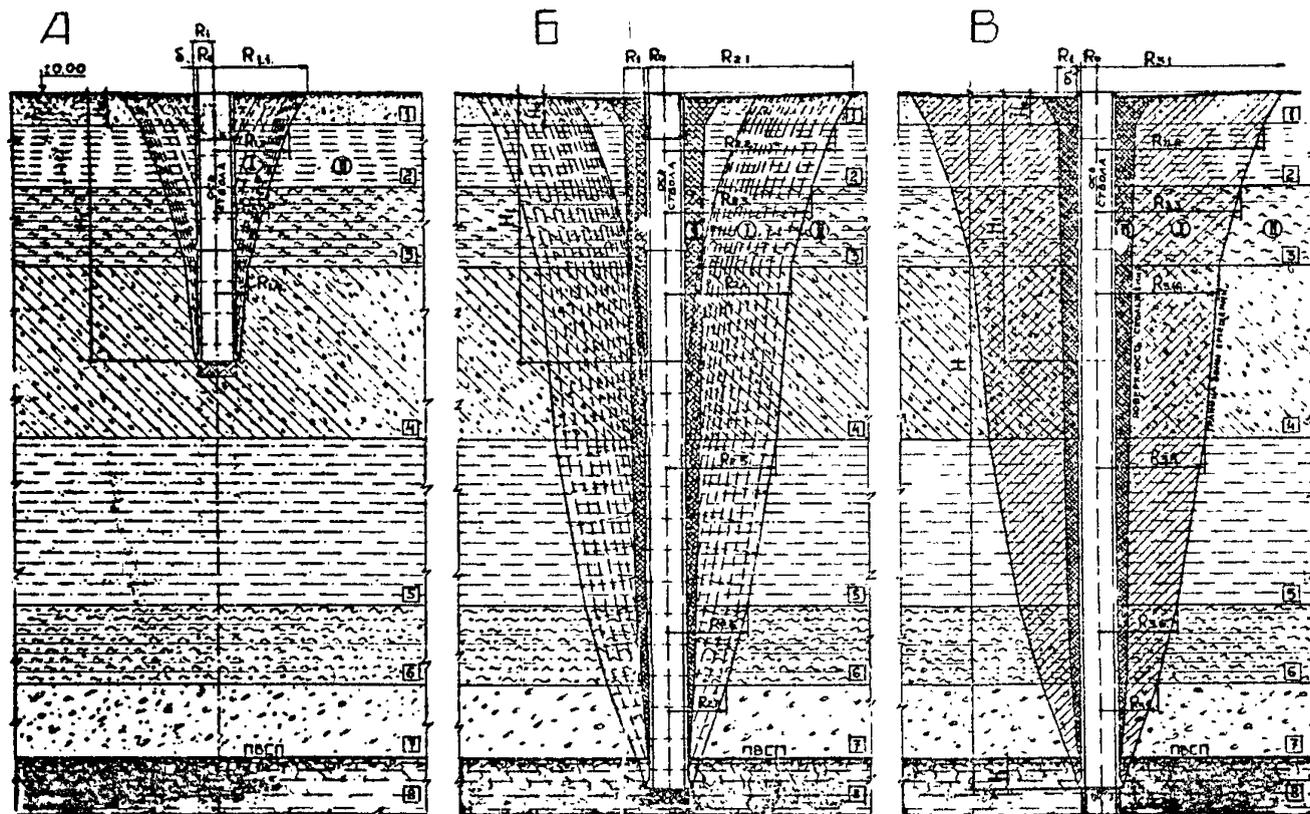


Рис. 2. Схема деформирования четвертичных отложений вокруг вертикального ствола; А-первая стадия; Б-вторая стадия; В-третья стадия; (I) - зона пластических деформаций; (II) - недеформированная зона; (III) - зона разрушенных пород

в сыпучих породах ($c=0$; $\varphi \neq 0$)

$$H_1 \leq \left[2R_1 + \frac{2\gamma_k(R_1^2 - R_0^2)}{3\gamma R_1} \right] \frac{(1 + \sin \varphi) \operatorname{ctg} \varphi}{(1 - \sin \varphi)}, \quad (6)$$

в связных породах ($c \neq 0$, $\varphi \neq 0$)

$$H_1 \leq \left[2R_1 + \frac{2\gamma_k(R_1^2 - R_0^2)}{3\gamma R_1} + \frac{8c}{3\gamma} \right] \frac{(1 + \sin \varphi) \operatorname{ctg} \varphi}{(1 - \sin \varphi)}, \quad (7)$$

где R_1 - радиус ствола в проходке, м;

R_0 - радиус ствола в свегу, м;

γ_k - удельный вес крепи, кН/м³;

γ - удельный вес пород, кН/м³;

φ - угол внутреннего трения пород, град.;

c - сцепление пород, МПа.

Размеры зоны пластических деформаций (зоны смещений) в породах вокруг вертикального ствола в радиальном направлении от его оси $-R_{c1,i}$ до глубины $H_i \leq H_L$ могут быть определены по формулам:

в сыпучих породах

$$R_{c1,i} = R_1 + \frac{(H_1 - H_i)(1 - \sin \varphi_i) \operatorname{ctg} \varphi_i}{(1 + \sin \varphi_i)}, \quad (8)$$

в связных породах

$$R_{c1,i} = R_1 + \frac{(H_1 - H_i)(1 - \sin \varphi_i) \operatorname{ctg} \varphi_i}{(1 + \sin \varphi_i)} + \frac{2c_i}{\gamma_{cp,i}}, \quad (9)$$

где H_i - глубина ствола от поверхности до рассматриваемого яруса, м;

φ_i - угол внутреннего трения пород зоны пластических деформаций на рассматриваемом ярусе по глубине устья ствола, град.;

c_i - сцепление пород зоны пластических деформаций на рассматриваемом ярусе по глубине устья ствола, МПа;

$\gamma_{cp,i}$ - усредненный удельный вес пород, кН/м³.

Радиальная нагрузка на крепь вертикального ствола (горное давление) $P_{r,i}$ може быть определена в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упругопластической модели взаимодействия пород и крепи по формулам

в сыпучих породах

$$P_{2,i} = \gamma_{ср,i} \cdot H_i (1 - \sin \varphi_i) \left(\frac{R_1}{R_{ср,i}} \right)^{\beta}, \quad (10)$$

в связных породах

$$P_{2,i} = (\gamma_{ср,i} \cdot H_i + C_i \operatorname{ctg} \varphi_i) (1 - \sin \varphi_i) \left(\frac{R_1}{R_{ср,i}} \right)^{\beta} \left(\frac{C_i \operatorname{ctg} \varphi_i}{\gamma_{ср,i} H_i} \right)^{\beta}, \quad (11)$$

где $\beta = \beta - 1 = \frac{2 \sin \varphi_i}{(1 - \sin \varphi_i)}$; (12)

β - характеристика условия пластичности (прочности)

Кулона-Мора $\beta = \frac{(1 + \sin \varphi_i)}{(1 - \sin \varphi_i)}$. (13)

Вторая - стадия формирования за крепью ствола зоны разрушенных пород (зоны прогрессирующих смещений) и последовательно повторяющихся циклов вертикального смещения (сдвига) и зависания пород разрушенной зоны с поддерживающей их крепью и пород зоны пластических деформаций на породах недеформированной зоны вокруг ствола.

Размеры зоны пластических деформаций в радиальном направлении от оси ствола $R_{ср,i}$ в процессе проходки непрерывно увеличиваются и на рассматриваемом ярусе по глубине H_i могут быть определены по формулам:

в сыпучих породах

$$R_{ср,i} = R_1 + \frac{(H - H_i)(1 - \sin \varphi_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{(1 + \sin \varphi_i)}, \quad (14)$$

в связных породах

$$R_{ср,i} = R_1 + \frac{(H - H_i)(1 - \sin \varphi_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{(1 + \sin \varphi_i)} + \frac{2C_i}{\gamma_{ср,i}}, \quad (15)$$

где H - глубина четвертичных отложений от поверхности до неветрелой зоны скальных пород, м.

Если принять, что зона разрушенных пород за крепью вертикального ствола на глубине $H_0 = R_1 \operatorname{tg} (45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ не превышает радиуса ствола в проходке, то до глубины, где $R_{ср,i} \geq 4R_1$ -

размер зоны разрушенных пород - $R_{ср,i}$ от оси ствола можно принять равным $R_{ср,i} = 2R_1$ (16)

На большей глубине, где $R_{ср,i} < 4R_1$ размер зоны разрушенных пород - $R_{ср,i}$ с достаточной точностью можно определить из соотношения:

$$R_{ср,i} \leq 0.333(R_{ср,i} - R_1) + R_1. \quad (17)$$

Горное давление на крепь ствола во второй стадии прямо пропорционально весу поддерживаемого крепью сползающего (зависающего) объема пород и может быть определено в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упругопластической или упругопластической неоднородной моделей взаимодействия пород и крепи.

На глубине H_i от поверхности, на уровне верха забоя ствола (низа возведенного участка крепи), где зона разрушенных пород еще не сформировалась, радикальная нагрузка на крепь вертикального ствола (горное давление) $P_{\perp i}$ определяется по формулам:

в сыпучих породах

$$P_{\perp i} = \gamma_{cp.i} \cdot H_i (1 - \sin \varphi_i) \left(\frac{R_{\perp}}{R_{ex.i}} \right)^{\alpha}, \quad (18)$$

в связанных породах

$$P_{\perp i} = (\gamma_{cp.i} \cdot H_i + C_i \cdot ctg \varphi_i) (1 - \sin \varphi_i) \left(\frac{R_{\perp}}{R_{ex.i}} \right)^{\alpha}. \quad (19)$$

На глубине меньшей H_i (выше уровня верха забоя ствола), где в процессе проходки и крепления ствола образуется зона разрушенных пород, радиальная нагрузка на крепь (горное давление) $P_{\perp i}$ определяется по формулам:

в сыпучих породах по формуле (18),

в связанных породах

$$P_{\perp i} = (\gamma_{cp.i} \cdot H_i + C_i \cdot ctg \varphi_i) (1 - \sin \varphi_i) \left(\frac{R_{\perp}}{R_{ex.i}} \right)^{\alpha} - C_i \cdot ctg \varphi_i \left(\frac{R_{\perp}}{R_{ex.i}} \right)^{\alpha}. \quad (20)$$

Если ствол пройден в идеально пластичных породах, у которых угол внутреннего трения $\varphi = 0$, то радиальная нагрузка на крепь (горное давление) может быть определена по формуле:

$$P_{\perp i} = \gamma_{cp} \cdot H_i - C_i \left(1 + 2 \cdot ctg \varphi \frac{R_{ex.i}}{R_i} \right), \quad (21)$$

где $R_{ex.i}$ - размер зоны пластических деформаций (м), определяемый из выражения $R_{ex.i} = R_i + \frac{2C_i}{\gamma_{cp.i}}$ (22)

Третья - стадия стабилизации напряженно-деформированного состояния пород четвертичных отложений и развития в них реологических процессов изменения во времени напряженно-деформированного состояния и процессов ползучести.

В породах, в которых после проходки ствола и возведения крепи процессы вязкого течения не развиваются: радиаль-

ная нагрузка на крепь (горное давление), достигнутая в процессе строительства ствола во второй стадии, стабилизируется и может быть определена в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упругопластической неоднородной модели взаимодействия пород и крепи по формулам:

в сыпучих породах

$$P_{3i} = \gamma_{cp.i} \cdot H_i (1 - \sin \varphi_i) \left(\frac{R_1}{R_{e3.i}} \right)^\alpha, \quad (23)$$

в связных породах

$$P_{3i} = (\gamma_{cp.i} \cdot H_i + C_i \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i) (1 - \sin \varphi_i) \left(\frac{R_1}{R_{e3.i}} \right)^\alpha - C_i \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i. \quad (24)$$

Анализ выражений (16-24) показывает, что только на контакте со скальными невыветрелыми породами, при отсутствии в породах вокруг ствола пластической зоны (зоны смещений), радиальная нагрузка на крепь (горное давление) может достигнуть максимальных значений и определяться как для максимальных напряжений в нетронутом массиве, по аналогии с выражениями, полученными Р.Феннером для идеально сыпучей среды ($C=0$) [9] и А.Лабассом [10] для связных пород, по формулам:

в сыпучих породах

$$P_{max} = \gamma_{cp.i} H_i (1 - \sin \varphi_i), \quad (25)$$

в связных породах

$$P_{max} = (\gamma_{cp.i} \cdot H_i + C_i \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i) (1 - \sin \varphi_i) - C_i \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i. \quad (26)$$

У устья ствола в третьей стадии формируется зона разрушенных пород глубиной h_0 , наклоненная к горизонту под углом $\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$, размеры которой могут быть определены из выражений:

в сыпучих породах

$$h_0 = 2R_1 \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2} \right), \quad (27)$$

в связных породах

$$h_0 = 2R_1 \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2} \right) + \frac{2C_i}{\gamma_{cp.i}}. \quad (28)$$

Радиальная нагрузка на крепь устья ствола в этой стадии до глубины h_0 может быть определена в режиме заданной

нагрузки с использованием жесткопластической модели взаимодействия пород и крепи по методике, разработанной В.Г.Березанцевым [11] без учета сцепления пород ($C=0$).

На третьей стадии деформирования пород за крепью вертикального ствола и формирования горного давления на крепь пластические деформации в породах (не склонных к пластическому течению) окружающих крепь, стабилизируются и полностью прекращаются. Радиальная нагрузка на крепь ствола (горное давление) или сохраняет значения, сформировавшиеся в процессе ее строительства во второй стадии, или незначительно снижается за счет восстановления структурных связей в породах пластической зоны и улучшения (восстановления) их механических характеристик после завершения процессов стабилизации.

Методы расчета нагрузок на крепь вертикальных горных выработок (горного давления), пройденных в вечномерзлых четвертичных отложениях большой мощности и неустойчивых при оттаивании породах до настоящего времени не разработаны и в нормативных документах [1,2] не приведены.

Методы расчета, предложенные А.В.Надеждиным [12], Ф.Я.Новиковым [13], В.А.Сединым [14] и Э.С.Костиным [15], базирующиеся на жесткопластической модели взаимодействия оттаивающих вечномерзлых пород и крепи, не полностью отражают физические процессы, происходящие за крепью вертикальной горной выработки в процессе ее строительства и эксплуатации.

Выполненные в Гипрошахте аналогичные исследования процессов деформирования вечномерзлых пород за крепью вертикальных горных выработок, пройденных в вечномерзлых четвертичных отложениях большой мощности и неустойчивых при оттаивании породах, показали, что более целесообразно производить расчет нагрузок на крепь с использованием упругопластической и упругопластической неоднородной моделей взаимодействия пород и крепи и формирования горного давления на крепь.

При этом должны учитываться реальные физические процессы, происходящие за крепью вертикального ствола или ствола - фундамента и соответствующие им изменения физико-механических характеристик вечномерзлых пород.

При проходке ствола или ствола-фундамента вечномерзлые породы, залегающие с поверхности, устойчивы без крепи до глубины H_0 , определяемой из зависимости:

$$H_0 \leq \frac{2C_{\text{дл}} (1 + \sin \varphi_M)}{\gamma_{\text{мерз}} (1 - \sin \varphi_M) i' g \varphi_M}, \quad (20)$$

где $C_{дл}$ - характеристика предельно длительного сцепления вечномерзлых пород, МПа;

$\gamma_{м.ср}$ - усредненный удельный вес мерзлых пород, кН/м³;

φ_m - угол внутреннего трения мерзлых пород, град.

Сыпучемерзлые породы устойчивы без крепи до глубины:

$$H_0 \leq \frac{2R_1 (1 + \sin \varphi_m)}{(1 - \sin \varphi_m) \operatorname{tg} \varphi_m} . \quad (30)$$

При наличии над мерзлыми породами слоя талых пород их необходимо учитывать как пригрузку, принимая удельный вес мерзлых пород в формуле (29) эквивалентным суммарному объему пород мерзлой и талой зоны по формуле:

$$\gamma_{м.эк.} = \frac{\gamma_{м.ср} \cdot h_m + \gamma_{т.ср} \cdot h_T}{h_m} , \quad (31)$$

где $\gamma_{м.ср}$, $\gamma_{т.ср}$ - соответственно усредненный удельный вес мерзлых и талых пород, кН/м³;

h_m , h_T - толщина слоя мерзлых и талых пород по глубине, м.

При проходке ствола или ствола-фундамента в талых породах, ниже зоны вечномерзлых пород, в них будет формироваться зона пластических деформаций и зона разрушенных пород, которые будут оказывать влияние на устойчивость вышерасположенного массива вечномерзлых пород и формирование в нем зоны пластических деформаций. В этом случае устойчивость массива вечномерзлых пород глубиной менее H_0 необходимо дополнительно проверять по формуле:

$$C_{дл.ср} \geq \gamma_{м.ср} \frac{R_e^2 - R_1^2}{2R_e} , \quad (32)$$

где $C_{дл.ср}$ - усредненная характеристика предельно длительного сцепления массива вечномерзлых пород, МПа;

R_e - размер зоны пластических деформаций в талых породах в основании массива вечномерзлых пород (м), определяемый по формулам;

в сыпучих породах

$$R_e = R_1 + \frac{H_1 (1 - \sin \varphi_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{(1 + \sin \varphi_i)} , \quad (33)$$

в связных породах

$$R_e = R_L + \frac{H_i(1 - \sin \varphi_i) \operatorname{tg} \varphi_i}{(1 + \sin \varphi_i)} + \frac{2C_i}{\gamma_{cp}}, \quad (34)$$

где R_L - радиус ствола в проходке, м;
 H_i - высота массива талых пород от подошвы массива мерзлых пород до выветрелой зоны скальных пород, м;
 φ_i - угол внутреннего трения талых пород в основании массива мерзлых пород, м;
 C_i - сцепление талых пород в основании массива вечномерзлых пород, МПа;
 γ_{cp} - усредненный удельный вес массива талых пород, кН/м³.

В неустойчивых вечномерзлых породах, в которых в процессе строительства вертикальной горной выработки до глубины H_0 соотношения (29,30) не выдерживаются, необходимо устанавливать временную или постоянную крепь.

При проходке и креплении вертикальной горной выработки ниже глубины H_0 в вечномерзлых породах за крепью формируется зона пластических деформаций и зависающий объем вечномерзлых пород с поддерживающей их крепью. Породы вокруг крепи устья вертикальной горной выработки теряют устойчивость, смещаются к оси выработки, вступают в контакт с крепью, обжимают ее и совместно с крепью зависают на недеформированных вечномерзлых породах, окружающих зону пластических деформаций. Глубина вертикальной горной выработки H_1 , в пределах которой вокруг нее формируется устойчивый зависающий объем вечномерзлых пород с поддерживающей их крепью зависит от радиуса ствола в проходке, веса крепи, физико-механических характеристик пород и может быть определена из соотношений (6,7) при введении в них параметров φ_m и C_m .

Размеры зоны пластических деформаций (зоны смещений) в вечномерзлых породах вокруг вертикальной горной выработки в радиальном направлении от ее оси R_{eL} зависят от радиуса выработки в проходке, ее глубины, физико-механических характеристик пород и до глубины $H_i \leq H_1$, могут быть определены по формулам (8,9) при введении в них параметров φ_m и C_m .

Как показали исследования, при строительстве стволов или стволов-фундаментов в вечномерзлых четвертичных отложениях большой мощности и неустойчивых при оттаивании породах и их эксплуатации при положительных температурах внутреннего воздуха процессы деформирования вечномерзлых пород за крепью и

формирования горного давления на крепь можно разделить на четыре основных стадии (рис.3).

Первая стадия – стадия пластического деформирования вечномерзлых пород четвертичных отложений в процессе строительства в них вертикальной горной выработки и формирования зависающего объема вечномерзлых пород с поддерживающих их крепью.

Радиальную нагрузку на крепь вертикальной горной выработки (горное давление) P_M на этой стадии можно определить в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упруго-пластической модели взаимодействия пород и крепи по формулам: в сыпучих вечномерзлых породах ($C_{от} = 0; \rho_{от} \neq 0$)

$$P_{1M} = \gamma_{ср.м} \cdot H_M (1 - \sin \varphi_M) \left(\frac{R_1}{R_{с.1}} \right)^{\alpha}, \quad (35)$$

в связных вечномерзлых породах ($C_{от} \neq 0; \rho_{от} \neq 0$),

$$P_{1M} = (\gamma_{ср.м} \cdot H_M + C_M \cdot \text{ctg} \varphi_M) (1 - \sin \varphi_M) \left(\frac{R_1}{R_{с.1}} \right)^{\alpha} - C_M \cdot \text{ctg} \varphi_M, \quad (36)$$

где $\alpha = \beta - 1 = \frac{2 \sin \varphi_M}{(1 - \sin \varphi_M)}$; (37)

β – характеристика условия пластичности (прочности) Кулона–Мора, $\beta = \frac{(1 + \sin \varphi_M)}{(1 - \sin \varphi_M)}$; (38)

H_M – глубина массива мерзлых пород от поверхности, м;
 $R_{с.1}$ – размер зоны пластических деформаций (зоны смещений) от оси ствола, м.

Вторая стадия – стадия пластического деформирования оттаивающих за крепью вертикальной горной выработки вечномерзлых пород и формирования за крепью зависающего объема оттаивающих пород.

Радиальную нагрузку на крепь вертикальной горной выработки (горное давление) – $P_{2.от}$ на этой стадии можно определить в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упругопластической модели взаимодействия пород и крепи по формуле:

$$P_{2.от} = (\gamma_{от} \cdot H_{от} + C_{от} \cdot \text{ctg} \varphi_{от}) (1 - \sin \varphi_{от}) \left(\frac{R_1}{R_{с.от}} \right)^{\alpha} - C_{от} \cdot \text{ctg} \varphi_{от}, \quad (39)$$

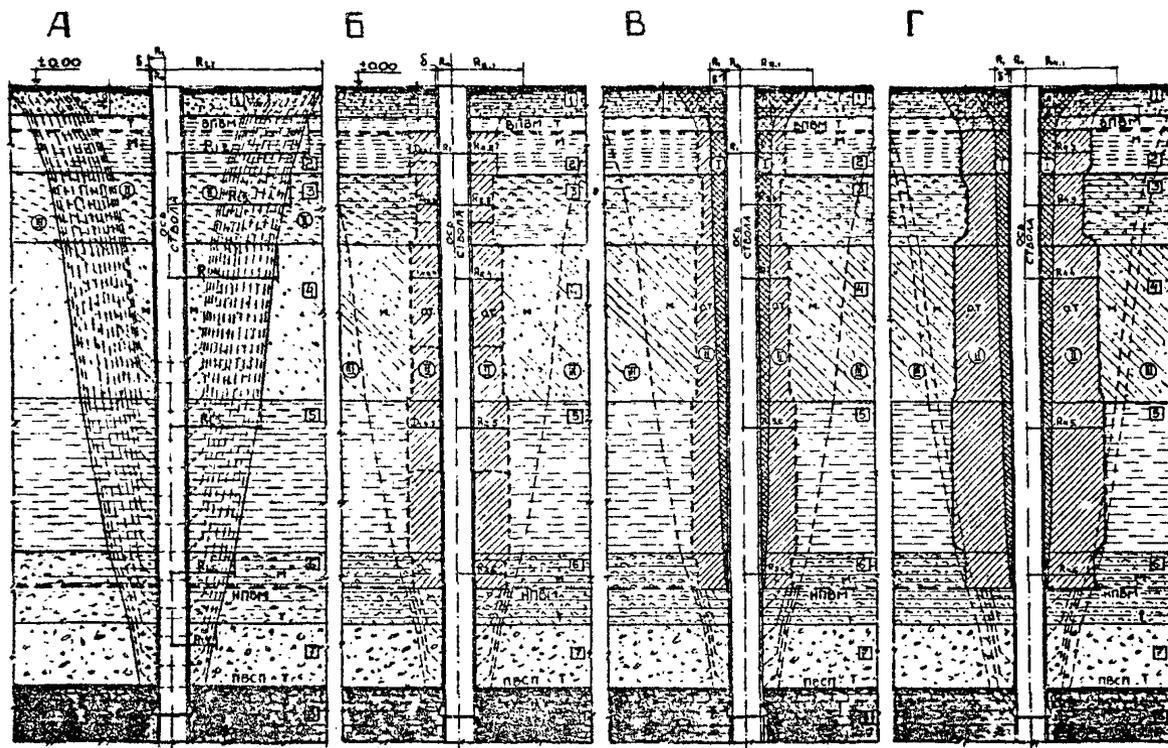


Рис. 3. Схема деформирования вечномёрзлых четвертичных отложений вокруг ствола в процессе его строительства и эксплуатации; А-первая стадия; Б-вторая стадия; В-третья стадия; Г-четвертая стадия; ① - зона разрушенных пород; ② - зона пластических деформаций; ③ - недеформированная зона

где $\gamma_{от}$ - удельный вес оттаивающих мерзлых пород, кН/м³;
 $C_{от}$ - сцепление оттаивающих мерзлых пород, МПа;
 $\varphi_{от}$ - угол внутреннего трения оттаивающих мерзлых пород, град;
 $H_{от}$ - глубина массива оттаивающих вечномерзлых пород, м;
 $R_{e.от}$ - размер зоны пластических деформаций в оттаивающих мерзлых породах от оси ствола на рассматриваемой глубине, определяемый по формулам:
 в сыпучих породах

$$R_{e.от} = R_1 + \frac{H_{от}(1 - \sin \varphi_{от}) \operatorname{tg} \varphi_{от}}{(1 + \sin \varphi_{от})}, \quad (40)$$

в связных породах

$$R_{e.от} = R_1 + \frac{H_{от}(1 - \sin \varphi_{от}) \operatorname{tg} \varphi_{от}}{(1 + \sin \varphi_{от})} + \frac{2C_{от}}{\gamma_{от}}. \quad (41)$$

В сыпучих породах ($C_{от} = 0$) выражение (39) может быть преобразовано к виду:

$$P_{2от} = \gamma_{от} \cdot H_{от}(1 - \sin \varphi_{от}) \left(\frac{R_1}{R_{eот}} \right)^2. \quad (42)$$

Вертикальная составляющая горного давления на крепь вертикальной горной выработки (от веса зависающих на крепи оттаивающих пород) на этой стадии может быть определена по формуле:

$$P_{2от}^e = \gamma_{от} \cdot H_{от} \left(\frac{R_1}{R_{eот}} \right)^2. \quad (43)$$

Механические характеристики пород $C_{от}$ и $\varphi_{от}$ на этой стадии должны определяться по результатам полевых или лабораторных исследований вечномерзлых пород при их оттаивании (неконсолидированное состояние).

Третья стадия - стадия смещения за крепью вертикальной горной выработки объема оттаявших вечномерзлых пород (разрушения свода нагрузки) и формирования в нем зоны разрушений и зоны пластических деформаций.

В соответствии с исследованиями Н.С.Бульчева [16], А.В.Надеждина [13], В.А.Седина [14], Э.С.Костина [15] и А.Б.Кондратова [17] размеры зоны разрушенных оттаявших пород за крепью вертикальной горной выработки на глубине $H_0 = R_1 \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\rho_{\text{от}}}{2} \right)$ не превышают радиус ствола в проходке R_1 .

Размеры пластической зоны (зоны смещений), от оси ствола, в оттаявших за крепью вечномерзлых породах на рассматриваемой глубине определяются выражениями (40) и (41).

Радиальная нагрузка на крепь вертикальной горной выработки (горное давление) на этой стадии может быть определена в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упругопластической и упругопластической неоднородной модели взаимодействия пород и крепи по формуле:

$$\rho_{3.0T} = \gamma_{\text{от.ср}} \cdot H_{0T} (1 - \sin \varphi_{0T}) \left(\frac{R_1}{R_{e.0T}} \right)^{\alpha} \quad (44)$$

где $\gamma_{\text{от.ср}}$ - усредненный удельный вес оттаявших пород, кН/м³.

Вертикальная составляющая горного давления на крепь в этот период может быть принята равной $\rho_{3.0T}^0 = 0,01 \text{ МПа}$.

У устья вертикальной горной выработки в третьей стадии формируется зона смещений, наклоненная к горизонту под углом

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\rho_{\text{от}}}{2}.$$

Поэтому нагрузка на крепь устья вертикальной горной выработки до глубины $H_0 = 2R_1 \cdot \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\rho_{\text{от}}}{2} \right)$ может быть определена по методике В.Г.Березанцева [11] без учета сцепления пород ($C_{0T} = 0$).

Четвертая стадия - стадия консолидации и упрочнения пород в пределах первоначальной зоны разрушения (сползающего объема) и формирования на них вторичного зависающего объема оттаивающих пород.

На этой стадии радиальная нагрузка на крепь вертикальной горной выработки не увеличивается, так как восстановление в оттаявших породах структурного трения и сцепления не может привести к увеличению радиального давления на крепь.

В породах, склонных после оттаивания к пластическому течению радиальную нагрузку на крепь можно определить по методике Н.С.Бульчева [3].

В зонах, в которых после проходки вертикальной горной выработки и оттаивания вечномерзлых пород формируется гидро-

статическое давление, суммарное радиальное давление на крепь может превысить радиальное давление во второй стадии, что необходимо учитывать при расчете нагрузок на крепь в третьей стадии.

В устойчивых вечномерзлых породах, которые при оттаивании за крепью ствола сохраняют свою структурную прочность и пластические деформации которых не сопровождаются процессами их разрушения, горное давление на крепь увеличивается прямопропорционально увеличению размеров зоны оттаивания (ореола оттаивания) в вечномерзлых породах за крепью ствола или ствола-фундамента и его можно определять в режиме заданной нагрузки с использованием жесткопластической модели взаимодействия пород и крепи.

Радиальная нагрузка на крепь ствола определяется по формуле:

$$P_{от} = \frac{\gamma_{от.ср} \cdot R_{от.мах}}{2 \operatorname{tg} \varphi_{от.i}} \left(1 - e^{-\frac{2(1 - \sin \varphi_{от.i}) \operatorname{tg} \varphi_{от.i} \cdot H_{от.i}}{(1 + \sin \varphi_{от.i}) R_{от.мах}}} \right). \quad (45)$$

На глубине, где $H_{от} > 5R_{от.мах}$, вторым множителем выражения (45) можно пренебречь. Тогда максимальная радиальная нагрузка на крепь ствола от зависших на крепи и мерзлых породах объема оттаявших пород составит:

$$P_{от.мах} = \frac{\gamma_{от.ср} \cdot R_{от.мах}}{2 \operatorname{tg} \varphi_{от.i}}. \quad (46)$$

Вертикальная составляющая горного давления $P_{от}^b$ на крепь ствола может быть получена из выражения (45) при подстановке в него значения коэффициента бокового давления

$$\lambda_{от} = \frac{P_{от}}{P_{от}^b} = (1 - \sin \varphi_{от}), \quad (47)$$

которое принимает вид

$$P_{от}^b = \frac{\gamma_{от.ср} \cdot R_{от.мах}}{2(1 - \sin \varphi_{от}) \cdot \operatorname{tg} \varphi_{от.i}} \left(1 - e^{-\frac{2(1 - \sin \varphi_{от.i}) \operatorname{tg} \varphi_{от.i} \cdot H_{от.i}}{(1 + \sin \varphi_{от.i}) R_{от.мах}}} \right). \quad (48)$$

На глубине, где $H_{от} > 5R_{от.max}$ выражение (48) может быть приведено к виду

$$P_{от.max}^6 = \frac{\gamma_{от.ср} \cdot R_{от.max}}{2(1 - \sin \varphi_{от.i}) \operatorname{tg} \varphi_{от.i}} \quad (49)$$

Используя предложенную Г.А.Крупениковым [4] формулу для определения экстремальных нагрузок на крепь ствола (с учетом трехсигмового предела), которая имеет вид

$$\left. \begin{matrix} P_{max} \\ P_{min} \end{matrix} \right\} = P_0 \pm P_2 = \bar{P} (1 \pm 3\nu), \quad (50)$$

где \bar{P} - замеренная нагрузка на крепь;
 ν - статистический коэффициент неравномерности нагрузок и приведенные Г.К.Клейном [19] усредненные расчетные значения коэффициентов Пуассона и коэффициента бокового давления для различного типа грунтов в состоянии покоя и при возможности их бокового расширения (в пределах зоны пластических деформаций и зоны разрушенных пород за крепью ствола) на различных стадиях их совместного деформирования с крепью вычислены усредненные значения коэффициентов неравномерности радиальных нагрузок на крепь вертикального ствола ω_{cp} и соответствующие им максимальные значения коэффициентов статистической неравномерности распределения нагрузок на крепь - ν_{max} .

Полученные аналитическим путем коэффициенты неравномерности распределения радиальных нагрузок на крепь ствола хорошо согласуются с экспериментально полученными Г.А.Крупениковым и Н.А.Филатовым, [5], значения которых составляют: в песчаных и пластичных породах 0,12-0,2; в нарушенных хрупких породах 0,3-0,4.

При значениях касательных нагрузок на крепь $q \approx 2P_2$ расчетная толщина крепи ствола может быть определена по формуле

$$\delta_{кр} = R_0 \left(\sqrt{\frac{R_0}{R_0 - 2P_0(1 + \omega_{cp})}} - 1 \right), \quad (51)$$

где P_0 - расчетная радиальная нагрузка на крепь, КПа.

В практических расчетах в формулу (51) необходимо ввести коэффициенты, учитывающие условия бетонирования и твердения монолитной бетонной крепи, приведенные в СНИП 2.03-01-84

[20] . Коэффициент условий работы крепи $m_{\gamma} = 1,25$ в расчет не вводится, так как возможная неравномерность радиальных (горизонтальных) нагрузок на крепь учтена формулой (51).

Коэффициент надежности по нагрузке от веса пород принимается по СНиП П-94-80 [1] .

В конкретных условиях строительства усредненные коэффициенты неравномерности радиальных нагрузок на крепь могут быть уточнены на основании значений механических характеристик пород, полученных лабораторными методами при бурении контрольно-стволовых и инженерно-геологических скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП П-94-80. Подземные горные выработки. - М.: Стройиздат, 1982, С.11-16.
2. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. - М.: Стройиздат, 1983, С.39-47.
3. Булычев И.С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982.
4. Крупеников Г.А., Булычев И.С., Козел А.М., Филатов Н.А. Взаимодействие массивов горных пород с крепью вертикальных выработок. - М.: Недра, 1986.
5. Крупеников Г.А., Филатов Н.А. Некоторые результаты лабораторного исследования проявления горного давления в вертикальных выработках при пологом залегании пластов. // Шахтное строительство. 1982, №№ 10,11.
6. Борисов А.А., Нифонтов Б.И., Шабалин А.М. Моделирование взаимодействия массива пород с крепью вертикальных выработок. - Л.: Наука, 1972.
7. Кондратов А.Б. Деформирование и разрушение несвязного породного массива вокруг закрепленной вертикальной выработки. // В сб. науч. трудов - Механика подземных сооружений. - Тула: Изд. ТПИ, 1984, С.66-70.
8. Фисенко Г.Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок. - М.: Недра, 1976, С.151-164.
9. Феннер Р. Исследование горного давления. // В кн.: Вопросы теории горного давления - М.: Госгортехиздат, 1961.
10. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах. // В кн.: Вопросы теории горного давления. М.: Госгортехиздат, 1961.

11. Березанцев В.Г. Осесимметричная задача теории пренебрежного равновесия сыпучей среды. -М.:ГИТТЛ, 1952.
12. Надеждин А.В. Исследование на модели устойчивости стенок незакрепленной вертикальной выработки. Основания, фундаменты и механика грунтов. №1.-М.: Стройиздат, 1965, С. 22-23.
13. Новиков Ф.Я. Давление оттаивающих грунтов на крепь вертикальных выработок. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания в г.Воркуте. Сб.НИИОСП.-М.:Изд.ЦИТП, 1975, С.137-141.
14. Седин В.А. Исследование причин нарушения крепи вертикальных шахтных стволов, эксплуатируемых в зоне многолетнемерзлых пород и разработка рекомендаций по повышению устойчивости крепи в условиях шахт ПО "Воркутауголь": Автореферат дисс.на соиск.учен.степ. к.т.н. - Л.:Ротопринт ГИПШ, 1975.
15. Костин Э.С. "Исследование и разработка методики расчета крепи устья ствола-фундамента надшахтных сооружений, пройденного в вечномерзлых четвертичных отложениях": Диссертация на соиск.учен.степени канд.техн.наук. - Л.:Ротопринт ГИПШ, 1980.
16. Бульчев Н.С., Амусин Ю.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок.-М.:Недр, 1974.
17. Кондратов А.Б. Деформирование и разрушение несвязного породного массива вокруг закрепленной вертикальной выработки./В сб.научн.трудов - Механика подземных сооружений.- Тула; Изд. ТПИ, 1984, С.66-70.
18. Разработка технических требований для проектирования рациональных типов крепи и мер их охраны в Печорском угольном бассейне. Этап 023014101. Провести исследования по обоснованию исходных требований на разработку рекомендаций по проектированию стволов и надшахтных сооружений в Печорском угольном бассейне. Подэтап 504002. Разработать предварительные рекомендации по методике расчета крепи стволов-фундаментов надшахтных сооружений: Отчет о НИР (промежуточный)/ Гипрошахт: Руководитель и ответственный исполнитель Э.С.Костин-Инь, №02890039559, № ГР 01870094895 - Л., 1988.
19. Клеин Г.К. Строительная механика сыпучих тел.-М.: Стройиздат, 1977.
20. СНиП 2.03-01-84. Бетонные и железобетонные конструкции.-М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1985.

Ответственный за выпуск С. В. ИНОЗЕМЦЕВА
Редактор Е. Ф. ДЕРЕВЯНЧЕНКО

Сдано в производство 30.XI.90. Формат 60x90/16.
Офс. печ. Тираж 500. Заказ 948. Уч.-изд. л. 1,32.
ЦЕНТИ Минуглепрома СССР.
Цех оперативной полиграфии ЦЕНТИ Минуглепрома СССР
340000, г. Донецк, ул. Артема, 60.