МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРЕПИ СТВОЛОВ И СТВОЛОВ-ФУНДАМЕНТОВ НАДШАХТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Донецк-1990

gost.e-ecolog.ru

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 шурфах-фундаментах диаметром в свету 2,5–3,0м, пройденных вокруг ствола до невыветрелой зоны скальных пород.

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

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

Учитывая, что возведение шурфов-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.

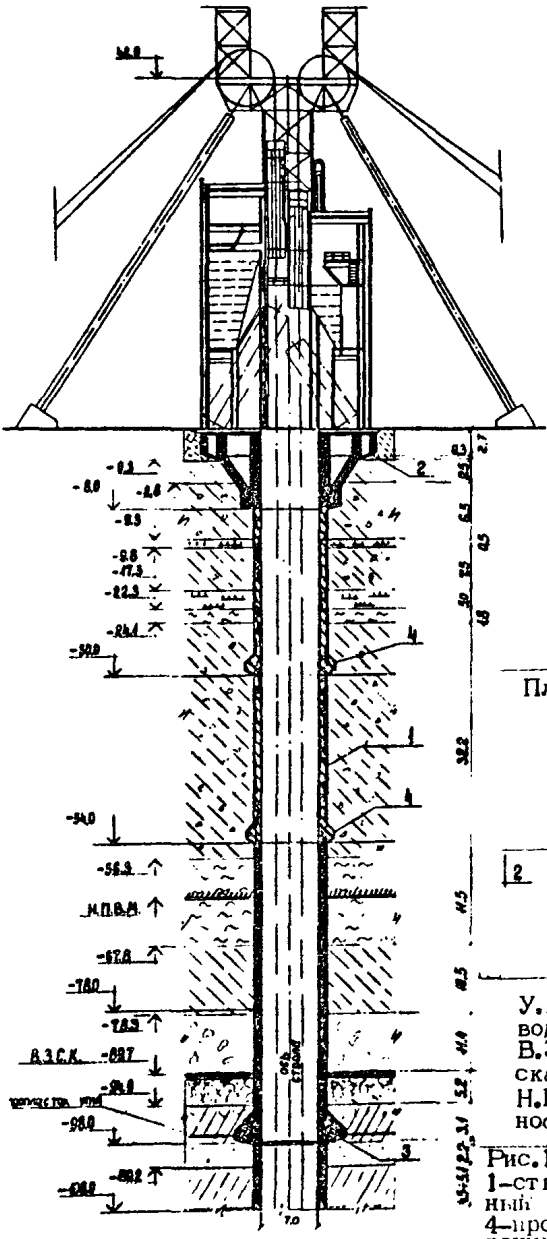
Внедрение в практику шахтного строительства нового прогрессивного метода возведения надшахтных сооружений в северной климатической зоне СССР с опиранием на крепь стволов-фундаментов связано с необходимостью разработки методики их расчета на различные виды загружения, в том числе и на горное давление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

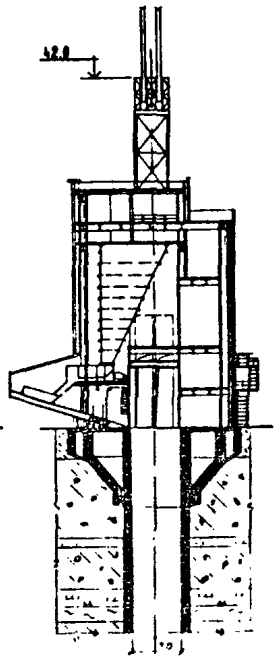
Крепь нагружается в процессе совместного деформирования (контактного взаимодействия) с массивом пород, вследствие чего нагрузки на крепь (напряжения на контакте крепи с массивом) принципиально не могут быть заданы априорно, как исходные данные к расчету, а должны определяться в процессе единого расчета 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], натурных [7] и аналитических исследований [8] показывает, что в процессе вза-

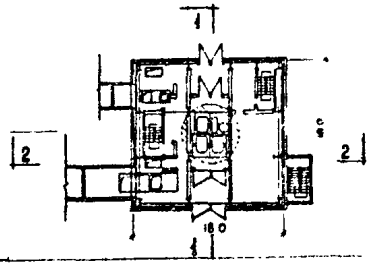
Разрез 1-1



Разрез 2-2



План на отметке ± 0.000



У.Г.В – уровень грунтовых вод;
В.З.С.К – выветрелая зона скальных пород;
Н.П.В.М – нижняя поверхность вечной мерзлоты

Рис.1. Сечение ствола:
1–ствол-фундамент; 2–опорный башмак; 3–устье ствола; 4–промежуточные опорные венцы

имодействия 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 $(c=0;\ \varphi\neq 0)$

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

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

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

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

$$c \geq 0{,}75 R_1 \gamma. \qquad (3)$$

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

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

в связных породах

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

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:

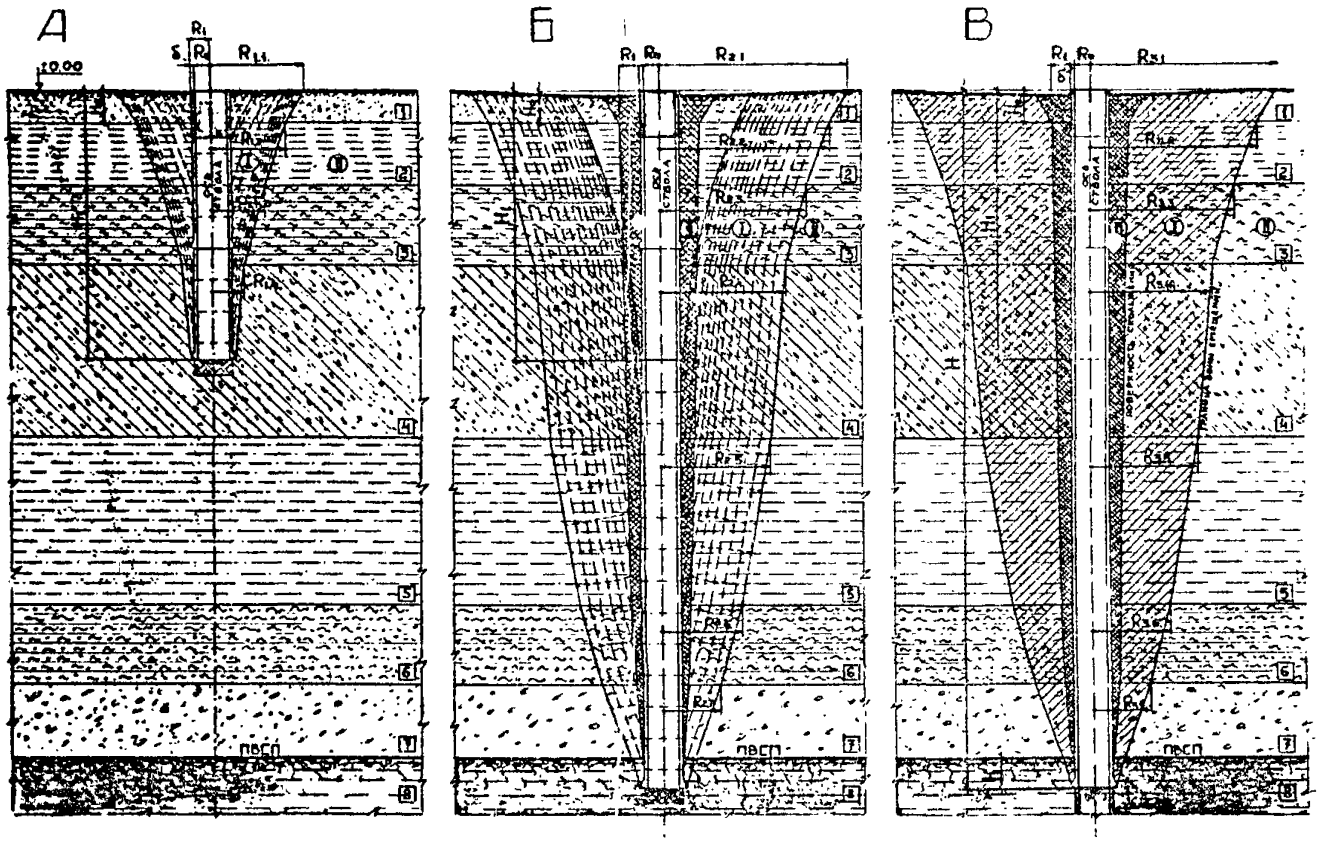


Рис. 2. Схема деформирования четвертичных отложений вокруг вертикального ствола; А–первая стадия; Б–вторая стадия; В–третья стадия; (I) –зона пластических деформаций; (II) –недеформированная зона; (III) –зона разрушенных пород

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

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

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

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

где R_1 – радиус ствола в проходке, м;

R_0 – радиус ствола в свету, м;

$\gamma_к$ – удельный вес крепи, кН/м^3;

γ – удельный вес пород, кН/м^3;

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 – $R_{1,i}$ до глубины $H_i \leq H_1$ могут быть определены по формулам:

в сыпучих породах

$$R_{e1,i} = R_1 + \frac{(H_1 - H_i)(1 - \sin\varphi_i) tg\varphi_i}{(1 + \sin\varphi_i)}, \quad (8)$$

в связных породах

$$R_{e1,i} = R_1 + \frac{(H_1 - H_i)(1 - \sin\varphi_i) tg\varphi_i}{(1 + \sin\varphi_i)} + \frac{2C_i}{\gamma_{cp.i}}, \quad (9)$$

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/м^3.

Радиальная нагрузка на крепь вертикального ствола (горное давление) $P_{1.i}$ может быть определена в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упругопластической модели взаимодействия пород и крепи по формулам

в сыпучих породах

$$P_{1.i} = \gamma_{ср.i} \cdot H_i (1 - \sin\varphi_i) \left(\frac{R_1}{R_{e1.i}}\right)^{\alpha}, \qquad (10)$$

в связных породах

$$P_{2.i} = \left(\gamma_{ср.i} \cdot H_i + C_i \operatorname{ctg}\varphi_i\right)(1 - \sin\varphi_i)\left(\frac{R_1}{R_{e1.i}}\right)^{\alpha} - C_i \operatorname{ctg}\varphi_i, \qquad (11)$$

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

β – характеристика условия пластичности (прочности) Кулона–Мора

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

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 $R_{e2.i}$ в процессе проходки непрерывно увеличиваются и на рассматриваемом ярусе по глубине H_i могут быть определены по формулам:

в сыпучих породах

$$R_{e2.i} = R_1 + \frac{(H - H_i)(1 - \sin\varphi_i)\operatorname{tg}\varphi_i}{(1 + \sin\varphi_i)}, \qquad (14)$$

в связных породах

$$R_{e2.i} = R_1 + \frac{(H - H_i)(1 - \sin\varphi_i)\operatorname{tg}\varphi_i}{(1 + \sin\varphi_i)} + \frac{2C_i}{\gamma_{ср.i}}, \qquad (15)$$

где H – глубина четвертичных отложений от поверхности до невыветрелой зоны скальных пород, м.

Если принять, что зона разрушенных пород за крепью вертикального ствола на глубине $H_0 = R_1 \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$ не превышает радиуса ствола в проходке, то до глубины, где $R_{e2.i} \geq 4R_1$ – размер зоны разрушенных пород – R_{ci} от оси ствола можно принять равным $R_{ci} = 2R_1$ (16)

На большей глубине, где $R_{e2.i} < 4R_1$ размер зоны разрушенных пород – R_{ci} с достаточной точностью можно определить из соотношения:

$$R_{ci} \leq 0.33.3(R_{e2.i} - R_1) + R_1. \qquad (17)$$

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, радиальная нагрузка на крепь вертикального ствола (горное давление) $P_{2.i}$ определяется по формулам:

в сыпучих породах

$$P_{2i} = \gamma_{ср.i} \cdot H_i (1 - \sin\varphi_i) \left(\frac{R_1}{R_{e2.i}}\right)^{\alpha}, \qquad (18)$$

в связных породах

$$P_{2i} = (\gamma_{ср.i} \cdot H_i + C_i \cdot ctg\varphi_i)(1 - \sin\varphi_i)\left(\frac{R_1}{R_{e2.i}}\right)^{\alpha}. \qquad (19)$$

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) $P_{2.i}$ определяется по формулам:

в сыпучих породах по формуле (18),

в связных породах

$$P_{2i} = (\gamma_{ср.i} \cdot H_i + C_i \cdot ctg\varphi_i)(1 - \sin\varphi_i)\left(\frac{R_1}{R_{e2.i}}\right)^{\alpha} - C_i ctg\varphi_i \left(\frac{R_1}{R_{e2.i}}\right)^{\alpha}. \qquad (20)$$

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:

$$P_{2i} = \gamma_{ср} \cdot H_i - C_i \left(1 + 2 \ln \frac{R_{e2.i}}{R_1}\right), \qquad (21)$$

где $R_{e2.i}$ – размер зоны пластических деформаций (м), определяемый из выражения $R_{e2.i} = R_1 + \frac{2C_i}{\gamma_{ср.i}}$ (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

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

в связных породах

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

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

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

в связных породах

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

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

в сыпучих породах

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

в связных породах

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

Радиальная нагрузка на крепь устья ствола в этой стадии до глубины h_o 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 (С=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 Но, определяемой из зависимости:

$$H_o \leq \frac{2C_{an}(1+\sin\varphi_M)}{\gamma_{м.ер}(1-\sin\varphi_M)\operatorname{tg}\varphi_{A1}}, \qquad (28)$$

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

$\gamma_{м.ср}$ – усредненный удельный вес мерзлых пород, кН/м^3;

$\varphi_м$ – угол внутреннего трения мерзлых пород, град.

Сыпучемерзлые породы устойчивы без крепи до глубины:

$$H_0 \leq \frac{2R_1(1+\sin\varphi_м)}{(1-\sin\varphi_м)\,tg\varphi_м}. \qquad (30)$$

При наличии над мерзлыми породами слоя талых пород их необходимо учитывать как пригрузку, принимая удельный вес мерзлых пород в формуле (28) эквивалентным суммарному объему пород мерзлой и талой зоны по формуле:

$$\gamma_{м.эк.} = \frac{\gamma_{м.ср}\cdot h_м + \gamma_{т.ср}\cdot h_т}{h_м}, \qquad (31)$$

где $\gamma_{м.ср}, \gamma_{т.ср}$ – соответственно усредненный удельный вес мерзлых и талых пород, кН/м^3;

$h_м, h_т$ – 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 Но необходимо дополнительно проверять по формуле:

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

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

$$R_e = R_1 + \frac{H_i(1-\sin\varphi_i)\,tg\varphi_i}{(1+\sin\varphi_i)}, \qquad (33)$$

в связных породах

$$R_e = R_1 + \frac{H_i(1-\sin\varphi_i)\,tg\varphi_i}{(1+\sin\varphi_i)} + \frac{2C_i}{\gamma_{cp}}, \quad (34)$$

где R_1 – 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/м^3.

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

При проходке и креплении вертикальной горной выработки ниже глубины Но 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 $\varphi_м$ и $C_м$.

Размеры зоны пластических деформаций (зоны смещений) в вечномерзлых породах вокруг вертикальной горной выработки в радиальном направлении от ее оси R_{e1} 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 $\varphi_м$ и $C_м$.

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) Рм на этой стадии можно определить в режиме взаимовлияющей деформации с использованием упругопластической модели взаимодействия пород и крепи по формулам:

в сыпучих вечномерзлых породах $(C_{от} \approx 0;\ \varphi_{от} \neq 0)$

$$P_{1м} = \gamma_{ср.м} \cdot H_м (1 - \sin\varphi_м) \left(\frac{R_1}{R_{e1}}\right)^{\alpha}, \qquad (35)$$

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

$$P_{1м} = \left(\gamma_{ср.м} \cdot H_м + C_м \cdot ctg\varphi_м\right)(1 - \sin\varphi_м)\left(\frac{R_1}{R_{e.1}}\right)^{\alpha} - C_м \cdot ctg\varphi_м, \qquad (36)$$

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

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

$H_м$ – глубина массива мерзлых пород от поверхности, м;

R_{e1} – 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:

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

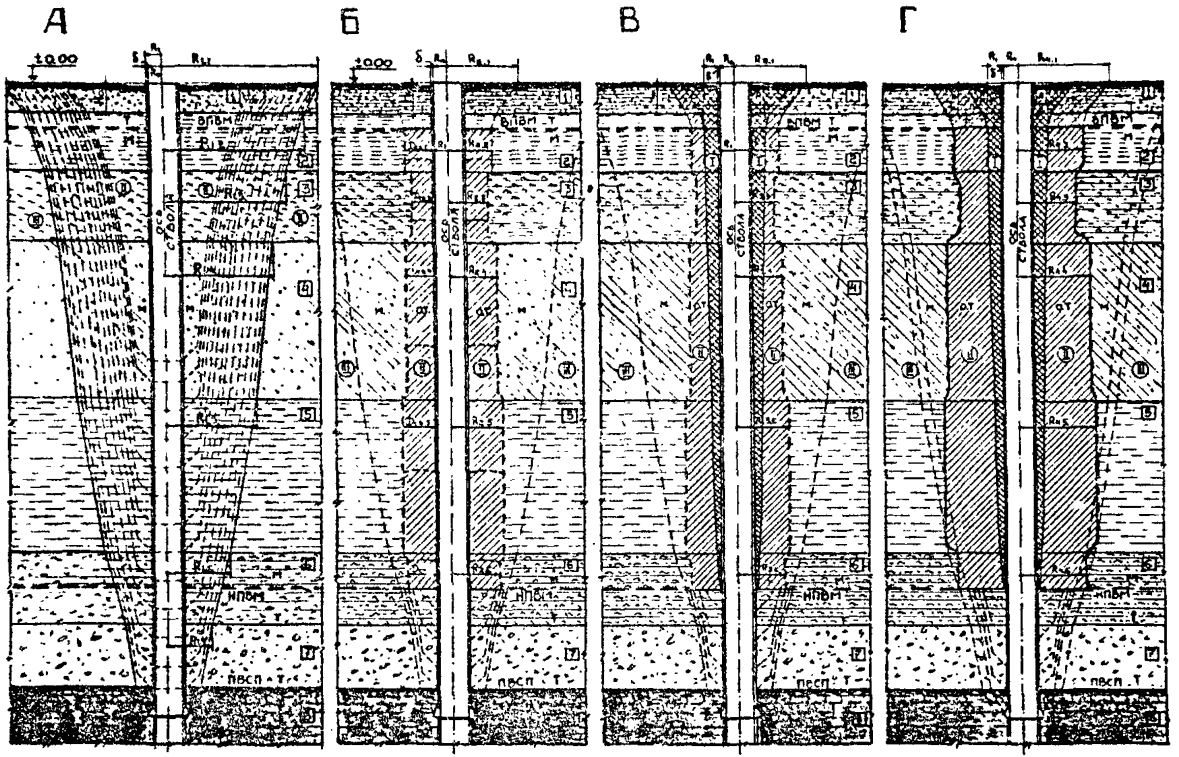


Рис. 3. Схема деформирования вечномерзлых четвертичных отложений вокруг ствола в процессе его строительства и эксплуатации; А-первая стадия; Б-вторая стадия; В-третья стадия; Г-четвертая стадия; (I) -зона разрушенных пород; (II) -зона пластических деформаций; (III) - недеформированная зона

где $\gamma_{от}$ – удельный вес оттаивающих мерзлых пород, кН/м^3;

$C_{от}$ – сцепление оттаивающих мерзлых пород, МПа;

$\varphi_{от}$ – угол внутреннего трения оттаивающих мерзлых пород, град;

$H_{от}$ – глубина массива оттаивающих вечномерзлых пород, м;

$R_{е.от}$ – размер зоны пластических деформаций в оттаивающих мерзлых породах от оси ствола на рассматриваемой глубине, определяемый по формулам:

в сыпучих породах

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

в связных породах

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

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

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

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

$$P^{в}_{2от} = \gamma_{от} \cdot H_{от}\left(\frac{R_1}{R_{еот}}\right)^{\alpha}. \qquad (43)$$

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.Булычева [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 $Но = R_1 tg\left(45° + \frac{\varphi_{от}}{2}\right)$ 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:

$$P_{з.от} = \gamma_{от.ср} \cdot H_{от}(1 - \sin\varphi_{от})\left(\frac{R_1}{R_{е.от}}\right)^{\alpha}, \qquad (44)$$

где $\gamma_{от.ср}$ – усредненный удельный вес оттаявших пород, кН/м^3.

Вертикальная составляющая горного давления на крепь в этот период может быть принята равной $P^{в}_{з.от}$ =0,01МПа.

У устья вертикальной горной выработки в третьей стадии формируется зона смещений, наклоненная к горизонту под углом $\alpha = 45° + \frac{\varphi_{от}}{2}$.

Поэтому нагрузка на крепь устья вертикальной горной выработки до глубины $Но = 2R_1 tg\left(45° + \frac{\varphi_{от}}{2}\right)$ может быть определена по методике В.Г.Березанцева [11] без учета сцепления пород ($С_{от}$=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.Булычева [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:

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

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

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

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

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

которое принимает вид

$$P^{в}_{от} = \frac{\gamma_{от.ср} \cdot R_{от.max}}{2(1-\sin\varphi_{от}) \cdot tg \varphi_{от.i}} \left(1 - e^{\frac{-2(1-\sin\varphi_{от.i}) tg \varphi_{от.i} \cdot H_{от.i}}{(1+\sin\varphi_{от.i}) R_{п.max}}}\right). \quad (48)$$

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

$$P^{в}_{от.max} = \frac{\gamma_{от.ср} \cdot R_{от.max}}{2(1-\sin\varphi_{от.i})\,tg\varphi_{от.i}}. \qquad (49)$$

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

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

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 $\omega_{ср}$ 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.Крупенниковым 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

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

где P_0 – расчетная радиальная нагрузка на крепь, КПа.

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

[20] . Коэффициент условий работы крепи m_4 =1,25 в расчете 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.38-47.

3. Булычев И.С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982.

4. Крупенников Г.А., Булычев Н.С., Козел А.М., Филатов Н.А. Взаимодействие массивов горных пород с крепью вертикальных выработок. -М.: Недра, 1966.

5. Крупенников Г.А., Филатов Н.А. Некоторые результаты лабораторного исследования проявления горного давления в вертикальных выработках при пологом залегании пластов. // Шахтное строительство. 1962, №№ 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.научн.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 предельного 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. Булычев Н.С., Амусин Ю.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок.–М.:Недра, 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–Инв.№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.X1.90. Формат 60x90/16.
Офс.печ. Тираж 500. Заказ 943. Уч.-изд.л. 1,32.
ЦБНТИ Минуглепрома СССР.
Цех оперативной полиграфии ЦБНТИ Минуглепрома СССР
340000, г.Донецк, ул.Артема,60.

gost.e-ecolog.ru