

УДК 622.25.(06)

М.С. Плешко

КРЕПЬ ГЛУБОКИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ. ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Рассмотрено современное состояние вопроса строительства стволов. Предложена новая концепция проектирования. Представлены результаты математического моделирования, лабораторных испытаний и шахтных исследований по обоснованию оптимальных параметров крепи стволов.

Ключевые слова: вертикальный ствол, крепь, методика проектирования, бетон, анкер.

Семинар № 19

Средняя глубина сооружаемых в настоящее время вертикальных стволов в нашей стране составляет около 1000 м при максимальных значениях более 2 км. На их долю приходится до 30% стоимости и 50% общей продолжительности строительства шахты или рудника, при этом до 60% затрат связаны с креплением выработок. Это вызвано тем, что с переходом горных работ на большие глубины и ухудшением горно-геологических условий, проектная несущая способность крепи повышена в среднем в 2 раза, затраты на материалы крепи выросли в 1,5 - 2,0 раза, трудоемкость - в 2 - 2,5 раза, а производительность труда уменьшилась в 1,3 - 1,8 раза. Несмотря на это более 50% эксплуатируемых глубоких вертикальных стволов имеют те или иные нарушения крепи.

Низкий уровень технико-экономических показателей крепления и эксплуатации стволов обуславливается, прежде всего, недостаточной исходной базой для проектирования, невысокой научной обоснованностью конструктивных, технических и технологических разработок, ограниченностью используемых решений по повышению несущей способности кре-

пи, основанных на экстенсивных принципах.

Фундаментальные исследования последних лет в сфере геомеханики и строительной геотехнологии позволяют утверждать, что поиск и разработка решений в области крепления глубоких стволов должны осуществляться в первую очередь не за счет повышения толщины и материалаемкости крепи, а путем перехода к инновационным принципам проектирования, учитывающим весь комплекс влияющих факторов, активного внедрения передовых конструктивных и технологических решений на основе широкого применения средств упрочнения массива, высокоеффективных составов бетона, прогрессивных схем проходки и др.

В качестве базиса для разработки таких решений предлагается инновационная концепция проектирования (рис. 1), ключевой предпосылкой которой является возможность оперативной корректировки проекта крепления в период строительства ствола, вследствие уточнения первоначальных исходных данных и анализа состояния крепи и массива на различных участках и стадиях строительства.

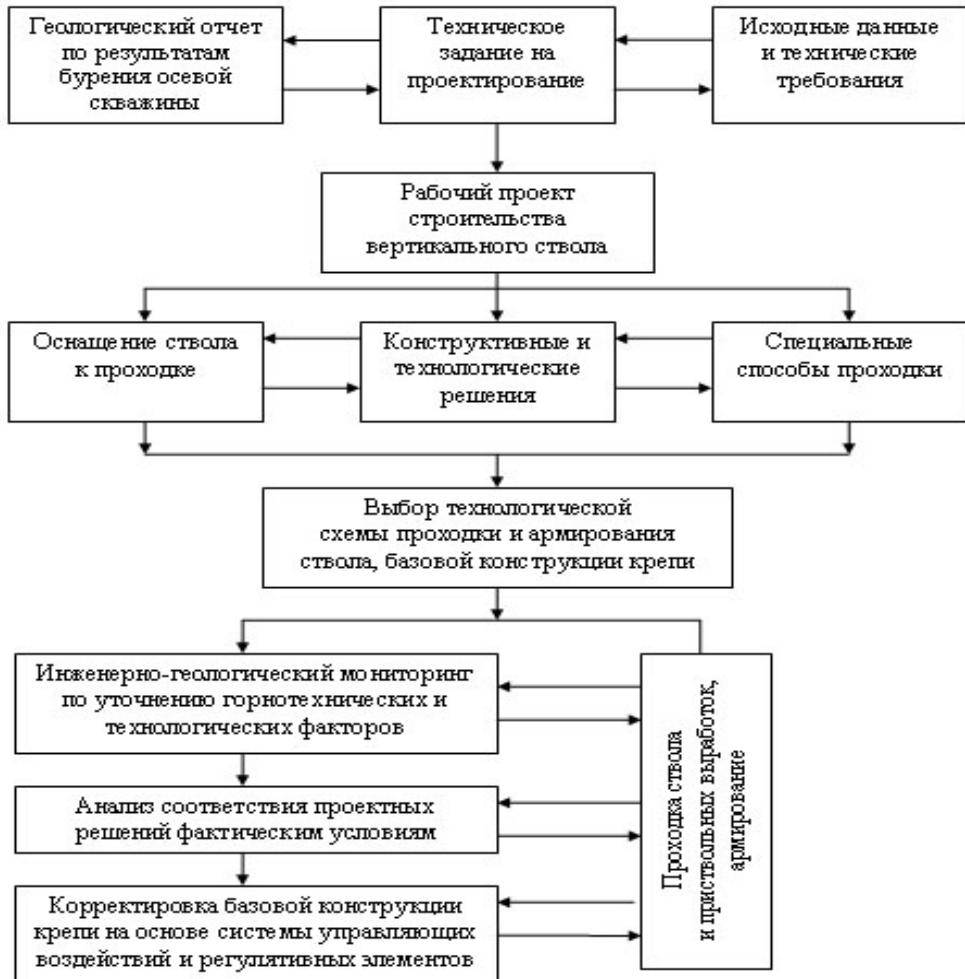


Рис. 1. Блок схема проектирования глубоких вертикальных стволов

Такой подход предоставляет возможность с одной стороны в полной мере оценить физико-механические и структурные свойства вмещающего массива, а с другой — выполнить комплексную оценку влияния технологии работ на протекание геомеханических процессов в рассматриваемой системе.

Второй важной предпосылкой концепции является переход при разработке проектных решений от стандартной системы «крепь — массив» к

исследованию системы «крепь — регулятивный элемент — породный массив», где в качестве регулятивных элементов могут рассматриваться дополнительные конструктивные и технологические решения, а также непосредственно сами основная крепь и контактирующий с ней массив, как главные взаимодействующие элементы системы.

Технология работ при этом выступает как методологическая функция, а ее основные характеристики совме-

стно с горно-геологическими условиями составляют исходную базу для проведения исследований и анализа результатов.

Так при совмещенной схеме проходки в качестве отдельного этапа следует выделить взаимодействие твердеющей монолитной бетонной крепи, представляющей оболочку переменного сопротивления, с породным массивом в призабойной зоне. На основе исследования объемной нелинейной математической модели призабойного участка ствола, разработанной с помощью программного комплекса «Лира-windows-9.4», реализующего метод конечных элементов, установлено, что увеличение отношения между средним модулем деформации бетона в раннем (1 - 7 сут.) и проектном возрасте приводит к уменьшению окончательного запаса несущей способности крепи. Зависимость имеет характер, близкий к обратно пропорциональному.

Для учета податливости бетона в раннем возрасте предложен коэффициент вида

$$k_B = \left(1,131 \frac{t}{D_{ctv}} + 0,6237 \right) \cdot \exp \left(0,4 \frac{E_7}{E_{28}} \right), \quad (1)$$

где t – толщина крепи, м; D_{ctv} – диаметр ствола в свету, м; E_7 – модуль деформации бетона в возрасте 7 сут.; E_{28} – модуль деформации бетона в проектном возрасте.

Коэффициент k_B можно использовать в качестве множителя к параметру α при определении нагрузок на крепь по методу контактного взаимодействия с массивом в рамках плоской задачи при следующих исходных параметрах: $t = 0,25 - 0,5$ м; $D_{ctv} = 6,0 - 8,0$ м, $E_7/E_{28} = 0,4 - 0,8$.

Следует подчеркнуть, что на основании (1) не следует делать вывод о целесообразности увеличения вели-

чины E_{28} , так как в этом случае происходит и пропорциональное увеличение E_7 . Необоснованное снижение величины E_7 также неэффективно, так как уменьшается запас прочности крепи в призабойной зоне. Механизм управляющих воздействий должен быть направлен на увеличение отношения прочности бетона к модулю деформации в раннем и проектном возрасте, что позволит повысить податливость крепи при необходимом запасе прочности. Результаты математического моделирования показывают, что за счет данного решения можно увеличить несущую способность монолитной бетонной крепи, возведенной по совмещенной технологической схеме, в 1,14 - 1,26 раза. Эти цифры свидетельствуют о возможности рассмотрения твердеющей монолитной бетонной крепи в призабойной зоне ствола в качестве регулятивного элемента, позволяющего обеспечить ограниченное увеличение области применения крепи.

Для более эффективного управления взаимодействием крепи и массива необходимо включение в систему дополнительных регулятивных элементов, например упрочняющей анкерной крепи контактного типа, получающей все большее распространение в практике шахтного и подземного строительства.

В соответствии с представлениями механики сплошных сред и механики подземных сооружений при рассмотрении анкерно-бетонной крепи вертикальных стволов можно перейти к расчетной схеме, представленной на рис. 2.

В произвольной точке z_0 области $|z| \geq r_1$, имеющей координаты (r_0, θ_0) , под углом θ_1 к действительной оси приложим сосредоточенную силу Q .

Она обусловлена возникновением натяжения анкера и определяется с учетом технологии работ.

Рассмотрим алгоритм определения смещений в системе.

Из теории упругости известны функции комплексных потенциалов φ и ψ , характеризующие напряженно-деформируемое состояние бесконечной плоскости от действия сосредоточенной силы. В нашем случае эти потенциалы имеют вид

$$\begin{aligned}\varphi(z) &= -\frac{X+iY}{2\pi(\chi+1)} \ln(z-z_0) + \varphi_0(z), \\ \psi(z) &= \chi \frac{X+iY}{2\pi(\chi+1)} \ln(z-z_0) + \\ &+ \frac{X+iY}{2\pi(\chi+1)} \cdot \frac{\bar{z}_0}{z-z_0} + \psi_0(z),\end{aligned}$$

где X, Y - проекции силы Q на действительную и мнимую оси соответственно; $\chi = 3 - 4\nu$.

Потенциалы $\varphi_0(z)$ и $\psi_0(z)$, аддитивно входящие в выражения (2) определяются в зависимости от дополнительных условий.

В случае действия сосредоточенной силы в бесконечной плоскости, ослабленной круглым отверстием, комплексные потенциалы φ и ψ принимают вид

$$\begin{aligned}\varphi(\xi) &= A(\chi) \ln(\xi - \xi_0) - \bar{B}(\chi) \ln\left(1 - \frac{1}{\xi_0 \xi}\right) - \\ &- \bar{A}(\chi) \frac{1 - \rho_0^2}{\xi_0^2 (1 - \xi_0 \xi)}; \\ \psi(\xi) &= B(\chi) \ln(\xi - \xi_0) - A(\chi) \left[\frac{\bar{\xi}_0}{\xi - \xi_0} - \frac{1}{\xi_0 \xi} \right] - \\ &- \bar{B}(\chi) \left[\frac{\bar{\xi}_0}{\xi (1 - \xi_0 \xi)} - \frac{1}{\xi^2} \right] - \\ &- \bar{A}(\chi) \left[\ln\left(1 - \frac{1}{\xi_0 \xi}\right) + \frac{1 - \rho_0^2}{\xi_0 \xi (1 - \xi_0 \xi)^2} \right],\end{aligned}$$

где $\xi = \frac{z}{r_1}$, $A(\chi) = -\frac{Q \exp(i\theta_1)}{2\pi(\chi+1)}$,

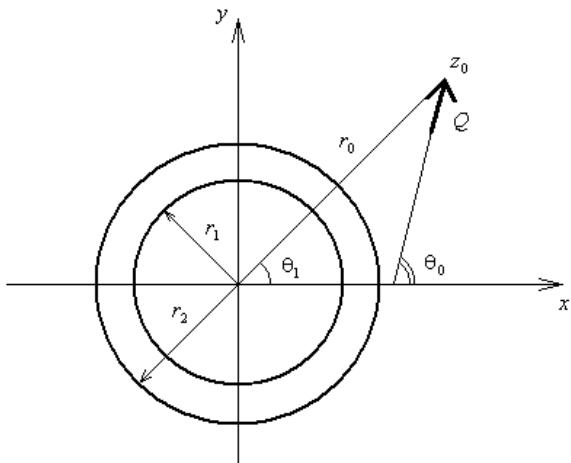


Рис. 2. Расчетная схема

$$B(\chi) = \chi \frac{Q \exp(-i\theta_1)}{2\pi(\chi+1)}, \quad (2)$$

$$Q = (X + iY) \exp(-i\theta_1) = (X - iY) \exp(i\theta_1),$$

r_1 – радиус отверстия.

В случае радиальной установки анкерного стержня направление силы Q нормально к контуру отверстия, следовательно $\theta_1 = \theta_0$. Для переменной ξ контур отверстия представляется единичной окружностью $|\xi| = 1$, а граница раздела двух сред окружностью $|\xi| = r$, $r = \frac{r_2}{r_1}$.

Введем новую переменную $\zeta = \frac{\xi}{r}$, тем самым, определив конформное отображение области $|\xi| \geq 1$ на область $|\zeta| \geq \frac{1}{r}$, причем точки внешнего контура кольца $1 \leq |\xi| \leq r$ (точки границы раздела сред) отображаются на точки единичной окружности $|\zeta| = 1$.

Для новой переменной комплексные потенциалы примут вид

$$\begin{aligned}
\varphi(\zeta) &= A(\chi) \ln(r(\zeta - \zeta_0)) - \\
&- \bar{B}(\chi) \ln\left(1 - \frac{1}{r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta}\right) - \bar{A}(\chi) \frac{1 - r^2 \rho_0^2}{r^2 \bar{\zeta}_0^2 (1 - r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta)}; \\
\psi(\zeta) &= B(\chi) \ln(r(\zeta - \zeta_0)) - \\
&- A(\chi) \left[\frac{\bar{\zeta}_0}{\zeta - \zeta_0} - \frac{1}{r^2 \zeta_0 \zeta} \right] - \\
&- \bar{B}(\chi) \left[\frac{\bar{\zeta}_0}{\zeta (1 - r^2 \zeta_0 \zeta)} - \frac{1}{r^2 \zeta^2} \right] - \\
&- \bar{A}(\chi) \left[\ln\left(1 - \frac{1}{r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta}\right) + \frac{1 - r^2 \rho_0^2}{r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta (1 - r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta)^2} \right]. \\
\varphi(\zeta) &= A(\chi) \ln(r(\zeta - \zeta_0)) - \\
&- \bar{B}(\chi) \ln\left(1 - \frac{1}{r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta}\right) - \bar{A}(\chi) \frac{1 - r^2 \rho_0^2}{r^2 \bar{\zeta}_0^2 (1 - r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta)}; \\
\psi(\zeta) &= B(\chi) \ln(r(\zeta - \zeta_0)) - \\
&- A(\chi) \left[\frac{\bar{\zeta}_0}{\zeta - \zeta_0} - \frac{1}{r^2 \zeta_0 \zeta} \right] - \\
&- \bar{B}(\chi) \left[\frac{\bar{\zeta}_0}{\zeta (1 - r^2 \zeta_0 \zeta)} - \frac{1}{r^2 \zeta^2} \right] - \\
&- \bar{A}(\chi) \left[\ln\left(1 - \frac{1}{r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta}\right) + \frac{1 - r^2 \rho_0^2}{r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta (1 - r^2 \bar{\zeta}_0 \zeta)^2} \right].
\end{aligned}$$

Вектор смещений выражается через комплексные потенциалы следующим образом

$$u(\chi, \mu, \zeta) = \frac{1}{2\mu} [\chi \varphi(\zeta) - \xi \overline{\varphi'(\zeta)} - \overline{\psi(\zeta)}].$$

Для определения поля смещений во всей области $|\zeta| \geq \frac{1}{r}$ зададимся

$$U(\zeta) = \begin{cases} u(\chi_1, \mu_1, \zeta) + u_1(\zeta), & \frac{1}{r} \leq |\zeta| \leq 1, \\ u(\chi_2, \mu_2, \zeta) + u_2(\zeta), & |\zeta| \geq 1, \end{cases}$$

где $u_1(\zeta)$ - голоморфная функция в кольце $\frac{1}{r} \leq |\zeta| \leq 1$, $u_2(\zeta)$ - голоморф-

ная функция во внешности единичной окружности $|\zeta| \geq 1$, причем $u_1(\zeta) = 0$ в области $|\zeta| \geq 1$, $u_2(\zeta) = 0$ в области $\frac{1}{r} \leq |\zeta| \leq 1$.

При $E_1 = E_0$, $\nu_1 = \nu_0$ функции $u_1(\zeta)$, $u_2(\zeta)$ всюду равны нулю.

Условие непрерывности смещений на границе раздела $|\zeta| = 1$ имеет вид $u(\chi_1, \mu_1, \zeta) + u_1(\zeta) = u(\chi_2, \mu_2, \zeta) + u_2(\zeta)$.

На основе представленных выше зависимостей далее могут быть определены компоненты напряженно-деформированного состояния монолитной бетонной крепи или породного массива в конкретной точке.

Для оценки работоспособности железобетонной анкерной крепи в вертикальных ствалах выполнен ряд шахтных исследований, позволивших в частности установить закономерности влияния величины заделки анкера в скважине на распределение усилий по его длине.

На рис. 3 показана характерная картина распределения растягивающих усилий по длине анкера при различной величине заделки. Минимальные растягивающие усилия в анкерах наблюдаются при полной заделке стержня в скважине ($l_3 = 1,8$ м), при $l_3 = 1,4$ м максимальная величина усилий больше в среднем в 1,31 раза, при $l_3 = 1,0$ м - в 1,72 раза.

Величина усилий не оказывает существенного влияния на характер их распределения по длине анкера, аналогичной для всех опытных участков. Растягивающие усилия имеют наибольшую постоянную величину на участке устье скважины - заделка анкерного стержня, а далее, в глубь массива, убывают по экспоненциальному закону.

F, кН

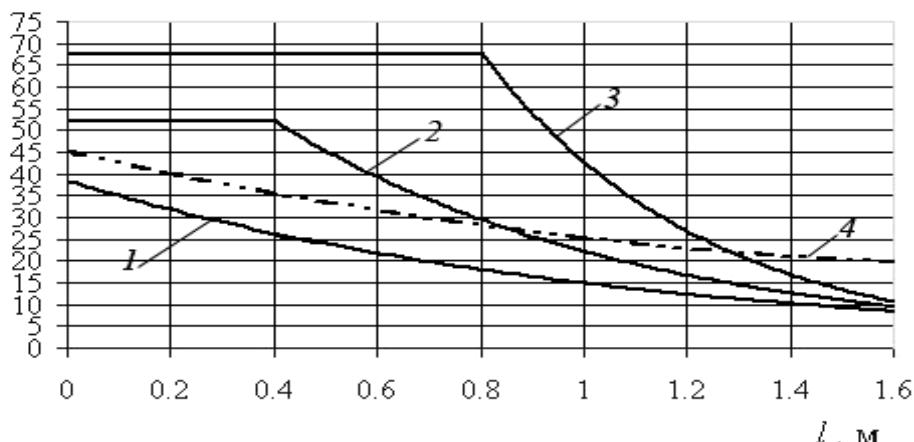


Рис. 3. Распределение растягивающих усилий в железобетонном анкере: 1 - при $l_3=1,8$ м; 2 - при $l_3=1,4$ м; 3 - при $l_3=1,0$ м; 4 - кривая расчетных значений, полученная в результате математического моделирования при полной заделке анкера в скважине

Сравнение экспериментальных и расчетных графиков свидетельствует об одинаковой качественной картине распределения усилий по длине анкера при полной заделке стержня. Отклонение величин максимальных усилий в близи устья анкера для трех опытных участков не превышает 19%.

На основании выше сказанного следует вывод о том, что наилучшей работоспособностью обладают железобетонные анкера с полной заделкой стержня, в которых наблюдается наименьшая интенсивность растягивающих усилий. При уменьшении длины заделки происходит значительный рост растягивающих усилий в анкерах, что приводит к уменьшению области применения и долговечности конструкций. Кроме того, анкера с полным заполнением скважины значительно лучше защищены от воздействия коррозии.

Концепция инновационного проектирования предполагает применение составов бетона крепи стволов, адекватных технологий работ и влияющим горнотехническим факторам.

При совмещенной схеме проходки на первый план выходят свойства бе-

тона в раннем возрасте (1 - 7 сут.), так как именно в этот период введенная в забое бетонная крепь взаимодействует с интенсивно деформирующимся массивом.

Бетон крепи, возводимой по параллельной схеме проходки, должен иметь большую проектную прочность и высокую скорость твердения для возможности выполнения быстрой распалубки и вступления бетона в работу в короткие сроки. Бетон для участков стволов в зоне влияния пристволовых выработок и породных слоев с низкими физико-химическими характеристиками должен обладать повышенными сопротивлением на растяжение при изгибе. На основании лабораторных испытаний более 50 различных составов бетона, 150 партий бетонной смеси, 500 серий испытаний образцов установлено следующее.

Наиболее полно технологическим требованиям совмещенной схемы проходки стволов отвечают бетоны с включением химических добавок типа Реламикс-2, Biseal SCC и SikaVisco Crete в объеме 0,6 - 1,0% от массы цемента и полипропиленовой фибры

Оптимальные составы бетона крепи стволов для различных условий

№	Параметры	Совмещенная схема	Параллельная схема	Участки влияния неоднородных пород и приствольных выработок
		Класс бетона по прочности		
		B25	B40	B25
1	Марка цемента		M500 Д0	
2	Расход цемента, кг/м ³	330 - 350	380 - 400	350 - 370
3	Вид и марка добавки (компонента)	Реламикс -2, Biseal SCC, SikaViscoCrete	МБ6-50С, МБ 10-01, ЭМБЭЛИТ 6-50, ЭМБЭЛИТ 6-100	Стальная фрезерованная фибра VULKAN HAREX
4	Дозировка добавки (компонента), % от цемента	0,8 - 1,0	10 - 12	20 - 40
5	Водоцементное отношение (В/Ц)	0,48 - 0,5	0,43 - 0,45	0,5 - 0,6
6	Доля песка в смеси заполнителей (П/Щ)		0,65 - 0,73	
7	Модуль крупности песка, (M_{kp})		2,2 - 2,5	
8	Вид крупного заполнителя	щебень из гравия фракций 5 - 20 мм.		

длиной 18 мм в объеме 0,9 - 1,1 кг, обладающие высокой скоростью набора прочности бетона в раннем возрасте и большей податливостью по сравнению с бетонами обычного состава.

Наилучшим образом технологическим требованиям параллельной схемы проходки отвечают составы бетона с включением модификаторов типа МБ и ЭМБЭЛИТ в объеме порядка 10 - 12% от массы цемента, позволяющие обеспечить увеличение проектной прочности бетона на сжатие, составившее 50,7 - 72,9% при высокой подвижности бетонной смеси, а также прочность на сжатие в возрасте одних суток около 20 МПа;

Для крепления участков ствола в зоне влияния приствольных выработок и породных слоев с низкими физико-механическими характеристиками

может эффективно применяться стальфибробетон, с включением стальной фибры в количестве 0,5 - 2,0% по объему, что позволяет увеличить прочность материала на сжатие в 1,09 - 1,45 раза, а прочность на растяжение при изгибе в 1,06 - 2,56 раз, при этом при увеличении процентного содержания фибры $R_{cск}$ возрастает по параболической зависимости, а R_n по гиперболической зависимости. Примеры ориентировочных составов бетонов крепи стволов для различных условий представлены в таблице.

Разработанные решения позволяют на наш взгляд повысить технико-экономическую эффективность строительства и эксплуатации глубоких вертикальных стволов, что подтверждается рядом инженерно-технических проработок и успешных внедрений. ГИАБ

Коротко об авторе

Плешко М.С. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подземное, промышленное, гражданское строительство и строительные материалы» Шахтинского института (филиала) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)», Россия, Ростовская область, e-mail mspleschko@rambler.ru.