

## УЧЕТ ПЕРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОНА В РАННЕМ ВОЗРАСТЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

Проаналізована суміщена технологічна схема будівництва вертикальних стволів. Досліджений вплив міцнісних властивостей твердіючого бетону на взаємодії системи «кріплення – масив» за допомогою чисельного моделювання. Дані рекомендації щодо вдосконалення технології кріплення глибоких стволів з метою забезпеченні стійкості і безремонтної підтримки стволів в процесі їх експлуатації.

Проанализирована совмещенная технологическая схема строительства вертикальных стволов. Исследовано влияние прочностных свойств твердеющего бетона на взаимодействия системы «крепь – массив» с помощью численного моделирования. Даны рекомендации по совершенствованию технологии крепления глубоких стволов с целью обеспечения устойчивости и безремонтного поддержания стволов в процессе эксплуатации.

The combined technological chart for building of vertical shafts is analysed. The influence of strength properties of hardening concrete on interactions of the system «timber – massif» is explored by means of numerical simulation. The recommendations on perfection technology for timbering of deep shafts with a purpose of providing the durability and non-repair maintenance of shafts in the process of their exploitation are offered.

Вертикальные стволы в Донбассе в настоящее время сооружаются и эксплуатируются в самых разнообразных горно- и гидрогеологических условиях, усложняющихся с увеличением глубины разработки месторождений полезных ископаемых. Отличаясь своей уникальностью и важностью в производственном комплексе горнодобывающего предприятия, они требуют постоянного поиска и разработки эффективных решений по интенсификации их строительства и безремонтной эксплуатации [1], что, в свою очередь, является актуальной научно-технической проблемой развития угольной промышленности Украины. Особенно важным является вопрос податливости монолитной бетонной крепи вертикальных стволов шахт с учетом стадий твердения бетона в призабойной зоне и оценка влияния изменяющейся податливости крепи в раннем возрасте на область ее применения.

В настоящее время возведение вертикальных стволов осуществляется по совмещенной технологической схеме. Проанализируем особенности возведения монолитной бетонной крепи по данной технологии.

После укладки бетонной смеси за опалубку, она постепенно набирает прочность и обжимается смещающимся внутрь ствола массивом. В этот момент времени опалубку и твердеющий бетон можно рассматривать как двухслойную крепь с жестким внутренним слоем и внешним податливым слоем, обладающим ярко выра-

женными свойствами пластичности и ползучести и в целом не препятствующую процессу деформирования пород.

Загружение бетонной крепи происходит после отрыва опалубки от возведенной заходки, когда набравший распалубочную прочность бетон начинает сопротивляться радиальным смещениям в ствол породного массива.

Рассмотрим ближайшие к забою 7 заходок крепи в момент времени отрыва и установки опалубки от последнего возведенного кольца бетона.

Отставание последнего возведенного кольца крепи от забоя составит  $h_3 + h_{отс}$  и при стандартной высоте опалубки 4 м изменяется, как правило, в пределах 4.5...6 м.

Срок твердения бетона исследуемых заходок определяется продолжительностью проходческого цикла. При четком соблюдении цикличного графика ведения работ возраст бетона ближайших к забою заходок в любой момент времени можно определить из выражения

$$T_n = t_1 + (n - 1) \cdot t_{ц}, \quad (1)$$

где  $n$  – номер заходки, считая от забоя ствола;  $t_1$  – срок твердения бетона последней возведенной заходки;  $t_{ц}$  – продолжительность проходческого цикла.

Прочность бетона на сжатие, определяющая несущую способность крепи, является функцией возраста бетона и увеличивается в направле-

нии от забоя ствола.

Таким образом, призабойное пространство ствола, возведенного по совещенной схеме, представляет собой систему заходок монолитной бетонной крепи разной прочности, а соответственно и разного сопротивления. Рассмотрим, как влияет прочность бетона крепи в раннем возрасте на взаимодействие системы «крепь – массив».

Данная система имеет ряд особенностей, которые нельзя учесть в постановке плоской деформации. Необходим анализ объемной расчетной схемы и использование численных методов моделирования.

В связи с этим было выполнено компьютерное моделирование призабойного участка ствола, выполненного методом конечных элементов в программном комплексе «Лира-9.0» в объемной постановке, рассмотрен расчетный случай взаимодействия монолитной бетонной крепи в призабойной зоне ствола, представленной однородным массивом.

На первом этапе расчетов глубина ствола принята равной 500 м, диаметр ствола в свету 6.0 м, модуль деформации пород  $10 \cdot 10^3$  МПа, толщина крепи 300 мм, проектный класс бетона В20.

При выполнении расчетов варьировались модуль деформации и прочность бетона на сжатие ближайших к забою семи заходок крепи согласно полосе значений относительной прочности бетона в возрасте 1...7 суток (в долях от 28 сут. прочности), полученной для составов, широко используемых при креплении стволов.

В результате расчета конечно-элементных моделей при различных глубине и физико-механических свойствах вмещающих пород определялись перемещения точек крепи и все компоненты тензора напряжений.

Оценка прочности монолитной бетонной крепи, с учетом малой величины вертикальных и радиальных главных напряжений, производилась согласно условию

$$\sigma_1 \leq R_b, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  – величина главных нормальных тангенциальных напряжений в крепи;  $R_b$  – расчетное сопротивление бетона сжатию.

При выполнении исследований были рассмотрены следующие варианты параметров крепи:

1. Прочность крепи всех заходок равна проектной прочности бетона.

2. Прочность ближайших к забою 7 заходок крепи различна, соответствует фактическому

возрасту бетона и варьируется в зависимости от скорости твердения бетона и скорости проходки.

Таким образом, в первом случае рассматривается крепь равного сопротивления, а во втором – крепь переменного сопротивления, которое возрастает от забоя ствола по логарифмическому закону.

Для оценки изменения общей податливости крепи по результатам расчетов определялся параметр податливости крепи  $\Delta\delta$ :

$$\Delta\delta = \frac{u_L(p)_{\text{тв.б}}}{u_L(p)_{\text{пр.б}}}, \quad (3)$$

где  $u_L(p)_{\text{тв.б}}$  – величина смещений внешней поверхности крепи из твердеющего бетона к моменту установления статического равновесия в системе «крепь – массив»;  $u_L(p)_{\text{пр.б}}$  – аналогичная величина смещений внешней поверхности крепи из бетона проектной прочности.

Исследования показали, что статическое равновесие в призабойной зоне ствола наступает на высоте 4...5 диаметров ствола от отметки забоя. При продолжительности проходческого цикла 24 ч бетон крепи на этой высоте имеет семисуточную прочность. Исходя из этого, получена зависимость показателя  $\Delta\delta$  от величины модуля упругости бетона крепи в возрасте 7 сут:

$$\Delta\delta = 0.0011E_7^2 - 0.378E_7 + 1.474.$$

В целом учет стадии твердения бетона в призабойной зоне при исследовании совместной работы крепи и массива увеличивает величину податливости монолитной бетонной крепи на 13...22 % в рассмотренном диапазоне, при этом изменение податливости обеспечивается варьированием прочностных свойств твердеющего бетона.

Для оценки влияния величины податливости крепи на ее напряженно-деформированное состояние (НДС) был произведен расчет конечно-элементной модели призабойного участка с крепью из твердеющего монолитного бетона с низкой и высокой скоростью набора прочности бетона, описываемой следующими зависимостями

$$R_T/R_{28} = 0.3342\ln(T) + 0.2709;$$

$$R_T/R_{28} = 0.2555\ln(T) + 0.0707,$$

где  $R_T$  – прочность бетона в рассматриваемом возрасте;  $T$  – возраст бетона;  $R_{28}$  – проектная прочность бетона.

Расчет проведен при толщине крепи 250 мм, проектном классе бетона В25, модуле деформации вмещающих пород  $15 \cdot 10^3$  МПа. Остальные параметры модели приняты аналогично рассмотренным выше.

НДС крепи оценивалось путем определения максимальных эквивалентных напряжений в каждой заходке в соответствии с теорией прочности О. Мора.

Полученные данные показали, что при медленном наборе прочности статическое равновесие в системе «крепь – массив» наступило при величине напряжений в крепи  $\sigma_3 = 6.38$  МПа, а в случае ускоренного набора прочности – при  $\sigma_3 = 8.4$  МПа.

Очевидно, что дальнейший набор прочности пошел в запас несущей способности крепи, составившим в первом случае 8.21 МПа, во вто-

ром – 6.1 МПа. Если бы крепь в призабойном пространстве сразу имела проектную прочность, то величина эквивалентных напряжений составила бы  $\sigma_3 = 12.1$  МПа, запас несущей способности 2.4 МПа.

В то же время установлено, что при медленной скорости твердения бетона величина эквивалентных напряжений в ближайшей к забою заходке крепи больше прочности бетона в рассматриваемый момент времени

Учитывая, что при различной скорости набора прочности бетона сохраняется логарифмический закон ее изменения, можно рассмотреть зависимость параметра  $\Delta\delta$  от соотношения между модулем упругости бетона в проектном ( $E_{28}$ ) и 7-ми суточном ( $E_7$ ) возрасте (рис. 1).

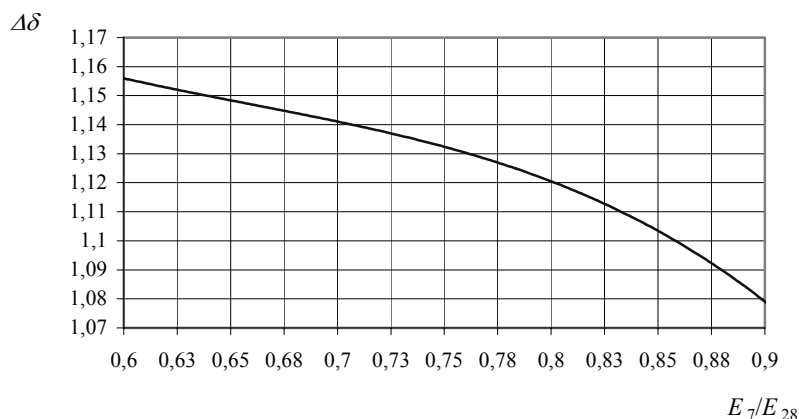


Рис. 1. Изменение сопротивления крепи в зависимости от отношения  $E_7/E_{28}$

Из графика видно, что при росте соотношения  $E_7/E_{28}$  параметр  $\Delta\delta$  уменьшается по гиперболической зависимости, при этом учет стадии твердения бетона в призабойной зоне увеличивает величину податливости монолитной бетонной крепи на 8...16 % в рассмотренном диапазоне. Таким образом, можно сделать вывод о возможности ограниченного изменения общей податливости крепи путем варьирования скорости твердения бетона в раннем возрасте.

Для оценки влияния изменяющейся податливости крепи в раннем возрасте на область ее применения были построены зависимости  $\sigma_1(u_L)$  для монолитной бетонной крепи от момента вступления ее в работу до наступления статического равновесия в системе «крепь – массив». На рис. 2 представлен пример зависимостей  $\sigma_1(u_L)$ , полученных при расчете призабойной зоны с крепью проектной прочности ( $E_{пр}$ ), а также при взаимодействии массива с

крепью изменяющегося сопротивления, скорость твердения бетона которой характеризуется соотношениями  $E_7/E_{28}=0.4$  и  $E_7/E_{28}=0.7$ . Глубина рассматриваемого участка составила 500 м, вмещающий массив представлен породами с модулем деформации  $E_0=10 \cdot 10^3$  МПа, коэффициентом поперечной деформации  $\nu_0=0.3$ . В соответствии с условием прочности (1) бетон крепи класса В15 без учета стадии твердения бетона в данных условиях эксплуатироваться не может. В случае учета данной стадии запас несущей способности крепи при отношении  $E_7/E_{28}=0.7$  составляет 0.16 МПа, а при  $E_7/E_{28}=0.4$  – 1.1 МПа.

Аналогичные исследования в различных условиях показали, что при проектировании параметров крепи учет стадии набора прочности бетона в призабойной зоне увеличивает область применения монолитной бетонной крепи, сооружаемой по совмещенной технологической схеме.

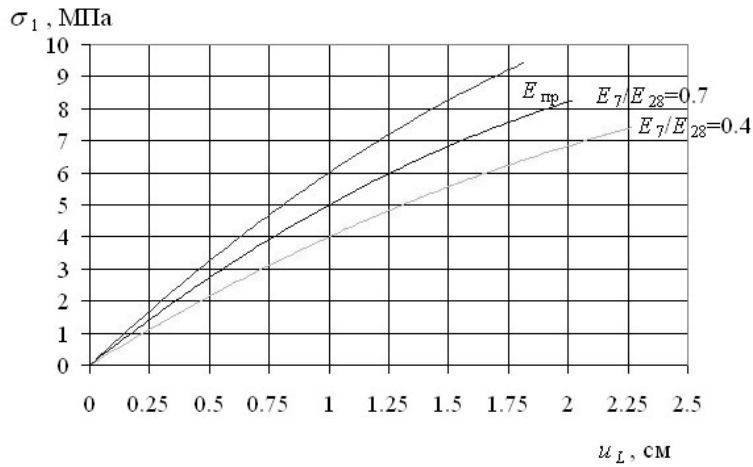


Рис. 2. График изменения НДС монолитной бетонной крепи в призабойной зоне ствола при различном сопротивлении бетона

Также была выполнена оценка влияния скорости проходки на НДС (напряженно-деформированное состояние) крепи в призабойной зоне. Скорость твердения бетона в раннем возрасте была принята постоянной, а варьировалась продолжительность проходческого цикла.

На рис. 3 представлены эпюры напряжений монолитной бетонной крепи и набора прочно-

сти бетона в призабойной зоне ствола диаметром 6 м крепи толщиной 250 мм, проектном классе бетона В15 при продолжительности цикла 18 и 30 часов. Как видно из рис., запас несущей способности твердеющей крепи при скоростной проходке на 20...35 % ниже, чем при нормативной продолжительности цикла. Аналогичные результаты получены и в других исследованиях.

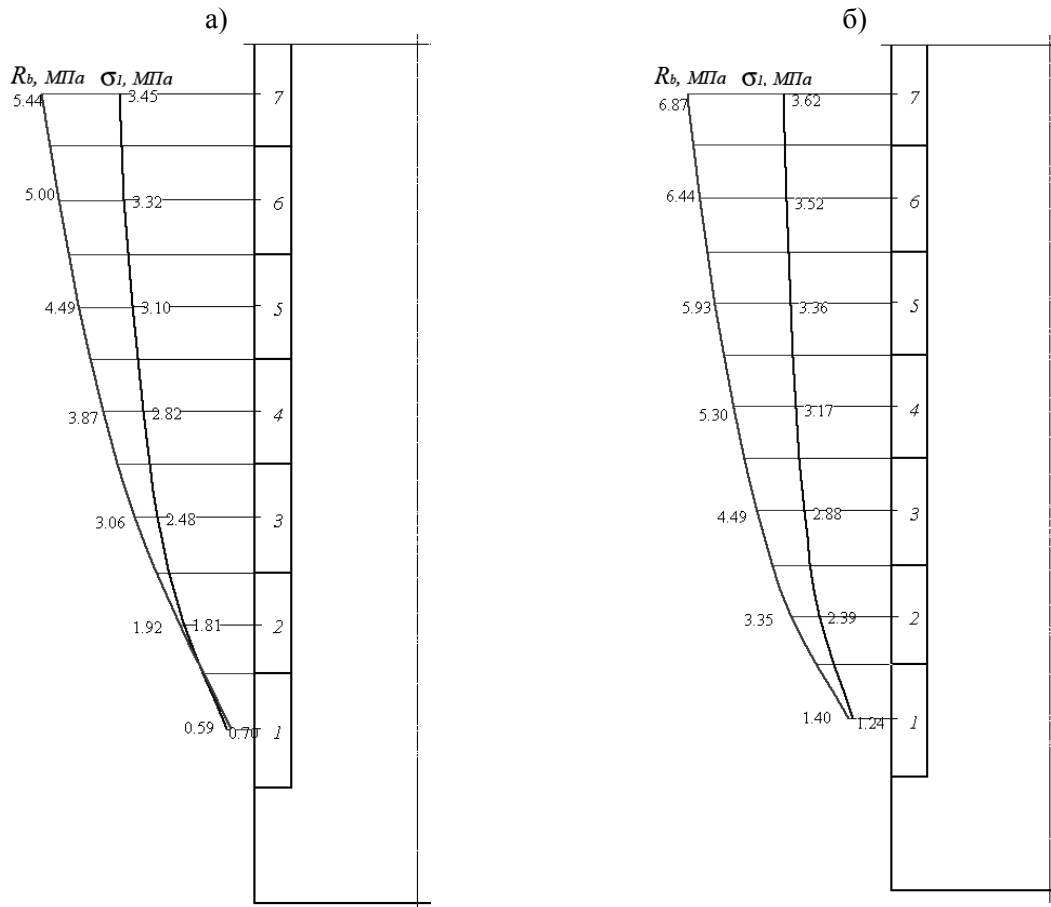


Рис. 3. Эпюры напряжений и прочности бетона твердеющей крепи в призабойной зоне при продолжительности проходческого цикла 18 ч и 30 ч

В целом изменение скорости проходки не оказывает существенного влияния на соотношение между напряжениями и деформациями при достижении статического равновесия в системе «крепь–массив», которое при высокой скорости проходки наступает на большем удалении от забоя ствола.

В то же время, интенсивное загрузке крепи в раннем возрасте может нарушить процесс естественного твердения бетона, привести к нарушению его структуры, развитию трещиноватости, что повлечет за собой снижение несущей способности и водонепроницаемости крепи, уменьшение ее долговечности.

Вследствие этого при организации скоростной проходки используют составы бетона с ускоренным набором прочности, позволяющие повысить несущую способность крепи в раннем возрасте, но уменьшающие ее общую податливость.

В настоящее время в Украине и странах СНГ наибольшее распространение получила совмещенная технологическая схема проходки стволов, доля которой составляет 95...98 % [1]. Эта схема и применяемое оборудование позволяют получить стабильную техническую скорость проходки ствола 75 м/мес. При высоком уровне организации работ достигается скорость проходки 100 м/мес. и более.

Однако, наряду с явными преимуществами совмещенная схема обладает целым рядом трудноустраняемых недостатков, влияющих на технико-экономический уровень и качество проходки и крепления ствола. Ряд последних исследований в этой области показывает, что применение совмещенной технологической схемы проходки негативно сказывается на качестве монолитной бетонной крепи. Это связано с тем, что при возведении крепи из быстротвердеющего бетона непосредственно за продвижением забоя в глубоких стволах возникают значительные нагрузки за счет конвергенции вмещающих пород, которые неблагоприятно влияют на крепь и могут привести к ее разру-

шению. Кроме того, при проходке по совмещенной технологической схеме буровзрывные работы производятся в непосредственной близости от бетонной крепи и воздействуют на бетон в ранней стадии твердения, что приводит к образованию дефектов на микроуровне и, в конечном результате, к снижению качества крепи.

Повысить качество крепи можно применением последовательной или параллельной технологических схем, при которых наблюдается разгрузка вмещающих пород до возведения постоянной крепи и снижение нагрузки на крепь на 12...15 %.

Таким образом, проведенные исследования показали, что учет фазы взаимодействия твердеющей крепи в призабойной зоне позволяет более точно осуществлять проектирование крепи. Путем варьирования прочностных свойств бетона можно осуществлять ограниченное управление системой «крепь–порода» при проходке ствола по совмещенной схеме, при этом оценка прочности крепи должна осуществляться с учетом стадии твердения бетона, однако, в целом выполненный анализ показал, что при организации скоростной проходки ствола по совмещенной технологической схеме необходимо учитывать возможное уменьшение области применения крепи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борщевский С. В. Современное направление развития технологии сооружения вертикальных стволов шахт. Сб. науч. тр. НГУ, №17, т.1. – Д.: РИК НГУ, 2003. – С. 406-412.
2. Бульчев Н. С. Механика подземных сооружений. Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
3. Баклашов И. В. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. – Т.2. Геомеханические процессы / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия, А. Н. Шашенко, В. Н. Борисов – М.: Изд-во МГТУ. 2004. – 249 с.

Поступила в редколлегию 25.10.2007.