

С. Г. СТРАДАНЧЕНКО, А. Ю. ПРОКОПОВ, М. С. ПЛЕШКО (ШИ(ф) ЮРГТУ (НПИ), г. Шахты, Российская Федерация)

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КРЕПИ И АРМИРОВКИ ГЛУБОКИХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Рассмотрены недостатки совмещенной схемы строительства вертикальных стволов. Предложены новые подходы и решения в проектировании стволов.

Розглянуті недоліки суміщеної схеми будівництва вертикальних стволів. Запропоновані нові підходи і рішення в проектуванні стволів.

Disadvantages of the combined chart of building vertical shafts are considered. New solutions in planning of shafts are offered.

В экономически развитых и интенсивно развивающихся странах доля угля в выработке электроэнергии остается высокой. В США – 51.9 %; в Австралии – 75 %; в КНР – 78 %; в Индии – 77 %; в ЮАР – 92 %; в Польше – 94.7 %, в странах Евросоюза – 40...60 %. В Японии, где не добывается это сырье, с помощью угля вырабатывается 24.5 % электроэнергии. В России в настоящее время сложился явный энергетический дисбаланс с долей угля в выработке электроэнергии всего 18 %, несмотря на то, что Россия по-прежнему входит в группу ведущих государств мира по добыче этого полезного ископаемого [1].

Одной из важнейших задач, стоящей перед топливно-энергетическим комплексом России в XXI веке является возвращение угля в электрогенерацию, что повлечет, в частности, необходимость строительства новых угольных шахт, отвечающих современным рыночным условиям.

Сформулируем ряд очевидных требований, которые будут предъявляться к строительству и эксплуатации шахты нового технического уровня:

Максимально быстрый ввод горнодобывающего предприятия в эксплуатацию с минимально возможными затратами;

Максимальная концентрация горных работ с минимальными потерями полезного ископаемого;

Максимальный объем добычи с минимальными затратами энергии и ресурсов;

Максимальная производительность транспорта с минимальными плановыми и ремонтными остановками.

Таким образом, на оптимальное соотношение между максимумом полезных показателей

и минимумом негативных факторов будут направлены усилия проектировщиков, строителей и работников угольных предприятий.

Рассмотрим более подробно комплекс вертикального ствола, как один из основных объектов шахты, на сооружение которого приходится 20...25 % стоимости и 30...50 % общей продолжительности строительства комплекса подземных выработок современной шахты. В период функционирования предприятия ствол является основной транспортной и вентиляционной артерией, со сроком службы равным сроку эксплуатации всего горнодобывающего объекта.

Под комплексом вертикального ствола понимают систему оснащения на поверхности, непосредственно ствол с приствольными выработками, армировку и подъемное оборудование. Сюда же можно отнести и примыкающее шахтное поле.

Известно, что максимальные объемы потерь угля приходится на потери в околоствольных целиках, размеры которых находятся в зависимости от глубины заложения ствола, параметров деформирования и разрушения пород в пределах мульды сдвижения, угла падения и количества принятых к отработке пластов.

Так, например, только на шахтах Российского Донбасса в околоствольных целиках сконцентрировано около 60 млн. т угля, что не отвечает сформулированному выше требованию 2.

В этой связи проект строительства современного ствольного комплекса должен предусматривать возможность отработки этих запасов.

Выполненные исследования [2] позволили установить, что применение традиционных тех-

нологий для отработки околоствольных целиков на периоде строительства горного предприятия не представляются возможным и выявить целесообразность применения короткозабойных технологий.

На базе камерных, камерно-столбовых систем и систем короткими столбами разработаны принципиальные технологические схемы ведения очистных работ с пневматической закладкой выработанных пространств, адаптированные к комплексу околоствольных выработок и выработок главных направлений, позволяющие производить эффективную и безопасную отработку

ботку околоствольных целиков в различных горно-геологических условиях при обеспечении безаварийной эксплуатации шахтных стволов.

Перейдем далее к проблемам строительства стволов. Анализ данных по ряду шахтных вертикальных стволов, проектирование и строительство которых осуществлялось в последние 10 лет в Российском и Украинском Донбассе показывает, что наметилась тенденция к увеличению глубины и диаметра сооружаемых стволов (табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры стволов

№ п/п	Название стола и горнодобывающего предприятия	Основной вид крепи	Диаметр, м	Глубина, м
1.	Шахта «Обуховская № 1» - главный - вспомогательный - вентиляционный	Монолитный бетон	7.0	904
			7.0	922.2
			6.0	919
2.	Шахта им. А.Ф. Засядько, Украина: - воздухоподающий № 2 - вентиляционный № 2 - вентиляционный № 3	Монолитный бетон	7.0	1265
			6.5	1022
			7.0	1222
3.	Шахта «Шахтерская – Глубокая» - скиповой ствол; - клетевой ствол	Монолитный бетон	8.0	1335.6
			8.0	1341

Увеличение глубины ствола обуславливается необходимостью вскрытия более глубоких пластов, а большой диаметр позволяет использовать высокопроизводительное подъемное оборудование, снизить затраты на вентиляцию горных выработок за счет меньшего аэродинамического сопротивления. Интересен в этой связи опыт ЮАР, где пройден значительный объем стволов диаметром 8...9 м, глубиной до 2 км и более. Стволы часто разделяют железобетонной перемычкой, что позволяет их использовать как для подачи, так и для выдачи воздушной струи [3].

В целом проходка стволов большого диаметра отвечает сформулированным требованиям 3 и 4, но противоречит первому пункту, так как с увеличением площади ствола возрастает трудоемкость работ по разработке и уборке породы, возведению крепи, рассечке приствольных выработок и армированию.

В настоящее время проходка стволов в нашей стране ведется по совмещенной технологической схеме, предусматривающей возведение монолитной бетонной крепи вслед за подвиганием забоя. Нормативная скорость

проходки стволов по этой схеме составляет 60 м/мес, скоростной считается сооружение в месяц 100 м ствола и более.

В бывшем СССР и России накоплен определенный опыт по скоростному сооружению стволов по совмещенной схеме, однако, как правило, на стволах среднего диаметра.

Отметим также, что при строительстве стволов большой площади наиболее сильно проявляются недостатки совмещенной технологии.

Во-первых, ухудшается геомеханическая обстановка в системе взаимодействия «крепь – массив».

Известно, что при упругой задаче между внешним давлением на крепь p и радиальными перемещениями массива u существует прямо пропорциональная зависимость:

$$p = B \cdot u,$$

где B – характеристика жесткости крепи.

В зоне влияния забоя перемещения могут быть найдены по формуле:

$$u = \alpha^* \cdot u_{\infty},$$

где u_{∞} – полные смещения стенок выработки; α^* – коэффициент, учитывающий отставание крепи от забоя, который может быть определен по эмпирической формуле Б. З. Амусина:

$$\alpha^* = \exp(-1.3l_0/r_0),$$

где l_0 – отставание крепи от забоя; r_0 – радиус

(или полупролет) сечения выработки в проходке.

Приняв величину нагрузки в сечении ствола радиусом 3 м за единицу, получим график роста давления на крепь по мере увеличения размеров сечения (рис. 1).

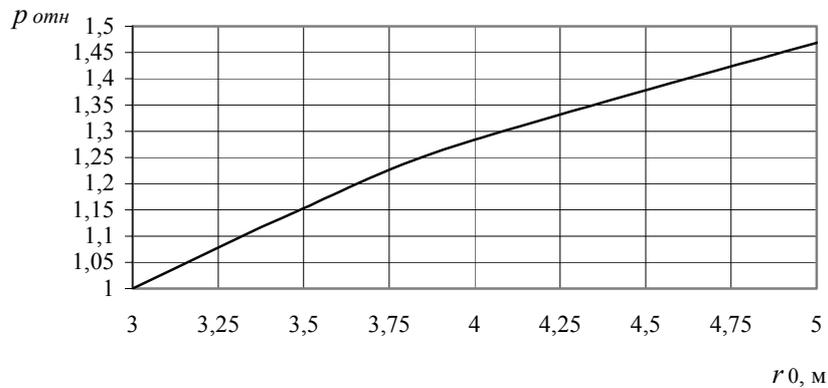


Рис. 1. Зависимость величины нагрузки на крепь от радиуса ствола

Во-вторых, увеличивается мощность взрывных работ, а, соответственно, и негативное воздействие энергии и продуктов взрывных работ на близко расположенную к забою твердеющую монолитную бетонную крепь.

В-третьих, с увеличением площади ствола возрастет перерасход бетона крепи, обусловленный несоответствием фактического сечения выработки проектному. Несоответствие возникает из-за сложности бурения оконтуривающих шпуров вблизи стенок ствола, так как в забое находится бетонная крепь и опалубка.

Увеличение скорости проходки также ведет к ухудшению работы крепи.

На рис. 2. представлены графики, полученные в результате математического моделирования, показывающие запас несущей способности ближайших к забою 7 заходов монолитной бе-

тонной крепи в призабойном пространстве ствола при продолжительности проходческого цикла 30 ч и 18 ч.

Данные исследований показывают, что при скоростной проходке по совмещенной схеме напряжения в крепи достигают критических значений сначала в ближайших к забою заходках из твердеющего бетона, а не в крепи проектной прочности, расположенной на протяженном участке ствола, расчет которой производится при разработке проекта.

Кроме этого интенсивное загрузивание бетона 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.

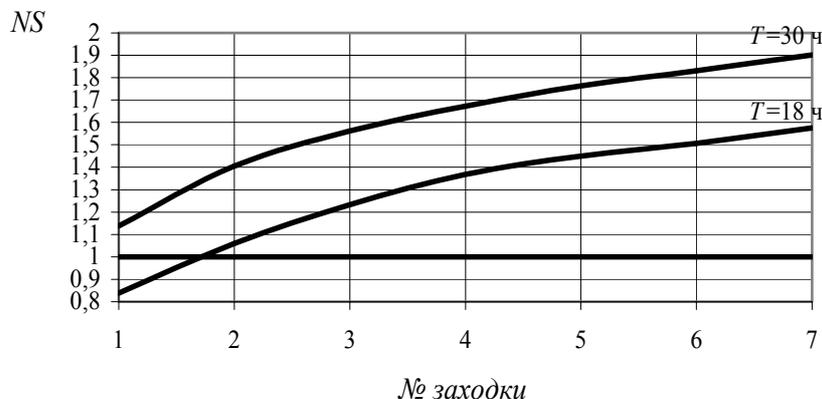


Рис. 2. Запас несущей способности монолитной бетонной крепи в призабойном пространстве ствола при различных способах проходки

Таким образом, повышение качества строительства ствола за счет увеличения скорости проходки влечет за собой снижение качества эксплуатации сооружения, во многом определяющееся долговечностью крепи. Соответственно, в противоречие входят пункты 1 и 4 сформулированных требований, так как ремонт крепи сопровождается остановкой подъема.

Передовой зарубежный опыт показывает, что более эффективной в глубоких стволах большого диаметра является параллельная схема.

В бывшем СССР в середине XX века применялось два варианта параллельной схемы:

1. Совмещение работ по выемке породы и возведению постоянной крепи достигается за счет применения временной крепи, устанавливаемой по мере подвигания забоя, промежуточного полка (натяжной рамы) и подвешенного полка, с которого заходками снизу вверх возводится постоянная крепь. Выемка породы и возведение постоянной крепи велись в разных направлениях.

2. Совмещение работ по выемке породы и возведению постоянной крепи достигается применением щитовой оболочки, многоярусного проходческого полка и передвижной опалубки с поддоном. Выемка породы из забоя и возведение постоянной крепи с подвешенного полка велись в направлении движения забоя. Эта схема получила название параллельно-щитовой.

Обе схемы вследствие ряда существенных недостатков были вытеснены совмещенной технологией. В то же время за рубежом в настоящее время широко применяется вариант параллельной схемы, предусматривающий совмещение работ по выемке породы в забое ствола и возведению постоянной крепи с многоярусного полка. Это обеспечивается применением временной анкерной крепи или за счет устойчивости боковых пород, позволяющим оставлять участок ствола протяженностью 15...25 м без постоянной крепи. Выемка породы из забоя и возведение постоянной крепи ведутся в направлении движения забоя.

Данная технология позволяет обеспечить стабильно высокие скорости проходки 150...180 м/мес и может быть адаптирована к российским условиям.

Основным отличием схемы должно стать использование многоярусного проходческого полка, на котором располагается все основное оборудование и подвешивается опалубка облегченного типа. Это позволит уменьшить чис-

ло лебедок на поверхности в 2.5...3 раза по сравнению с совмещенной схемой и снизить продолжительность периода оснащения ствола. Один из этажей полка будет выполнять функцию поддона опалубки благодаря специальной конструкции.

Изменится и концепция крепления ствола. В настоящее время крепление стволов осуществляются монолитной бетонной крепью толщиной 300...500 мм и основным подходом по повышению несущей способности крепи является увеличение ее толщины. В сложных условиях переходят на железобетонное, тубинговое или комбинированное крепление.

Сравнительный анализ способов повышения несущей способности крепи из бетона класса В15 толщиной 250 мм путем увеличения класса бетона, толщины крепи или установки упрочняющих анкеров в различных условиях показал, что при проектировании мер по повышению несущей способности монолитной бетонной крепи вертикальных стволов в первую очередь должна рассматриваться возможность увеличения класса бетона. Увеличение толщины крепи может быть рекомендовано только в слабых породах с модулем сдвига $G_0 < 2 \cdot 10^3$ МПа. В остальных случаях после исчерпания возможностей по варьированию прочности бетона целесообразно производить анкерное упрочнение породного массива.

Таким образом, технология крепления вертикальных стволов должна предусматривать установку упрочняющей анкерной крепи из забоя ствола с последующим возведением монолитной бетонной крепи с отставанием от забоя до 25 м. Толщина крепи принимается минимальной (250...300 мм) и увеличение ее несущей способности осуществляется за счет повышения класса бетона. Для ее возведения применяются жесткая быстротвердеющая бетонная смесь, спускаемая к месту укладки в контейнерах [4].

Анкерная крепь рассматривается не только как временная охранная конструкция, но и как часть постоянной крепи, выполняющая упрочняющую и регулятивную функцию. Эффективность упрочнения определяется величиной натяжения анкера, увеличивающегося после установки из забоя по мере деформирования породных стенок. На больших глубинах и в породах склонных к ползучести целесообразна установка анкерных систем с ограниченной податливостью, позволяющих обеспечить первоочередную разгрузку массива и увеличить область применения анкеров.

В большом диапазоне условий анкерная крепь может играть роль регулятивного элемента. В частности, выполнено обоснование целесообразности установки опережающей анкерной крепи при проходке ствола в зоне породного слоя со слабыми физико-механическими характеристиками мощностью до 5 м (рис. 3).

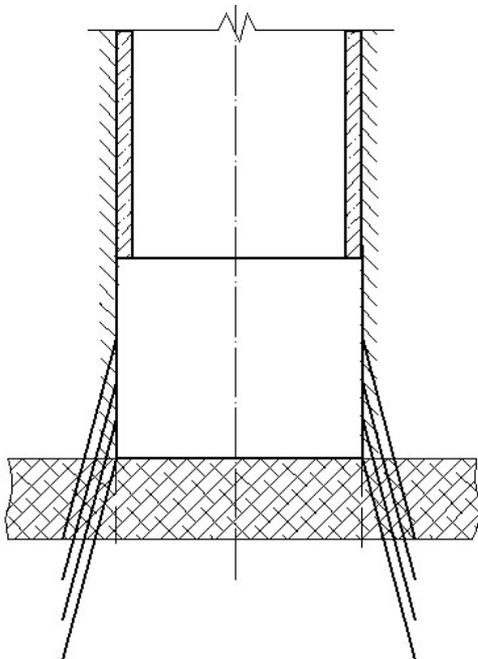


Рис. 3. Схема установки опережающей анкерной крепи

Необходимый коэффициент упрочнения в зоне влияния «слабого» слоя может быть найден из полученного в результате математического моделирования выражения

$$K_{\text{упр}} = \left(\begin{matrix} 0.013k_G^3 - 0.104k_G^2 + \\ + 0.295k_G + 1.064 \end{matrix} \right) \cdot m^{0.091},$$

где k_G – коэффициент, определяемый из выражения:

$$k_G = 0.1 \frac{G_0}{G_{\text{пл}}},$$

G_0 – модуль сдвига основного породного массива; $G_{\text{пл}}$ – модуль сдвига «слабого» слоя; m – мощность слабого слоя, м.

Особое внимание при проектировании крепи следует уделять сложным участкам ствола. Так, более 75 % нарушений крепи и армировки вертикальных стволов в Донбассе приходится на районы влияния приствольных выработок.

Применение параллельной схемы проходки на данных участках с использованием анкерных систем направленного действия позволит,

на наш взгляд, существенно повысить долговечность крепи ствола.

Большое значение при этом имеет последовательность выполнения работ и учет ее при проектировании. Так, сравнительные расчеты участка ствола с камерой загрузочных устройств при рассмотрении готового объекта и поэтапного сооружения с учетом образующихся после каждой стадии строительства зон возможного разрушения и ослабления пород показали значительную разницу в итоговой картине напряженно-деформированного состояния крепи и пород.

С учетом возможной выемки околоствольного шахтного поля необходимо тщательное, научно обоснованное проектирование крепи в зоне влияния очистных работ. Одним из возможных решений может стать применение конструкций крепи шарнирного типа, несвязанных с деформируемым массивом.

В областях влияния приствольных выработок и очистных работ целесообразен переход на армировку с увеличенным шагом. Разработанные решения предусматривают применение пространственных рамных конструкций, проводников с дополнительной опорной ветвью [5].

В целом требующееся при увеличении глубины стволов повышение интенсивности подъема повлечет за собой изменения в проектировании армировки.

Необходимым становится учет комплекса дополнительных воздействий на армировку, обусловленных сложным колебательным процессом при движении подъемного сосуда по вертикальному стволу.

К этим нагрузкам следует отнести статические постоянные нагрузки от собственного веса конструкций армировки, а также ряд кратковременных нагрузок, имеющих динамический характер: кориолисову силу, развивающуюся в процессе движения сосуда по шахтному стволу; аэродинамическую силу, возникающую в месте встречи подъемных сосудов; силу от крутящего момента, возникающего в канате под действием растягивающей нагрузки; вертикальные силы, возникающие вследствие неточности установки проводников в процессе строительно-монтажных работ или изменения первоначального положения проводников в процессе эксплуатации.

Таким образом, инновационный подход к проектированию современных вертикальных стволов должен базироваться на следующих основных положениях:

1. Рассмотрение вертикального ствола как комплекса взаимовлияющих элементов: системы оснащения на поверхности, ствола и приствольных выработок, армировки и подъемного оборудования, примыкающего шахтного поля.

2. Применение для проходки ствола прогрессивных технологических схем, предусматривающих крепление ствола высокопрочной бетонной крепью минимальной толщины, использование упрочняющей штанговой крепи и регулятивных анкерных систем направленного действия.

3. Проектирование крепи ствола с учетом рассмотрения всех стадий сооружения и эксплуатации стола, а также последовательности выполнения проходческих работ.

4. Проектирование крепи и армировки с учетом зон влияния приствольных выработок, очистных работ, ослабленных породных слоев и всего комплекса возможных нагрузок и воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. http://www.russia-today.ru/2006/no_24/24_selebration.htm.
2. Страданченко С. Г. Обоснование отработки околовствольных целиков короткими очистными забоями при сохранении безаварийной эксплуатации вертикальных шахтных стволов. Дис. докт. техн. наук. – Тула, 2003.
3. Новик Е. Б. Опыт сооружения вертикальных стволов в ЮАР / Е. Б. Новик, В. В. Левит, М. А. Ильяшов. – К.: Техніка, 2004. – 64 с.
4. Ягодкин Ф. И. Повышение технико-экономической эффективности и качества крепления вертикальных стволов // Научно-технические проблемы шахтного строительства. Сб. науч. тр. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т / Ф. И. Ягодкин, С. П. Сыркин. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. – С. 74-78.
5. Прокопов А. Ю. Новые решения в проектировании жесткой армировки вертикальных стволов / А. Ю. Прокопов, С. Г. Страданченко, М. С. Плешко. – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев.-кавк. регион», 2005. – 216 с.

Поступила в редколлегию 22.10.2007.