

УДК 622.258: 519.711.3

**М.В. Проколова, К.Э. Ткачева**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «КРЕПЬ-МАССИВ» ПРИ УГЛУБКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ**

*Выполнено математическое моделирование работы бетонной крепи действующего ствола шахты при его углубке. Произведен анализ изменения напряженно-деформированного состояния крепи и массива пород, расположенного выше отметки ведения горнопроходческих работ при углубке ствола.*

*Ключевые слова: бетонная крепь, углубка ствола, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние.*

---

**П**ри разработке угольных и рудных месторождений по мере отработки запасов производят подготовку новых горизонтов, которая часто связана с необходимостью углубки шахтных стволов. Возобновление горнопроходческих работ в стволе сопровождается изменением напряженно-деформированного состояния породного массива и крепи, сложившегося до начала углубки. При этом происходит перераспределение напряжений в призабойной части ствола и сдвигание вышележащей толщи пород, что оказывает негативное влияние на крепь углубляемого ствола. Характер и степень влияния процесса углубки на состояние существующей крепи действующего ствола шахты зависит от конкретных горно-геологических, горнотехнических условий и принятой технологии ведения углубочных работ.

Вертикальные шахтные стволы эксплуатируются в течение длительного времени, весь срок службы горнодобывающего предприятия. Условия их поддержания отличаются большим многообразием и значительно усложняются с увеличением глубины. Основными причинами, неблагоприятно

влияющими на состояние крепи в процессе эксплуатации, являются непредвиденные сложные горно-геологические условия, влияние выработок околоствольного двора, влияние очистных работ и агрессивное воздействие шахтных вод. Анализ состояния вертикальных стволов шахт Донбасса [1] свидетельствует о том, что более 70 % глубоких стволов имеют нарушения крепи. Поэтому при проектировании углубки необходимо учитывать сложившееся напряженно-деформированное состояние нарушенного массива, вмещающего реконструируемый ствол.

Углубка вертикальных стволов характеризуется значительным разнообразием применяемых схем и способов производства горнопроходческих работ [2, 3]. При углубке выемку породы производят сверху вниз или снизу вверх, полным сечением или с расширением передовой выработки (восстающего, скважины большого диаметра). Порода при углубке выдают на поверхность, один из вышележащих действующих (рабочий, вентиляционный), подготовительный или углубочный горизонт. В некоторых технологиях углубки производится частичное

магазинирование породы в стволе. Выбор способа и технологической схемы производится, исходя из возможных вариантов наиболее рационального размещения проходческого оборудования, использования сечения действующего ствола для целей углубки без особого ущерба эксплуатационной деятельности постоянного подъема, а также возможности максимального использования существующих выработок для транспортирования горной массы и других целей без дополнительных затрат времени и средств на проведение выработок, необходимых только для углубки. При этом выбор схемы должен основываться на обеспечении наибольшей безопасности ведения работ, не должен нарушаться режим работы действующей шахты, затраты и продолжительность углубочных работ должны быть минимальными.

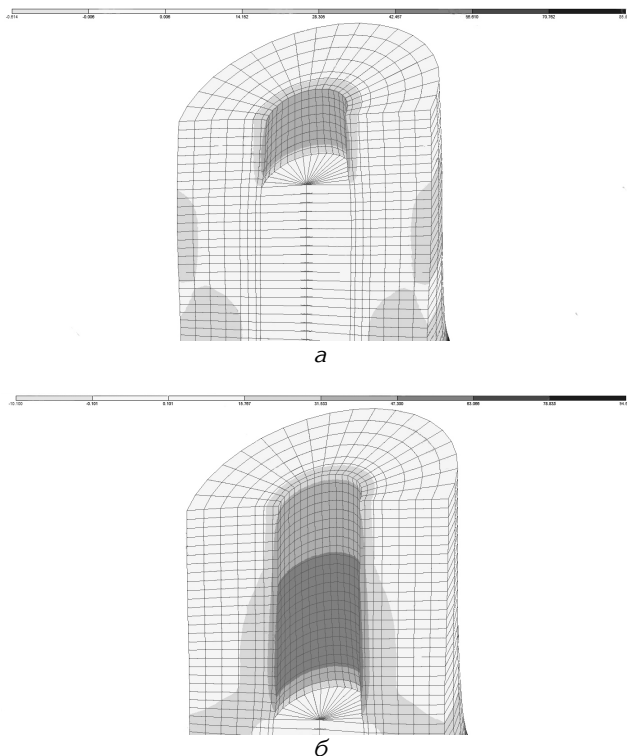
Анализ опыта углубки стволов в различных бассейнах показывает, что высокие технико-экономические показатели углубки достигались при применении схем углубки сверху вниз полным сечением с выдачей породы на поверхность и с расширением возрастающего [3]. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать ведение работ по углубке ствола способом сверху вниз полным сечением.

Основная идея работы заключается в изучении изменения напряженно-деформированного состояния бетонной крепи и массива пород, расположенного выше отметки ведения горнопроходческих работ при углубке ствола, установление зависимости максимальных напряжений и деформаций крепи и пород относительно исходных (до начала углубочных работ) от глубины и разработка эффективных технологических параметров проходки и крепления углубляемого ствола.

С помощью программного комплекса «Лири-9.4», позволяющего решать задачи геомеханики в нелинейной постановке [4], а также с учетом этапности возведения конструкции [5], авторами разработан ряд объемных конечно-элементных моделей, позволяющих поэтапно отразить процесс ведения горнопроходческих работ углубки ствола.

В процессе моделирования исследовались изменения величин сжимающих и растягивающих напряжений в верхней части ствола по мере удаления забоя с каждой заходкой проходческого цикла. Модели создавались с учетом горно-геологических условий сооружения стволов в Донбассе, где основная часть пересекаемых стволом пород приходится на песчаники, аргиллиты, алевролиты и углистые сланцы. Это позволило проанализировать характер изменения напряженно-деформированного состояния крепи в различных породах. Массив горных пород моделировался объемными физически нелинейными конечными элементами КЭ №276 (пространственный 8-ми узловый изопараметрический элемент грунта, произвольный гексаэдр). Крепь ствола представлена КЭ №236 (пространственный 8-ми узловый изопараметрический элемент, произвольный гексаэдр). Расчет выполнялся с учетом нелинейного деформирования материала крепи по теории прочности Мора.

С учетом того, что основным видом крепи шахтных стволов является монолитный бетон, при моделировании конечным элементам крепи задавались следующие параметры жесткости: модуль деформации  $E_0=3 \cdot 10^4$  МПа, предел прочности на сжатие и растяжение соответственно 14,5 и 1,05 МПа. НДС крепи и массива исследовалось для 4 различных типов вмещающих пород. Расчет произво-



**Рис. 1. Изополя эквивалентных сжимающих напряжений в бетонной крепи: а – до углубки (1-й этап); б – после углубки (4-й этап)**

дился для ствола диаметром в свету 6 м, при толщине монолитной бетонной крепи 300 мм, классе бетона В25.

Для моделирования поэтапного выполнения работ по углубке ствола каждая модель собиралась из отдельных блоков, каждый из которых соответствовал выполнению определенной операции проходческого цикла: сначала моделировался участок ствола, закрепленный бетоном с полным набором прочности, имитирующий зумпфовую часть углубляемого ствола (до углубки), расчетная нагрузка задавалась для проектной глубины на данном горизонте; на следующей заходке – пройденный участок ствола без крепи; затем пройденный закрепленный участок, но с учетом неполного набора прочности бетона на дан-

ном этапе; последний этап – весь рассматриваемый участок ствола, закрепленный монолитным бетоном с проектным набором прочности.

В результате расчета для всех моделей были получены эквивалентные напряжения, возникающие в крепи и породах.

На рис. 1, а, б представлены изополя сжимающих напряжений в бетонной крепи и массиве пород, полученные при моделировании ствола в алевролитах, соответственно до углубки и после удаления забоя от исследуемого участка ствола.

Аналогичные модели выполнены для всех исследуемых пород, результаты расчета приведены в табл. 1.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- увеличение эквивалентных сжимающих и растягивающих напряжений в бетонной крепи верхнего исследуемого участка ствола происходит во всех случаях, независимо от типа пород;
- разница между максимальными эквивалентными напряжениями в крепи верхнего участка углубляемого ствола (зумпфа) увеличивается при производстве проходческих работ по углубке ствола;
- степень увеличения напряжений в крепи верхней части ствола в процессе углубки зависит от типа вмещающих пород;
- в наибольшей степени увеличение напряжений в крепи верхней части ствола проявляется в слабых породах;
- максимальные концентрации напряжений в крепи возникают в при-

Таблица 1

**Относительное увеличение максимальных эквивалентных напряжений в крепи и породном массиве при углубке ствола**

Порода	Увеличение эквивалентных напряжений в крепи/ в массиве при углубке, %			
	сжимающих		растягивающих	
	min	max	min	max
Песчаник	4,8 / 0,33	37,8 / 41,8	1,8 / 6,1	33,5 / 37,7
Алевролит	3,3 / 2,38	32,8 / 47,4	3,4 / 2,4	32,8 / 47,4
Аргиллит	3,8 / 0,7	37,4 / 44,3	3,8 / 0,83	37,2 / 44,3
Углистый сланец	5,4 / 1,15	48,6 / 33	5,4 / 0,53	48,6 / 33

забойной части ствола, в последней заходке бетонирования на высоте 0,5—2 м от забоя. В этих местах наиболее вероятно снижение несущей способности крепи и, как следствие, ее разрушение;

- наибольшие концентрации напряжений во всех рассматриваемых типах пород возникают на контактах с бетонной крепью.

При переходе на нижележащие горизонты сохранить крепь действующего ствола в нормальном состоянии при его углубке крайне сложно. Поэтому необходимо научное обоснование и разработка способов поддержания и ремонта крепи на участках выше углубочного горизонта до начала углубки с учетом формирующегося напряженно-деформированного состояния крепи на этом участке.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Борщевский С.В., Проколова М.В., Ткачева К.Э. О проблемах поддержания и реконструкции вертикальных стволов шахт Донбасса // Известия ТулГУ. Естественные науки. Вып. 3. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – С. 245-254.
2. Веселов Ю.А., Задорожный А.М. Углубка стволов шахт. – М.: Недра, 1989. – 340 с.
3. Пасиченко К.Ю. Разработка эффективных методов отбойки пород при углубке стволов с расширением передового выстающего снизу вверх: Дисс... канд. техн. наук. – Кривой Рог, 2002. – 204 с.
4. Прокопов А.Ю., Проколова М.В. Новые возможности моделирования в программном комплексе «Лири 9.6»/ Перспективы развития Восточного Донбасса : сб. науч. тр. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 160-165.
5. Проколова М.В., Ткачева К.Э., Васюковцова Я.С. Моделирование работы конструкций с учетом этапности возведения// Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений : сб. науч. тр. – Донецк : Норд-пресс, 2011. – Вып. 17. – С. 46-48. **ПАЛБ**

**КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

Проколова М.В. – кандидат технических наук, доцент, главный инженер проекта ООО «Тектоника», e-mail: sun210872@yandex.ru,  
Ткачева К.Э. – ассистент кафедры «Подземное, промышленное, гражданское строительство и строительные материалы» Шахтинского института (филиала), e-mail: karinatkacheva@mail.ru.

