

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ СТВОЛОВ НА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЯХ

Борщевский С.В., Левит В.В., Сирачев А.Ж., ДНТУ, Украина,
Прокопова М.Ю., Шахтинский институт ЮРГТУ, Россия

На базі натурних спостережень і аналізу журналів проходки і журналів кріплення 109 вертикальних стволів вугільних шахт Донбасу зроблені якісна і кількісна оцінки стану вибоїв, виявлені фактори, що впливають на формування бетонного кріплення вертикальних стволів, розроблена графічна і чисельна реалізація розрахунків напружено-деформованого стану кріплення стволів на кінцево-елементних моделях.

Вертикальные шахтные стволы, отличаясь своей уникальностью и важностью в производственном комплексе горнодобывающего предприятия, 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.

На нынешнем этапе изучения условий эксплуатации Донецкого угольного бассейна накоплены весомые знания об особенностях проявления горного давления в подземных выработках, в т.ч. и в вертикальных стволах. В условиях Донбасса выделяют следующие геомеханические особенности породного массива [2]:

- ✓ высокая литолого-геомеханическая неоднородность вмещающей толщи пород при региональном, локальном и очаговом снижении показателей их прочностных свойств;
- ✓ формирование больших зон разрушения вокруг выработок в условиях высокой дезинтеграции пород и асимметрии нагрузки массива по контуру;
- ✓ зональное разрушение пород как вглубь массива, так и по длине выработки, обуславливающие высокую деструктивную пластичность пород, большие их смещения в полость выработки и асимметрию нагрузок на крепь;
- ✓ постоянное увеличение глубины горных работ;
- ✓ усложнение с глубиной гидро-геологических условий проходки.

Для облегчения выбора технологии проходки вертикальных стволов и обоснования способов крепления [3] в условиях различных водопритоков, авторами были подвергнуты обработке статистические данные из журналов проходки (рис.1) с учетом горно-геологических характеристик породного массива, толщины и вида крепи, темпов проходки по 109 стволам Донбасса, различного диаметра и глубины. Обработанные данные показали (рис.2), что в качестве крепи вертикальных стволов наиболее широкое

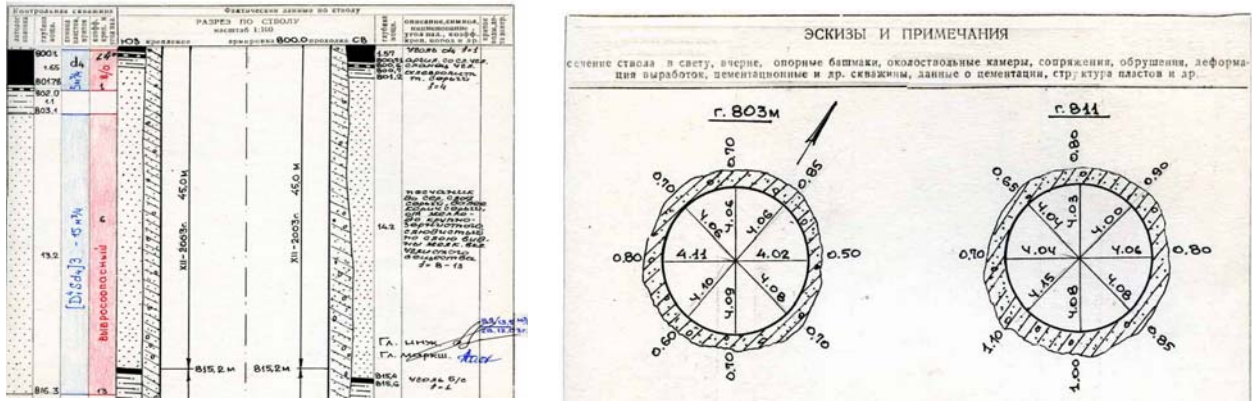


Рис. 1. - Журнал проходки ствола

распространение получила бетонная крепь класса В 15...25 по прочности и толщиной 300...500 мм. Кроме того, произведены качественные и количественные оценки состояния забоев, выявлены факторы, влияющие на формирование очагов вывалообразования на протяженных участках вертикальных стволов, проанализированы способы проходки и состояние протяженных участков вертикальных стволов угольных шахт с точки зрения вывалообразования, материала крепи и технологии её возведения, максимально адаптированного к горно-гидрогеологическим условиям проходки вертикальных стволов.

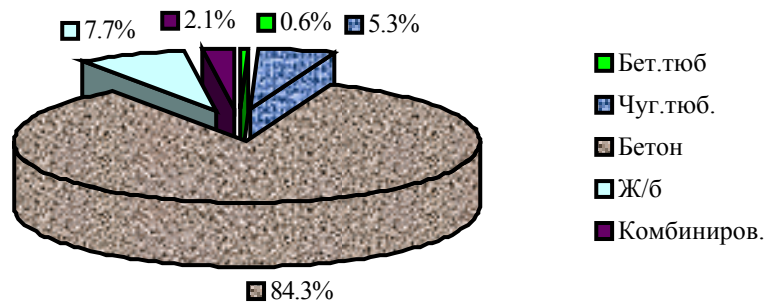


Рис.2. - Процентное соотношение видов крепи, распространенных в вертикальных стволах Донбасса

А также было выявлено, что с увеличением глубины и диаметра ствола усиливается отклонение формы крепи от проектной, т.е. крепь становится не круговым кольцом, а приобретает форму, внешний контур которой представляет собой окружность, а внутренний (в результате дефор-

мации опалубки) – овал (близкий к эллипсу), при этом их центры могут не совпадать в силу возможного отклонения центрального отвеса при установке опалубки. Все это приводит к формированию кольца крепи переменной толщины, которая в зависимости от глубины и диаметра изменяется в пределах от 48,8% до 148,5% от проектной. В связи с этим максимальные напряжения и деформации в местах ее максимального утонения увеличиваются, а несущая способность крепи снижается.

Отсюда логически была поставлена и решена одна из задач исследований - изучение изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) крепи в результате изменения формы и положения ее внутреннего контура и установление зависимости увеличения максимальных напряжений и деформаций крепи относительно исходных (при проектном положении опалубки) от глубины и диаметра ствола.

Для решения поставленной задачи использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в форме перемещений [4]. Для численного моделирования по этому методу используем программный комплекс «ЛИРА-Windows» (версия 8.01) [5]. Для расчета величин нагрузок написана программа NAGRUZ на языке QuickBasic 4.5.

Реализованный вариант МКЭ использует принцип возможных перемещений

$$a(u, v) = (f, v) \quad (1)$$

где u – искомое точное решение; v – любое возможное перемещение; $a(u, v)$, (f, v) – возможные работы внутренних и внешних сил.

Занимаемая конструкцией крепи область разбивается на конечные элементы Ω_r , назначаются узлы и их степени свободы L_j (перемещения и углы поворота узлов).

Степеням свободы соответствуют базисные (координатные, аппроксимирующие) функции μ_i , отличные от нуля только на соответствующих звездах элементов и удовлетворяющие равенствам

$$L_j \mu_i = \begin{cases} 1, i = j; \\ 0, i \neq j. \end{cases} \quad (2)$$

Приближенное значение U_h ищется в виде линейной комбинации базисных функций, удовлетворяющей главным (кинетическим) условиям

$$U_h = \sum_{i=1}^N u_i \mu_i, \quad (3)$$

где u_i – числа, N – количество степеней свободы.

Подставляя в (1) U_h вместо U и μ_j ($j = 1, \dots, N$) вместо v , получим систему МКЭ

$$\sum_{i=1}^N u_i a(\mu_i, \mu_j) = (f, \mu_j), \quad i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Обозначив через K матрицу жесткости с элементами $k_{ij} = a(\mu_i, \mu_j)$, P – вектор нагрузок с элементами $P_i = (f, \mu_i)$ и X – искомый вектор с элементами U_i , запишем систему (4) в матричной форме

$$KX = P. \quad (5)$$

Таким образом, применение МКЭ сводит задачу к системе линейных алгебраических уравнений (5). Решив ее, находим вектор X , затем из (3) – остальные компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС).

Так как крепь ствола работает совместно с вмещающим породным массивом, для изучения возникающего при этом НДС моделируем породный массив, в центре которого расположено круглое отверстие (моделирующее сечение ствола), ограниченное по контуру конечными элементами, моделирующими бетонную крепь.

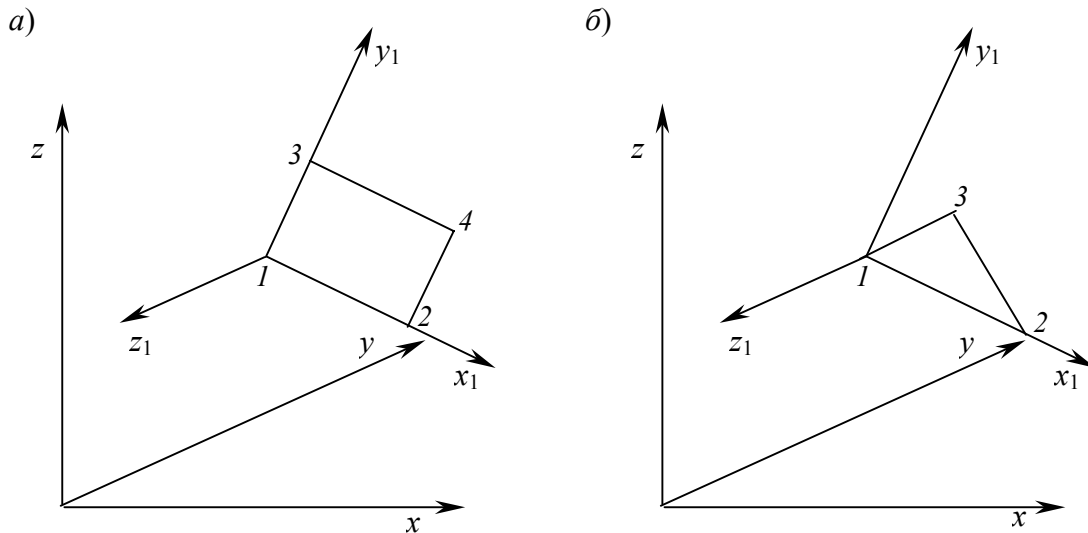


Рис. 3. Конечные элементы, принятые для моделирования:

а – универсальный прямоугольный конечный элемент пластины, принятый для моделирования вмещающих пород; *б* – универсальный треугольный конечный элемент пластины, принятый для моделирования монолитной бетонной крепи; $x_1y_1z_1$ – соответственно глобальная и локальная системы координат

Так как производится исследование изменения НДС от смещения внутреннего контура крепи и изменения формы поперечного сечения, постановки объемной задачи не требуется, поэтому ставится плоская задача с использованием для моделирования массива универсальных прямоугольных (рис. 3, *а*), а для моделирования крепи, в соответствии с рекомендациями [6], – универсальных треугольных (рис. 3, *б*) конечных элементов пластины с заданными жесткостными характеристиками.

Для исследования НДС монолитной бетонной крепи под воздействием нагрузок со стороны вмещающего породного массива, а также изменения НДС в результате отклонений крепи от проектных положения и формы для стволов различных диаметров, глубин, толщин крепи и вмещающих пород автором были разработаны 96 конечно-элементных моделей крепи и вмещающих пород, которые делятся на 2 группы:

– **I группа** (включает 48 моделей) – модели, определяющие базовое НДС, которое возникает при отсутствии отклонений крепи от проектных положения и формы.

– **II группа** (включает 48 моделей) – модели, характеризующие **критическое НДС**, которое возникает при изменении формы опалубки с глубиной и допустимом отклонении центрального отвеса (± 30 мм) в направлении большой полуоси эллипса опалубки, так как при таком смещении наблюдается максимальное утонение кольца крепи и ожидаются максимальные напряжения в бетоне.

В отличие от базовых моделей, задающих бетонное кольцо постоянной толщины, в моделях II группы внутренний контур крепи выполнен в виде эллипсов, большая полуось и эксцентриситет которых рассчитаны в зависимости от глубины и диаметра ствола по программе «Эллипс» [7].

Для оценки изменения НДС крепи ствола в результате изменения ее формы и возможного смещения опалубки были рассчитаны перемещения узлов и эквивалентные напряжения в конечных элементах моделей.

Пример разработанной конечно-элементной модели для расчета параметров базового НДС представлен на рис. 4 (модель для ствола диаметром в свету 6 м и толщиной крепи 250 мм, работающей под нагрузкой, рассчитанной для глубины 1200 м).

Пример конечно-элементной модели, характеризующей напряженно-деформированное состояние крепи с отклонениями формы и толщины от проекта, приведен на рис. 5 (модель для ствола диаметром в проходке 6,5 м, с переменной толщиной крепи, вследствие допустимого смещения и эл-

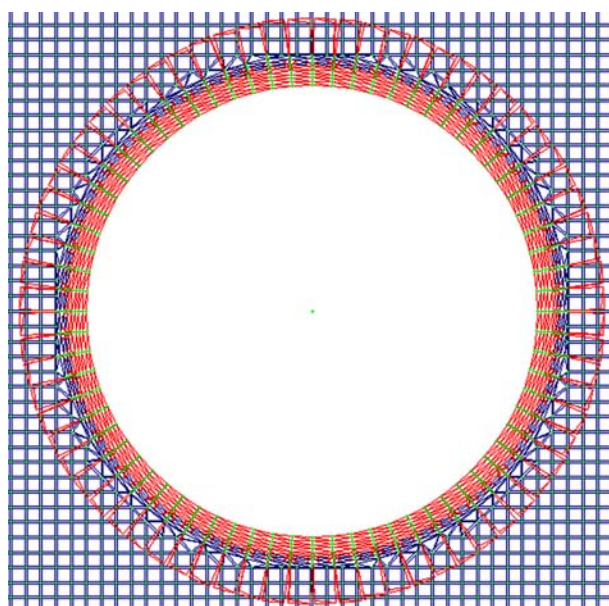


Рис. 4. Пример конечно-элементной модели крепи, определяющей базовое НДС:

- – закрепленный узел (шарнирно-неподвижная опора);
- – незакрепленный узел;
- / ▽ – конечные элементы, моделирующие породный массив;
- ▽ – конечный элемент, моделирующий крепь ствола;
- ▭ – равномерно распределенная нагрузка на крепь.

липтичности опалубки с соотношением полуосей эллипса 0,947, работающей под той же нагрузкой).

Расчет параметров НДС для моделей I группы производился с целью определения базовых смещений и напряжений, возникающих в крепи при строгом соблюдении технологии проходки и крепления ствола (кольцо постоянной толщины с центром, совпадающим с центром ствола). Расчет параметров критического НДС на моделях II группы производился для оценки изменения величин смещений узлов и напряжений в элементах модели

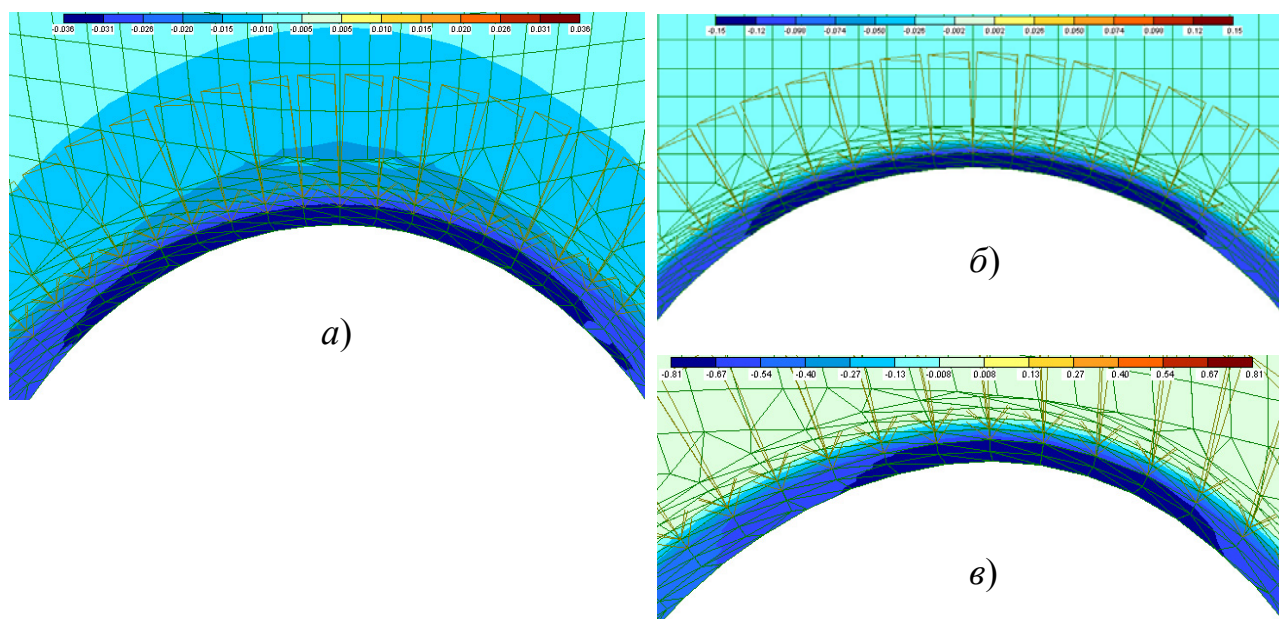


Рис. 5. Концентрации напряжений в местах максимального утонения крепи ствола, пройденного в породах:

a – крепких; *б* – средней крепости; *в* – слабых

относительно базового НДС, вследствие образования кольца крепи переменной толщины из-за технологических погрешностей крепления ствола (рис.5).

На каждой из 48 моделей исследовано НДС крепи и массива для 3 различных типов вмещающих пород: крепких, средней крепости и слабых и монолитной крепи из бетона класса В25. Принятые в моделях жесткостные характеристики конечных элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Механические характеристики моделируемых материалов [6]

Моделируемый материал (порода)	Модуль Юнга E , МПа·10 ⁻³	Коэффициент Пуассона ν	Удельный вес γ , кН/м ³
Бетон класса В25	30	0,2	25
Крепкий алевролит	25	0,34	27
Аргиллит	6	0,36	24
Углистый сланец	0,022	0,4	20

Выводы.

1. Проведенные на конечно-элементных моделях исследования свидетельствуют об увеличении максимальных эквивалентных напряжений и деформаций во всех рассматриваемых случаях отклонений положения и формы крепи от проектных. При этом максимальные концентрации сжимающих напряжений возникают в местах максимального утонения кольца крепи при всех исследованных типах вмещающих пород (см.рис. 4).

2. Необходимо максимальное использование новых нетрадиционных материалов и технологий, позволяющих повышать механические свойства бетонной крепи, в том числе их гидроизолирующую способность

3. Перспектива совершенствования технологии крепления стволов будет связана с применением упрочняющей гидростойкой крепи, с использованием геомеханических факторов при рассмотрении совместной работы системы «крепь ствола – вода – породный массив», что потребует дополнительных исследований

Литература:

1. Борщевский С.В. Современное направление развития технологии сооружения вертикальных стволов шахт. Сб. научн. трудов НГУ №17, т.1 – Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. – С.406-412.
2. Левит В.В., Новик Е.Б. К оценке механизма и показателей вывалообразования в шахтных стволах // Геотехническая механика. – 1998. - №9. – С. 126-131.
3. Булат А.Ф., Усаченко В.Б., Амелин В.А. Геомеханическое обоснование технологии возведения анкерной стяжной крепи в камерных выработках. // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1998. - №2. – С. 91-94.
4. Воронцов Г.В., Резниченко А.И., Нечаев Л.Б. Расчет напряженно-деформированного состояния конструкций по методу конечных элементов. – Новочеркасск: НГТУ, 1994. – 119 с.
5. Программный комплекс «ЛИРА-Windows». Руководство пользователя. В 8 т. – Киев: НИИАСС, 1997.
6. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
7. Прокопов А.Ю., Прокопова М.В. Реализация методики проектирования параметров монолитной бетонной крепи глубоких вертикальных стволов на ПЭВМ // Прогрессивные технологии строительства, безопасности и реструктуризации горных предприятий: материалы региональной научно-практической школы-семинара. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – С.202 - 209.