

$$\psi(\zeta) = \sum_{k=0}^{\infty} b_k \zeta^{-k},$$

здесь  $a_k, b_k$  - коэффициенты, подлежащие определению.

Далее, после подстановки выражений (10), (11) и (8) в граничное условие (2) и преобразований, выполненных следуя работе [2], удастся прийти к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов  $a_k, b_k$ .

В результате решения соответствующим образом укороченной системы находятся искомые коэффициенты, а из соотношений (10) – комплексные потенциалы. После чего определяются напряжения в среде  $S_0$  по формулам [1]:

$$\sigma_\rho = \frac{1}{|\omega'(\zeta)|^2} \operatorname{Re} \left\{ 2\tilde{\varphi}(\zeta)\bar{\omega}'(\zeta) - \frac{\zeta^2}{\rho^2} \left[ \bar{\omega}(\zeta)\tilde{\varphi}'(\zeta) - \bar{\omega}(\zeta)\frac{\omega''(\zeta)}{\omega'(\zeta)}\tilde{\varphi}'(\zeta) + \omega'(\zeta)\tilde{\psi}'(\zeta) \right] \right\},$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{|\omega'(\zeta)|^2} \operatorname{Re} \left\{ 2\tilde{\varphi}(\zeta)\bar{\omega}'(\zeta) + \frac{\zeta^2}{\rho^2} \left[ \bar{\omega}(\zeta)\tilde{\varphi}''(\zeta) - \bar{\omega}(\zeta)\frac{\omega''(\zeta)}{\omega'(\zeta)}\tilde{\varphi}'(\zeta) + \omega'(\zeta)\tilde{\psi}'(\zeta) \right] \right\},$$

$$\tau_{\rho\theta} = \frac{1}{|\omega'(\zeta)|^2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\zeta^2}{\rho^2} \left[ \bar{\omega}(\zeta)\tilde{\varphi}''(\zeta) - \bar{\omega}(\zeta)\frac{\omega''(\zeta)}{\omega'(\zeta)}\tilde{\varphi}'(\zeta) + \omega'(\zeta)\tilde{\psi}'(\zeta) \right] \right\}.$$

На основе представленного решения составлен полный алгоритм и в настоящее время ведется разработка программного обеспечения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М. Наука, 1996. – 708 с.
2. Фотиева Н.Н. Расчет обделок туннелей некругового поперечного сечения. - М.: Стройиздат, 1974. -240 с.

УДК 622.258

*Борщевский С.В., д.т.н., проф., Торубалко Д.Т., студ., ДонНТУ, Донецк, Украина, Тюткин А.Л., к.т.н., доц., ДНУЖТ им. Лазаряна, Днепрпетровск, Украина*

### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ СОПРЯЖЕНИЯ СТВОЛА

Целью данного исследования является определение напряженно-деформированного состояния (НДС) моделей системы «ствол – горизонтальная выработка» при взаимодействии крепления со слоистым деформативным мас-

сивом [1]. В качестве метода исследования использован метод конечных элементов (МКЭ), программная реализация которого базируется на профессиональном расчетном комплексе Structure CAD for Windows, version 7.31 R.4 (SCAD), который имеет значительную теоретическую разработку и практическую апробацию [1, 2].

Следует отметить, что проведение математического моделирования выполнено в упругой постановке, что несколько снижает точность полученных результатов, так как известно, что породный массив на больших глубинах деформируется в нелинейной области [3]. Однако упругая постановка вычислительного эксперимента позволяет определить основные тенденции деформирования сложной системы «ствол – горизонтальная выработка» и характер влияния слоистости на общее НДС модели.

Для проведения численных расчетов созданы две конечно-элементные модели (КЭ-модели, (рис. 1), которые являются континуальными на основе объемных конечных элементов. В качестве базового применялся КЭ библиотеки SCAD элемент 36 (8-узловой изопараметрический конечный объемный элемент задачи теории упругости), который наиболее соответствует геометрии модели и позволяет получить точные результаты. Тип КЭ, который применен в расчетах, определяется формой, функциями, которые определяют зависимость между перемещениями в узлах КЭ и узлов системы, физическим законом, который определяет зависимость между внутренними усилиями и внутренними перемещениями, и набором параметров (жесткостей), которые входят в описание этого закона и так далее. Все узлы и элементы схемы нумеруются. Номера, которые присвоены КЭ, следует трактовать только как имена, которые позволяют сделать необходимые ссылки в процессе расчета.

Таким образом, дискретизацию модели можно считать оптимизированной по параметру количества конечных элементов и их отношения к объему модели, что в дальнейшем положительно влияет на сходимость решения мультифронтальным методом с автоматическим способом оптимизации ширины ленты (точность разложения матрицы  $1 \cdot 10^{-6}$ ).

Правило знаков для перемещений принято таким образом, что линейные перемещения положительны, если они направлены в сторону возрастания соответствующей координаты, а углы поворота положительны, если они отвечают правилу правого винта.

Правило знаков для напряжений приняты следующие. Компоненты объемного напряженного состояния определяются для элементарного параллелепипеда, который выделен вокруг точки действия напряжений. Кроме того, устанавливаются нормальные напряжения  $N_x$  ( $\sigma_x$ ),  $N_y$  ( $\sigma_y$ ),  $N_z$  ( $\sigma_z$ ) и касательные напряжения  $T_{xy}$  ( $\tau_{xy}$ ),  $T_{yx}$  ( $\tau_{yx}$ ),  $T_{xz}$  ( $\tau_{xz}$ ),  $T_{zx}$  ( $\tau_{zx}$ ),  $T_{zy}$  ( $\tau_{zy}$ ),  $T_{yz}$  ( $\tau_{yz}$ ) (обозначение ком-

понт в комплексе SCAD). С учетом закона парности касательных напряжений ( $T_{xy}=T_{yx}$ ,  $T_{xz}=T_{zx}$ ,  $T_{yz}=T_{zy}$ ) выводятся лишь значения трех из них:  $T_{xy}$ ,  $T_{xz}$ ,  $T_{yz}$ .

На рис. 2 показаны положительные значения направлений напряжений и данного наименования соответствующих осей, вдоль которых они направлены, а также плоскостей, в которых они действуют.

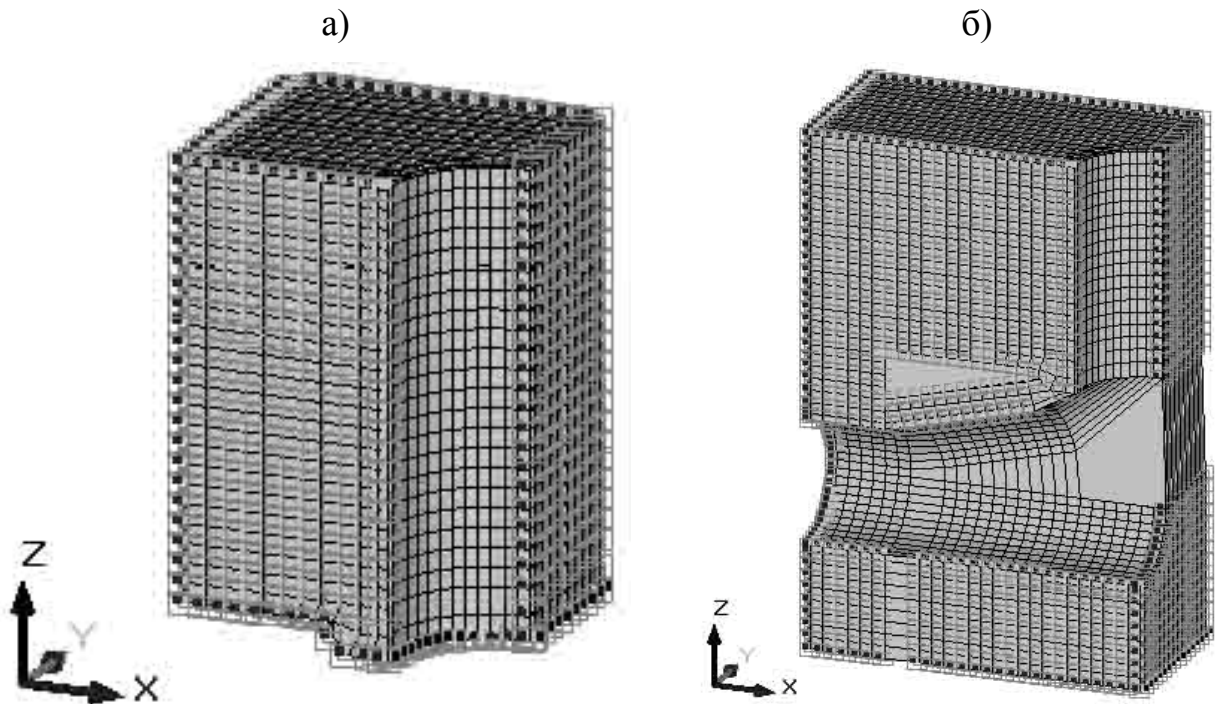


Рис. 1. КЭ-модели ствола (с граничными условиями):  
а) без сопряжения; б) вместе с сопряжением с горизонтальной выработкой

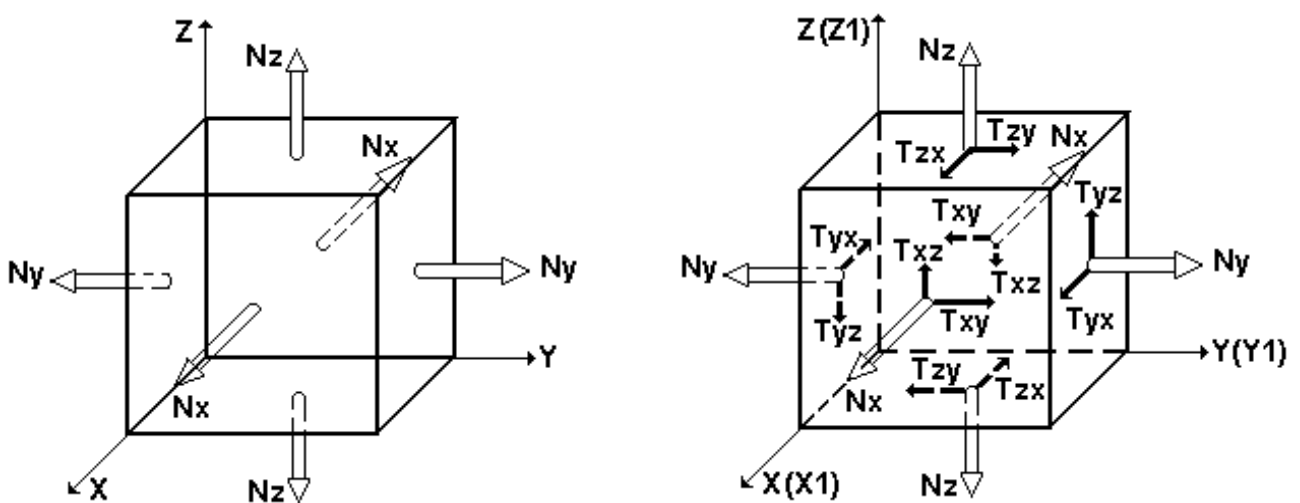


Рис. 2. Направление положительных значений напряжений

Созданные пространственные модели из объемных элементов для исследования НДС ствола и сопряжения (рис. 1) наиболее полно отражает следующие особенности реальной конструкции:

- влияние пространственного фактора на формирование напряженного состояния, то есть влияние третьей компоненты  $\sigma_y$  на компоненты  $\sigma_x$  та  $\sigma_z$ ;
- наиболее полное воссоздание взаимодействия железобетонного крепления с грунтовым массивом.

Разработка этих двух моделей также обусловлена проведением исследования влияния граничных условий, расположенных по нижней грани модели. В стандартных моделях, не учитывающих влияние сопряжения с горизонтальной выработкой на деформирование общей системы и ствола в частности, в качестве граничных условий по нижней грани КЭ-модели устанавливают запреты перемещений по всем трем степеням свободы. Однако, в реальной ситуации деформирования данной системы об отсутствии перемещений не приходится говорить, так как деформативность сопряжения явно конечна и позволяет стволу и окружающему массиву развиваться как горизонтальные, так и вертикальные перемещения. Поэтому результаты расчета КЭ-модели, представленной на рис. 1., а, являясь стандартными, будут сравниваться с результатами расчета общей системы «ствол – горизонтальная выработка», что позволит выяснить, насколько достоверными являются результаты расчета модели ствола без учета сопряжения.

Размеры расчетной области составляют: длина (по горизонтальной оси  $x$ ) – 13,4 м; высота (по вертикальной оси  $z$ ) – 48,0 м, ширина (по горизонтальной оси  $y$ ) – 15 м. Количество КЭ в моделях: 1-ой – 15 296, 2-ой – 33 114; количество узлов: 1-ой – 17 473, 2-ой – 37 193; количество степеней свободы: 1-ой – около 52 419, 2-ой – около 111 579. Данная задача может считаться задачей средней размерности (количество КЭ – до 50 тысяч).

Объем конечного элемента в моделях колеблется в пределах от  $0,12 \text{ м}^3$  до  $3 \text{ м}^3$  (специальные КЭ в месте сопряжения), что для модели таких размеров достаточно, чтобы сходимостр решения и точность результатов были достаточно высоки [2]. На рис. 3. представлены фрагменты второй КЭ-модели, в которой массив фрагментирован и для иллюстрации соединения частей модели показано лишь ее крепление.

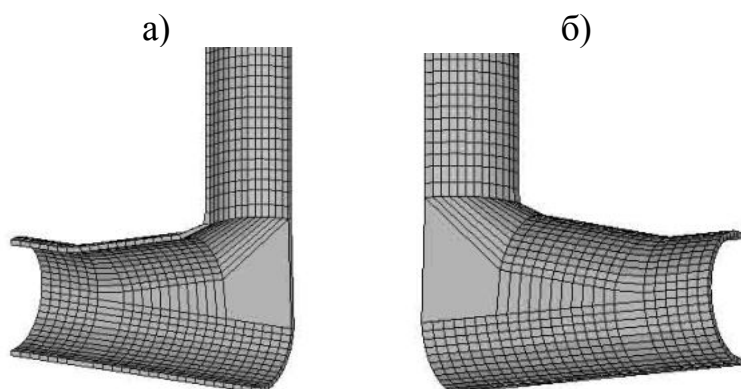


Рис. 3. Вид фрагмента КЭ-модели:  
а) вид со стороны ствола;  
б) вид со стороны массива

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер и др. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
2. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
3. Алексеев, А. Д. Предельное состояние горных пород [Текст] / А. Д. Алексеев, И. В. Недодаев. – К.: Наукова думка, 1982. – 200 с.

УДК 622.245.12

*Борщевский С.В., д.т.н., проф., Царенко С.Н., к.т.н., Руднев А.И., студ.,  
ДонНТУ, Донецк, Украина*

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТАЛЬНОЙ КРЕПИ ПРИ БУРЕНИИ ШАХТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ**

Бурение стволов представляет собой надежный и эффективный способ строительства вертикальных горных выработок [1] в самых различных горно-геологических условиях. Основным фактором, сдерживающим широкое применение этой технологии в условиях Украины, является высокая стоимость работ, которая соизмерима со специальными способами проходки стволов.

В настоящее время в отечественной практике и других странах СНГ для крепления стволов и скважин большого диаметра применяют, в основном, стальные секционные крепи, отличающиеся высокой металлоемкостью и стоимостью. Такой выбор конструкции крепи обусловлен высокой универсальностью применения ее в различных горно-геологических условиях. Применение других видов крепи носит эпизодический характер.

Расчету обсадных труб на прочность и устойчивость посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ [2,3], где предложены аналитические, полуэмпирические и эмпирические зависимости. Тем не менее, большинство этих методов не нашло применения при проектировании стальных крепей большого диаметра (свыше 2 м), что связано со спецификой их работы и конструкции. В связи с чем по причине не обоснованного теоретическими расчетами конструирования обсадных труб не редки случаи разрушения отдельных узлов обсадных колонн или потери устойчивости отдельных участков трубного става в период монтажа или эксплуатации.

Анализ структуры затрат стоимости, трудоемкости и продолжительности бурения скважин большого диаметра по традиционной технологии с креплением стальной колонной показал, что до 30-40% их приходится на процессы, связанные с креплением. Поэтому усовершенствование конструкции и технологии крепления стволов, за счет разработки новых методик расчета и проектирова-