

УДК 622.258

**А.Ю. Прокопов, Р.О. Саакян**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОКОЛОСТВОЛЬНОГО  
МАССИВА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ  
СОСТОЯНИЕ ЖЕСТКОЙ АРМИРОВКИ  
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ**

*Описано построение математических моделей для исследования напряженно-деформированного состояния жесткой армировки вертикального ствола при сочетании нагрузок от подъемного сосуда и породного массива. Определены поправочные коэффициенты для расчета напряжений в элементах армировки, учитывающие воздействие пород на крепь и армировку.*

*Ключевые слова: вертикальный ствол, армировка, околоствольный массив, напряженно-деформированное состояние, моделирование.*

---

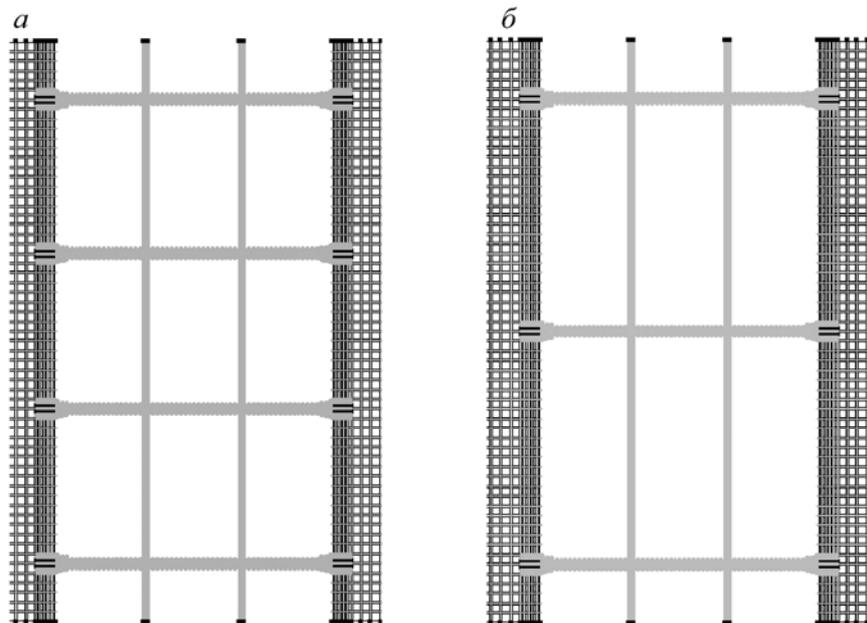
**В**опросы поддержания вертикальных стволов в целом, и их армировки в частности во многом определяют эффективность и безопасность работы подъемного комплекса. Ремонт и замена армировки – процесс, протяженный во времени и в пространстве, это обуславливает высокие издержки, связанные с остановкой ствола и соответствующим снижением производительности части или всего горнодобывающего предприятия.

Повреждения армировки могут вызываться как нарушениями при эксплуатации, так и несоответствием принятых конструкций армировки фактическим горно-геологическим и горнотехническим условиям. При проектировании армировки в настоящее время не учитываются нагрузки со стороны породного массива, воспринимаемые крепью и частично армировкой ствола и влияющие на напряженно-деформированное состояние армировки.

Для исследования влияния на армировку нагрузок со стороны породного массива и оценки напряжений и

деформаций в элементов армировки авторами была разработаны конечно-элементные модели, включающие породный массив, вертикальный ствол и его армировку. (рис. 1). Для более точного соответствия реальной конструкции в модели включены три связанных между собой яруса армировки с шагом 6,250 м (рис. 1, а) и четыре яруса с шагом 4,168 м (рис. 1, б). На моделях рассматривается нагружение среднего яруса в момент передачи на него силовых воздействий от движущегося подъемного сосуда, при этом оценивается случай работы армировки, когда к одному расстрелу крепятся два проводника.

В качестве исходных данных для построения модели взяты основные параметры схемы К-1 из ряда расстрельных армировок [1], с использованием разработанного авторами узла анкерного крепления расстрелов к стенке вертикального ствола [2]: профиль расстрела – двутавр № 27С, профиль проводника – рельс Р43, шаг армировки – 4168 мм или 6250 мм, длина расстрела – 6800 мм.



**Рис. 1. Конечноэлементные модели армировки с анкерным креплением:** *а* – с шагом 6,250 м; *б* – с шагом 4,168 м

Построение конечно-элементной модели и расчет параметров конструкции произведены с помощью компьютерного вычислительного комплекса «Лира-Windows 9.0».

Задачей исследований является изучение изменения напряженно-деформированного состояния армировки вертикального ствола от совместного влияния нагрузок от движущихся подъемных сосудов и со стороны массива пород, и установление зависимости увеличения максимальных напряжений и деформаций армировки относительно исходных (не учитывающих влияния нагрузок со стороны массива) от интенсивности движения подъемных сосудов.

Для решения поставленной задачи используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в форме перемещений [3]. Для численного моделирования по этому методу используем программный комплекс «ЛИРА-

Windows» (версия 9.0) [4]. Реализованный вариант МКЭ использует принцип возможных перемещений

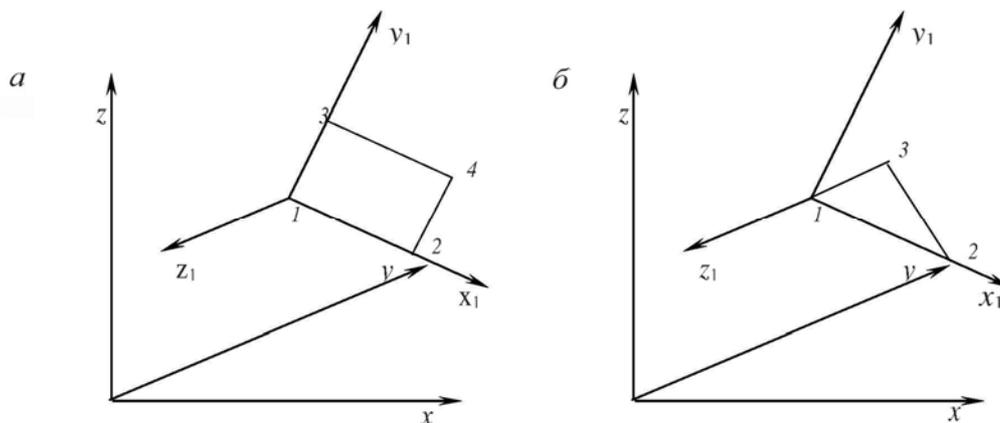
$$a(u, v) = (f, v) \quad (1)$$

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

Занимаемая конструкцией армировки, крепи и массива пород области разбивается на конечные элементы  $\Omega_r$ , назначаются узлы и их степени свободы  $L_j$  (перемещения и углы поворота узлов).

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

$$L_j \mu_i = \begin{cases} 1, & i = j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases}$$



**Рис. 2. 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;  $xuz, x_1y_1z_1$  – соответственно глобальная и локальная системы координат

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

$$U_h = \sum_{i=1}^N u_i \mu_i, \quad (2)$$

где  $u_i$  – числа,  $N$  – количество степеней свободы.

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

$$\sum_{i=1}^N u_i a(\mu_i, \mu_j) = (f, \mu_j), \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

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 (3) в матричной форме

$$KX = P. \quad (4)$$

Таким образом, применение МКЭ сводит задачу к системе линейных алгебраических уравнений (4). Решив ее, находим вектор  $X$ , затем из (2) – остальные компоненты напряженно-деформированного состояния (НДС).

Так как армировка взаимодействует не только с подъемными сосудами, но и с крепью ствола, которая работает совместно с вмещающим породным массивом, для изучения возникающего при этом НДС моделируем проводники, расстрелы, узлы крепления расстрелов к стенке вертикального ствола, крепь ствола и вмещающий породный массив.

Ставится плоская задача с использованием для моделирования массива и крепи универсальных прямоугольных (рис. 2, а), а для моделирования армировки, – универсальных треугольных (рис. 2, б) конечных элементов пластины с заданными жесткостными характеристиками.

Для оценки степени влияния на армировку породного массива по сравнению с воздействиями от подъемных сосудов были численно решены две группы задач:

- в первой группе модели нагружались только силами со стороны движущихся подъемных сосудов, рассчитанными для разных типов клеток и их скоростей в соответствии с действующей Методикой [5];

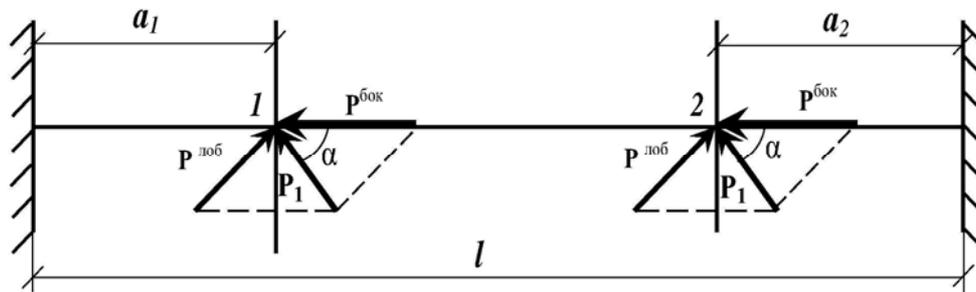


Рис. 3. Расчетная схема для определения прогибов и напряжений в расстреле

• во второй группе рассмотрено сочетание нагрузок от движущихся клеток и нагрузок со стороны массива, которые рассчитывались в соответствии с [6].

Проведенные исследования показали, что воздействия на армировку со стороны породного массива при больших глубинах и рабочих скоростях движения подъемных сосудов сравнимы с воздействиями подъемных сосудов, т.е. оказывают существенное влияние на работу армировки в процессе ее эксплуатации. Для учета этого в формулу расчета напряжений, возникающих в расстрелах, предлагается ввести поправочный коэффициент  $\chi_{внеш}$ , зависящий от глубины участка и интенсивности подъема по стволу, который будет отражать влияние внешних нагрузок.

Найдем взаимосвязь величины прогиба с напряжением, возникающим на ярусе в расстрельной балке. Для этого рассмотрим следующую расчетную схему.

Прогиб расстрельной балки  $f_p$ , м, под воздействием силы  $P$  определяется формулой

$$f_p = \frac{Pa}{24EJ_z}(3l^2 - 4a^2), \quad (5)$$

где  $P$  – результирующая сила,  $P = P_1 \sin \alpha$ ,  $P$  – сумма сил  $P_{\text{лоб}}$  и  $P_{\text{бок}}$  определяемых в соответствии с Мето-

дикой [5];  $\alpha$  – угла между силой  $P_1$  и продольной осью расстрельной балки;  $a_1$ ,  $a_2$  – расстояния от концов расстрельной балки до проводников, для рассматриваемой схемы армировки  $a_1 = a_2$ .

Из уравнения (5) выразим модуль Юнга:

$$E = \frac{Pa}{24EJ_z}(3l^2 - 4a^2). \quad (6)$$

Из закона Гука модуль Юнга выразится как:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – относительное удлинение расстрельной балки вдоль продольной оси, определяемое по формуле

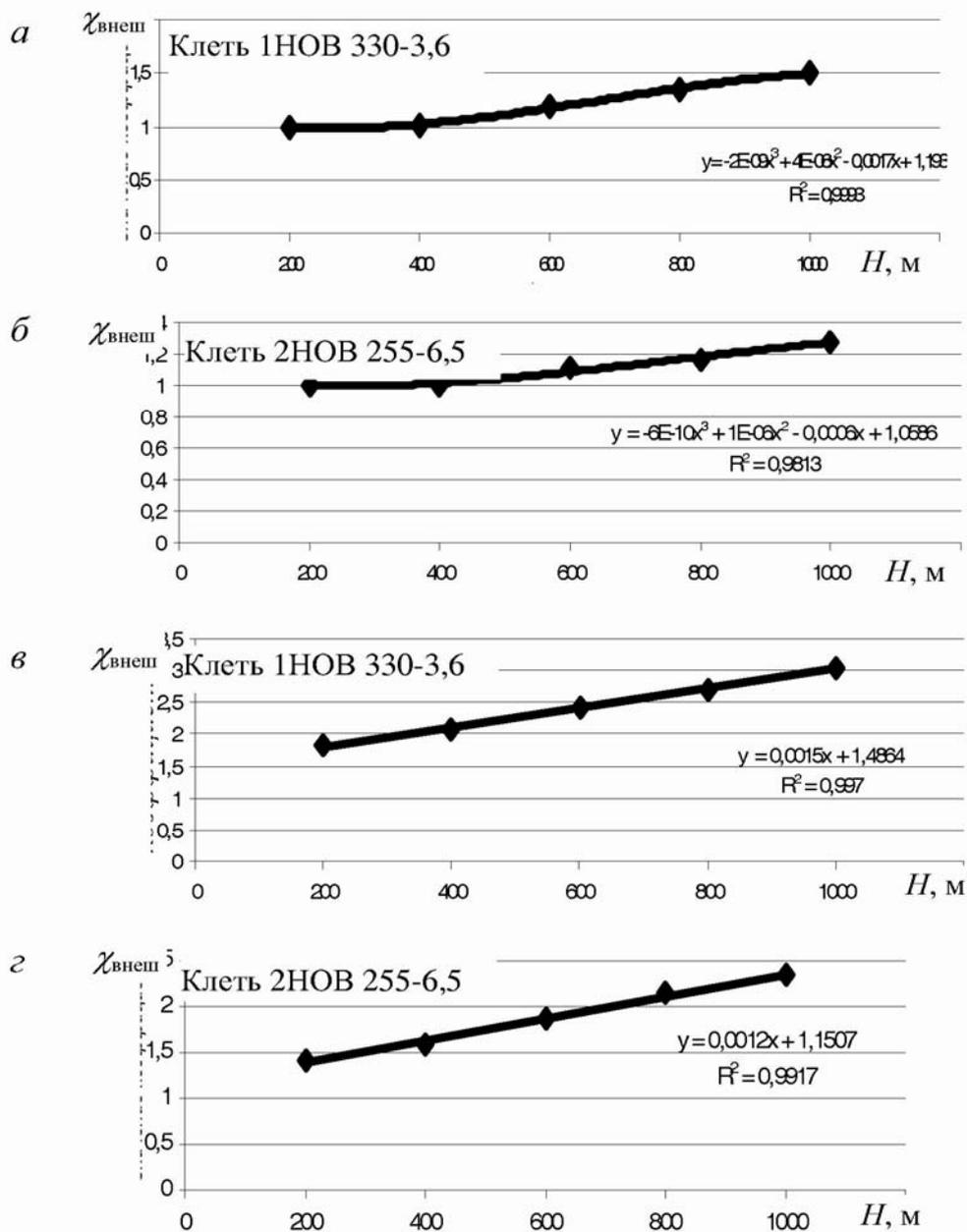
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l},$$

здесь  $\Delta l$  – удлинение расстрельной балки вдоль своей продольной оси.

Приравняв уравнения (6) и (7), получим уравнение напряжения расстрельной балки, возникающего от воздействия подъемных сосудов:

$$\sigma = \frac{\varepsilon Pa}{24fJ_z}(3l^2 - 4a^2).$$

Добавив в это уравнение найденный в результате моделирования поправочный коэффициент  $\chi_{внеш}$ , полу-



**Рис. 4.** Зависимость поправочного коэффициента  $\chi_{внеш}$  от глубины ствола при скорости движения клеток: а, б – 12 м/с; в, г – 8 м/с

чим выражение для оценки напряжений в

расстрельной балке от совместного воздействия подъемных сосудов и вмещающего породного массива:

$$\sigma = \chi_{\text{внеш}} \frac{\varepsilon Pa}{24fJ_z} (3l^2 - 4a^2) \leq [\sigma_{II}].$$

Коэффициент  $\chi_{\text{внеш}}$ , учитывающий воздействие внешних нагрузок со стороны околоствольного массива, зависит от глубины ствола, характеристик вмещающих пород, скорости и массы движущегося подъемного сосуда.

Значения коэффициентов  $\chi_{\text{внеш}}$  для условий Восточного Донбасса могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 4, в зависимости от глубины участка ствола и типоразмера клетки. Коэффициенты рассчитаны для максимально допустимой скорости движения клетки по стволу (12 м/с) и рабочих скоростей (6-8 м/с).

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- околоствольный массив оказывает существенное воздействие не только на крепь ствола, но и на его жесткую армировку. Это воздействие усиливается в глубоких стволах и стволах большого диаметра;

- при движении клеток с рабочими скоростями (6–8 м/с), степень воздействия вмещающего ствол породно-

1. *Типовые материалы для проектирования 401–011–87–89. Сечения и армировка вертикальных стволов с жесткими проводниками / Харьков: Южгипрошахт, 1989.*

2. *Прокопов А.Ю., Саакян Р.О., Павлинов П.А. Универсальный податливый ремонтпригодный узел крепления несущих элементов армировки шахтного ствола// Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2003. – Приложение № 4. – С. 75–79.*

3. *Воронцов Г.В., Резниченко А.И., Нечаев Л.Б. Расчет напряженно-деформированного состояния конструкций по мето-*

го массива сравнима с воздействием подъемных сосудов;

- на больших глубинах и в зонах деформирующегося массива воздействие пород на армировку становится определяющим и может увеличивать напряжения в расстрелах в 2,5–3 раза относительно напряжений, возникающих в них только от действия движущихся подъемных сосудов;

- в сложных горно-геологических условиях необходимы меры защиты армировки, которые должны предусматривать возможность податливости расстрелов и снижения тем самым напряжений в конструкциях армировки;

- при проектировании конструкции армировки и выборе профиля и типоразмера расстрелов, кроме нагрузок со стороны подъемных сосудов, должны учитываться нагрузки со стороны породного массива, которые существенно ухудшают напряженно-деформированное состояние породного массива и могут быть рассчитаны по найденным зависимостям или графикам (рис. 4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ду конечных элементов. – Новочеркасск: НГТУ, 1994. – 119 с.

4. *Программный комплекс «ЛИРА-Windows». Руководство пользователя. В 8 т. – Киев: НИИАСС, 1997.*

5. *Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт.– ВНИИГМ им. М.М. Федорова.– Донецк, 1985.– 160 с.*

6. *Бульчев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1994. – 382 с.*

7. *Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Недра, 1976. – 608 с. ГИАС*

#### Коротко об авторах

*Прокопов А.Ю.* – доктор технических наук, заместитель директора Шахтинского института (филиала) ГОУ ВПО ЮРГТУ (НПИ) по образовательной деятельности, профессор кафедры Подземное, промышленное, гражданское строительство и строительные материалы, prokorov72@rambler.ru

*Саакян Р.О.* – кандидат технических наук, начальник производственно-технического отдела ЗАО «ОШК «Союзспецстрой», г. Москва

