

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЗАПАС ПРОЧНОСТИ БЕТОННОЙ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА

Д. В. Бабец, А. В. Солодянкин, А. Е. Янкин

Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»

просп. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: dbabets@i.ua, alex.solodyankin@gmail.com, sieges@ua.fm

Показано, что дальнейшее увеличение добычи угля в Украине, даже без строительства новых шахт, предполагает большой объем работ по сооружению стволов. В связи с этим актуальной задачей является совершенствование конструктивных и технологических параметров стволов. Целью статьи является оценка запаса прочности крепи ствола с учетом изменения ее толщины, обусловленной неровностями внешнего контура, смещением положения опалубки и различной прочностью бетона – факторов, имеющих стохастическую природу. Для исследования и оценки степени влияния технологических факторов на величину запаса прочности монолитной бетонной крепи ствола принят метод группового учета аргументов. Доказано, что наибольшее влияние на величину коэффициента запаса прочности крепи оказывают отклонения породного контура и расчетная прочность бетона. Остальные факторы систематического воздействия не оказывают. Полученные результаты являются основанием для совершенствования технологии проходки и крепления стволов, в частности, минимизации объемов разрушаемой породы и применяемого бетона, а также обеспечения требуемого запаса прочности крепи.

Ключевые слова: ствол, буроподрывные работы, бетонное крепление, неровности контура, метод группового учета аргументов, коэффициент запаса.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ЗАПАС МІЦНОСТІ БЕТОННОГО КРІПЛЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТВОЛА

Д. В. Бабець, О. В. Солодянкин, О. Є. Янкінін

Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»

просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: dbabets@i.ua, alex.solodyankin@gmail.com, sieges@ua.fm

Зазначено, що подальше збільшення видобутку вугілля в Україні, навіть без будівництва нових шахт, передбачає великий обсяг работ зі спорудження стволів. В умовах діючих шахт необхідність будівництва стволів викликана збільшенням глибини розробки та площі шахтних полів, а також інтенсифікацією гірничих работ. У зв'язку з цим актуальним науково-технічним завданням є вдосконалення конструктивних і технологічних параметрів стволів. При проектуванні кріплення стволів необхідно враховувати не тільки детерміновані складові, а й випадкові величини, внесок яких в кінцеву міцність кріплення може бути різним. Метою статті є оцінка запаса міцності кріплення стволів з урахуванням зміни його товщини, обумовленою нерівностями зовнішнього контуру, зміщенням положення опалубки і різною міцністю бетону – чинників стохастичної природи. Для дослідження та оцінки ступеня впливу геомеханічних і технологічних чинників на величину запаса міцності монолітного бетонного кріплення ствола прийнятий метод групового обліку аргументів. На першому етапі досліджень виконаний розрахунок коефіцієнту запаса міцності бетонного кріплення за нормативною методикою визначення товщини кріплення ствола. На другому етапі досліджень виконане чисельне моделювання коефіцієнту запаса міцності бетонного кріплення за алгоритмом методу групового обліку аргументів з урахуванням його фактичної товщини, що залежить від особливостей проведення технологічних операцій у вибої ствола – виїмки породи, приготування та укладання бетону. Доведено, що найбільше на величину коефіцієнта запаса міцності кріплення впливають відхилення породного контуру і розрахункова міцність бетону. Інші чинники систематичного впливу не мають. Отримані результати є підставою для вдосконалення технології проходки та кріплення стволів, зокрема, мінімізації обсягів зруйнованої породи та бетону, а також забезпечення необхідного запаса міцності кріплення.

Ключові слова: ствол, буропідривні роботи, бетонне кріплення, нерівності контуру, метод групового обліку аргументів, коефіцієнт запаса.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Сооружение вертикальных стволов связывают, как правило, со строительством новых шахт. Тем не менее, добыча угля в Украине уже третий десяток лет ведется за счет разведанных запасов на существующих предприятиях, а также за счет увеличения площадей шахтных полей, подготовки глубоких горизонтов, вовлечения в отработку законсервированных запасов, или тех, которые ранее считались экономически невыгодными или недоступными.

Одновременно происходит интенсификация очистных и горнопроходческих работ за счет внедрения высокопроизводительной техники и совершенствования организации труда.

Добыча угля на действующих шахтах вызывает необходимость увеличения протяженности и площади поперечного сечения выработок, производительности подъема, повышения объемов подаваемого воздуха для нормального проветривания, увеличивает водопиток и потребность откачки воды из шахты. С целью решения возникших проблем, только за период с 2000 по 2010 год для улучшения проветривания выработок, уменьшения транспортных расходов по доставке в шахту людей, оборудования, выдачи породы, было построено три ствола на шахте имени Засядько, два – на шахте «Красноармейская»

Западная» №1, по одному стволу на шахтах «Прогресс» и «Краснолиманская». Планируется сооружение гезенка для вентиляции, спуска угля, породы, людей и оборудования на шахте «Степная» ЧАО «ДТЭК–Павлоградуголь» [1].

Таким образом, дальнейшее увеличение добычи угля, даже без строительства новых шахт, предполагает большой объем работ по сооружению стволов, а значит, необходимость совершенствования их конструктивных и технологических параметров для повышения эффективности работы и снижения стоимости этих объектов.

Проектирование крепи шахтных стволов основано на положении, что крепь при действующих на нее внешних нагрузках не должна разрушаться. В настоящее время при проходке вертикальных стволов в основном применяется буровзрывной способ выемки пород с возведением крепи из монолитного бетона (около 90 % протяженности стволов). В результате буровзрывных работ образуются значительные неровности контура ствола, приводящие к неравномерной случайной нагрузке на крепь, отклонениям толщины крепи, увеличению объема выдаваемой из ствола породы и перерасходу бетона при возведении крепи [2].

Фактическая прочность бетона также характеризуется как случайная величина и требует соответствующего учета при проектировании крепи.

В методике расчета параметров крепи указанные случайные величины, могут быть учтены средним значением отклонений и изменчивостью. Зависимости этих величин от основных влияющих факторов, позволяют корректировать технологические параметры проходки для минимизации объемов разрушаемой породы и применяемого бетона без снижения прочности крепи [3].

Целью статьи является оценка запаса прочности крепи ствола с учетом различной ее толщины, обусловленной неровностями внешнего контура, смещением положения опалубки и изменением прочности бетона.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.
Обоснование метода исследований. Устойчивость горных выработок определяется большим количеством горно-геологических, геомеханических и технологических факторов, степень влияния которых, неодинакова. Логично предположить, что среди этого множества факторов существует некоторое количество наиболее влияющих, которые обуславливают степень проявления горного давления и состояние выработок.

При решении различных научно-исследовательских задач возникает необходимость обработки экспериментальных данных с целью установления закономерностей изучаемых процессов и явлений. Широко признанным методом построения, анализа и оптимизации математических моделей различных технических, технологических, социальных и экономических процессов является метод группового учета аргументов (МГУА) [4, 5].

В основу метода положен так называемый геделевский подход: только внешние критерии, основанные на новой информации, позволяют найти

истинную модель объекта, скрытую в зашумленных данных. Второй основой теории самоорганизации моделей явился принцип неокончателных решений Габора [6]. Согласно этому принципу всякая одно-рядная процедура может быть заменена многорядной при условии сохранения достаточной свободы выбора нескольких лучших решений каждого предыдущего ряда. При геделевском подходе и сохранении свободы выбора многорядный алгоритм МГУА позволяет найти единственную модель оптимальной сложности по минимуму внешнего критерия селекции.

В многорядном алгоритме МГУА на вход подается некоторый вектор входных переменных $X = x_1; x_2; \dots; x_n$.

На первом ряду селекции образуются частные описания, объединяющие входные переменные по две:

$$y_1 = f_{11}(x_1, x_2), y_2 = f_{12}(x_1, x_2), y_s = f_{1s}(x_{n-1}, x_n). \quad (1)$$

Из них выбираются F описаний, наиболее удовлетворяющих внешнему критерию селекции.

На втором ряду образуются p частных описания второго ряда:

$$z_1 = f_{21}(y_1, y_2), z_2 = f_{22}(y_1, y_2), \dots, z_p = f_{2p}(y_{s-1}, y_s). \quad (2)$$

Из них выбирается F лучших для использования в следующем, третьем ряду и т.д. Для каждого ряда находится наилучшая (по критерию селекции) модель. Ряды селекции наращиваются, пока оценка критерия уменьшается.

По виду опорной функции f выделяют различные виды многорядного алгоритма МГУА. Ниже приведены наиболее используемые численные процедуры.

1. *Алгоритм с линейными полиномами* – использует частные описания вида:

$$y_k = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j,$$

где $1 < i, j < n$, n – число входных аргументов.

2. *Алгоритм с ковариациями и квадратичными частными описаниями* – использует частные описания двух видов:

$$y_k = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j,$$

$$y_k = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 + a_5 x_j^2.$$

3. *Алгоритм со случайным выбором партнеров* – расширяет перебор и включает в себя пары переменных разных рядов селекции.

4. *Алгоритм с последовательным выделением трендов.* Трендами называют уравнения регрессии по любому одному аргументу. Данный вид алгоритма использует частные описания вида:

$$y_k = a_0 + a_1 f_1(x_1) + a_2 f_2 + \dots + a_m f_m(x_m).$$

5. *Алгоритм с мультипликативными моделями.* В этом виде алгоритма используются частные описания в классе произведений различных трендов:

$$y_k = a_0 f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_m(x_m).$$

6. *Обобщенный алгоритм МГУА*. Использует опорную функцию, включающую в себя как произведения, так и суммы трендов.

Класс моделей, генерируемых с помощью много-рядного алгоритма МГУА, в общем случае имеет вид:

$$y = \sum_{q=1}^s a_q \times \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha} \quad (3)$$

где y – выходная переменная, q – номер члена в модели, $q = 1, 2, \dots, s$; s – число членов в модели; a_q – коэффициент при q -м члене; x_j – j -я входная переменная $j = 1, 2, \dots, n$; n – число входных переменных; α – показатель степени, в которой j -я входная переменная входит в q -й член.

В математических моделях, сгенерированных по данной методике, влияние исходных данных, составляющих выходную зависимость, не одинаково. Влияние фактора определяется очередностью попадания в модель (q). Так, наиболее влияющие характеристики (образующие) входят в модель на первом ряду генерации ($q = 1$), менее влияющие – на втором ($q = 2$) и т.д.

Отдельным подходом, применяемым к генерации моделей по методу группового учета аргументов, является искусственная нейронная сеть [7].

Идея нейронных сетей родилась в рамках теории искусственного интеллекта, в результате попыток имитировать способность биологических нервных систем обучаться и исправлять ошибки. Нейронные сети – это модели биологических нейронных сетей мозга, в которых нейроны имитируются относительно простыми, часто однотипными, элементами (искусственными нейронами). Нейронная сеть может быть представлена направленным графом с взвешенными связями, в котором искусственные нейроны являются вершинами, а связи – дугами [8].

Нейронные сети широко используются для решения различных задач. Среди областей применения нейронных сетей – автоматизация процессов распознавания образов, прогнозирование, адаптивное управление, создание экспертных систем, организация ассоциативной памяти, синтез и идентификация электронных цепей и систем.

Адаптация алгоритма МГУА к решению задачи вероятностной оценки коэффициента запаса устойчивости крепи ствола. Применим много-рядный алгоритм МГУА к задаче оценки устойчивости горной выработки – вертикального ствола, функционирующего в стохастически неоднородном массиве.

Основным расчетным параметром, определяющим несущую способность крепи, является ее толщина. В основу формулы по расчету толщины крепи положена известная формула Ляме (расчет толсто-стенного кольца) [9]:

$$b = r_0 \left(\sqrt{\frac{R_{np}}{R_{np} - 2P}} - 1 \right). \quad (4)$$

Расчетная толщина бетонной крепи ствола, в соответствии с нормативной методикой, изложенной в КД 12.01.01.201–98 (Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах, Донецк, 1998), определяется с учетом поправочных коэффициентов:

$$b = m_y r_0 \left(\sqrt{\frac{m_{\sigma_1} m_{\sigma_2} m_{\sigma_3} R_{np}}{m_{\sigma_1} m_{\sigma_2} m_{\sigma_3} R_{np} - 2k_p P_{общ}} - 1} \right) - \delta_{np}, \quad (5)$$

где r_0 – радиус ствола в свету, мм; R_{np} – расчетное сопротивление бетона сжатию, кПа; $P_{общ}$ – суммарное горизонтальное горное и гидростатическое давление, кПа; δ_{np} – толщина породобетонной оболочки, образующейся за счет проникновения бетона в окружающие нарушенные породы, мм; $m_y, m_{\sigma_1}, m_{\sigma_2}, m_{\sigma_3}, k_p$ – коэффициенты, учитывающие специфику горно-геологических условий и особенности эксплуатации, которые не могут быть непосредственно смоделированы в расчетной схеме.

Кроме этого, в расчетной формуле при определении суммарного горизонтального давления $P_{общ}$ учитывается устойчивость породного массива оцениваемое коэффициентом C – критерий устойчивости пород (для категории I – устойчивые породы $C < 3$, для категории IV – очень неустойчивые породы $C > 10$).

Расчетное сопротивление массива пород сжатию $R_c = R \cdot k_c$ определяется с учетом коэффициента структурного ослабления k_c , где R – среднее значение сопротивления пород в образце одноосному сжатию, МПа (кгс/см²).

В реальных условиях прочность бетонной крепи будет определяться другими факторами, которые не учитываются математическим выражением (5).

В первую очередь, к таким факторам относятся неровности контура ствола после проведения буровзрывных работ. Как было показано в [10], их размер и форма – случайные величины, обычно, выходящие за проектный контур ствола и возрастающие с увеличением крепости пород.

Внутренний контур также не является идеальной окружностью и, в зависимости от жесткости опалубки, имеет определенную степень эллиптичности. Фактическая величина эллиптичности сама по себе не оказывает заметного влияния на напряженно-деформированное состояние крепи, однако при совместном влиянии неровностей внешнего контура, эксцентриситета [11], прочности бетона, трещиноватости может оказаться существенной.

Принятая в (5) прочность бетона не учитывает главного фактора – неоднородности бетона, и, в связи с этим, неоднозначности его прочностных показателей.

Однако, рассчитанная по (5) толщина крепи b_p для участков ствола, находящихся в различных по свойствам и прочности породах (минимальная – для крепких, плотных, сухих и максимальная – для слабых, трещиноватых, обводненных), округляется по максимальному рассчитанному значению и устанавливается как окончательно принятая толщина крепи ствола $b_{пр}$. Таким образом, наибольший коэффициент запаса прочности будет иметь участок ствола в крепких, устойчивых породах, наименьший – в слабых, обводненных.

В табл. 1 приведены исходные данные и результаты расчета толщины крепи для воздухоподающего ствола № 3 ПАО ШУ «Покровское» по нормативной методике в соответствии с КД 12.01.01.201–98. Расчет выполнен для 37-ти поперечных сечений ствола в интервале глубин $H = 308,6 \dots 848,9$ м. Установлено, что наибольшая толщина крепи для бетона класса

B25 ($R_b = 300$ МПа) составляет: на участках устойчивых пород $b_p = 0,115$ м, на участках трещиноватых, обводненных пород $b'_p = 0,874$ м.

Запас прочности бетонной крепи для рассматриваемых участков определим по отношению расчетной толщины крепи b_p к принятой $B_{np} = 0,4$ м:

$$K_{zy} = \frac{b_p}{B_{np}} \quad (6)$$

Для рассмотренных условий коэффициент запаса прочности составляет от $K_{zy} = 0,46$ – для сложных геомеханических условий до $K_{zy} = 19,18$ – для участков ствола, пересекающего прочные и необводненные породы.

Таблица 1 – Исходные данные и расчетные значения величин, полученные по методике КД 12.01.01.201–98

Обозначение	Наименование показателя	Значение
H	глубина участка ствола, м	308,6...849,9
γ	плотность пород, кН/м ³	25,0...28,4
f	коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова	1,0...9,0
k_c	коэффициент структурного ослабления	0,4...0,8
$R_c k_c$	прочность пород с учетом коэффициента структурного ослабления	36,0...81,0
$\Theta = R_c k_c / \gamma H$	показатель условий разработки	0,17...0,86
C	критерий устойчивости ствола	0,95...3,92
$P_{гидр}$	гидростатическое давление, МПа	204,0...833,0
$P_{гор}$	горное давление, МПа	15,0...139,0
$P_{общ}$	суммарное горное и гидростатическое давление, МПа	26,0...864,0
R_b	прочность бетона (крепи), МПа	15,6...42,9
b_p	расчетная толщина крепи на участках устойчивых пород, м	0,021...0,115
b'_p	расчетная толщина крепи на участках обводненных трещиноватых пород, м	0,238...0,874
B_{np}	принятая толщина крепи, м	0,4

Все 5 участков ствола с коэффициентом запаса прочности крепи $K_{zy} < 1,0$ приурочены к местам залегания трещиноватых обводненных пород, где наряду с горным давлением, на крепь воздействует значительное гидростатическое давление

Следует отметить, что участки трещиноватых обводненных пород подвергаются предварительному тампонажу цементно-песчаным раствором с поверхности. Поэтому толщина крепи после тампонажа должна быть пересчитана для уже упрочненных пород.

Выполним оценку устойчивости участка ствола рассматриваемых сечений для фактических параметров крепи. Примем в качестве основной величины, по которой выполняется оценка устойчивости ствола на конкретной отметке глубины значение K'_{zy} – условный коэффициент запаса прочности крепи. В данном случае фактическую толщину крепи B_ϕ принимаем как условный эквивалент ее предельно допустимой прочности для конкретного сечения ствола:

$$K'_{zy} = \frac{b_p}{B_\phi} \quad (7)$$

где $B_\phi = B_{np} \pm \Delta R_{bc} \pm \Delta R_{ce}$ – фактическая толщина крепи ствола с учетом неровностей внешнего породного контура ΔR_{bc} , эллиптичности и эксцентриситета крепи ΔR_{ce} , определенная по результатам

натурных исследований; b_p (b'_p) – толщина крепи, рассчитанная по (5).

С учетом этого можно записать:

$$K'_{zy} = \frac{m_y r_0 \left(\sqrt{\frac{m_{\sigma_1} m_{\sigma_2} m_{\sigma_3} R_{np \text{ факт}}}{m_{\sigma_1} m_{\sigma_2} m_{\sigma_3} R_{np \text{ факт}} - 2k_p P}} - 1 \right) - \delta_{np}}{B_\phi} \quad (8)$$

Фактические значения ΔR_{bc} и ΔR_{ce} определяли при проходке вертикального ствола:

– ΔR_{bc} – после выполнения буровзрывных работ путем фактических замеров радиуса стенок ствола вчерне для фиксированной точки;

– ΔR_{ce} – после возведения на участке ствола бетонной крепи для той же фиксированной точки на уровне подвешенного полка;

– $R_{np \phi}$ – фактическая прочность бетона – по результатам испытания образцов-кубов для соответствующей партии бетонной смеси, укладываемой в опалубку.

В табл. 2 приведены фактические значения показателей крепи в сечении ствола и прочности бетона по результатам лабораторных испытаний.

Таблица 2 – Исходные данные и расчетные значения величин для оценки фактической толщины крепи и условного коэффициента запаса прочности

Обозначение	Наименование показателя	Значение
ΔR_{bc}	отклонение породного контура от проектной величины радиуса в проходке, м	0,25...0,36
ΔR_{ce}	отклонение внутреннего контура от проектного значения (эллиптичность и эксцентриситет), м	0,06...0,05
$R_{np \phi}$	фактическая прочность бетона (средняя прочность), МПа	15,2...42,4 (28,8)
B_ϕ	фактическая толщина крепи с учетом отклонений породного контура, эллиптичности и эксцентриситета, м	0,13...0,80

Горно-геологические данные по стволу и результаты расчета горного и гидростатического давления приведены в табл. 1. Выходная переменная – $K'_{з\text{у}}$ – условный коэффициент запаса прочности крепи.

Результаты аналитических исследований и математические модели. В результате выполненных расчетов определены значения условного коэффициента запаса прочности крепи, величина которого изменялась в пределах $K'_{з\text{у}} = 0,57 \dots 24,05$.

Все измерения и расчеты были выполнены в 37 замерных точках (уровнях), как и на предыдущем

этапе. Условный коэффициент запаса прочности крепи $K'_{з\text{у}}$ с учетом всех случайных показателей оказался меньше 1,0 всего в трех точках.

В результате численного моделирования с использованием различных критериев структурной идентификации, а также искусственных нейронных сетей с обучением на разных частях исходной выборки, получены следующие математические модели.

1. Модель, при генерации которой использовались 75% исходных данных в качестве обучающей выборки (рис. 1):

$$K'_{з\text{у}} = 13,6965 + 0,0005 \cdot R_{\text{пр.ф.}} \cdot \sqrt[3]{\Delta R_{\text{вч}}} + R_{\text{пр.ф.}}^2 \cdot 8,145 \times 10^{-8} - 2,00743 \cdot \sqrt{C \cdot P_{\text{общ.}}}$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$. Корреляция 0,93.

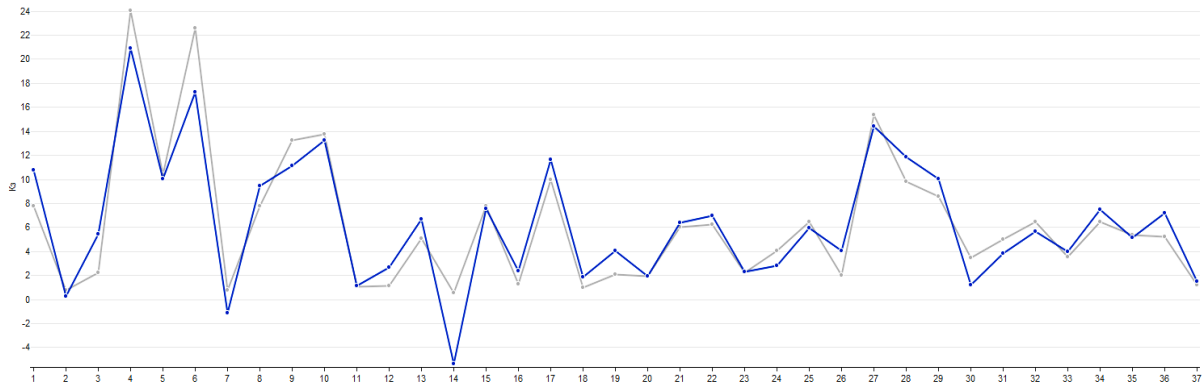


Рисунок 1 – Значения выходной переменной $K'_{з\text{у}}$ модель 1

На графике серым цветом (тонкая линия) показаны реальные значения выходной переменной, а темно-синим (жирная линия) – значения, полученные при моделировании.

2. Модель, при генерации которой использовались 15% исходных данных в качестве обучающей выборки (рис. 2):

$$K'_{з\text{у}} = 0,66653 + 0,0025 \cdot Q \cdot R_{\text{пр.ф.}} - 0,03587 \cdot Q \cdot P_{\text{общ.}} + 0,001696 \cdot \Delta R_{\text{вч}} \cdot R_{\text{пр.ф.}}$$

Коэффициент детерминации $R^2=0,94$. Корреляция 0,93.

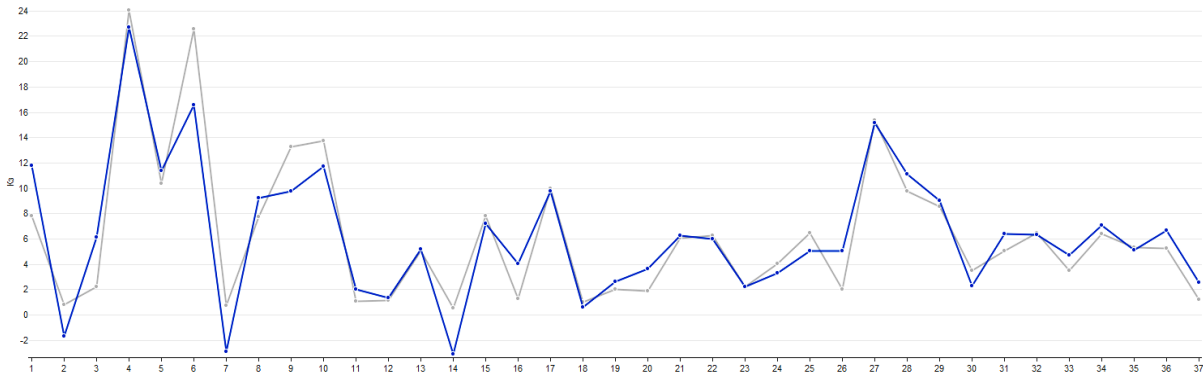


Рисунок 2 – Значения выходной переменной $K'_{з\text{у}}$ модель 2

3. Модель, при генерации которой использовались 20% исходных данных в качестве обучающей

выборки (рис. 3):

$$K'_{з\text{у}} = 5,7814 + 0,2049 \cdot \sqrt[3]{R_{\text{вч}}} \cdot R_0 + 0,0344 \cdot \sqrt[3]{R_0^2} - 2,05942 \cdot \sqrt[3]{C \cdot P_{\text{общ.}}}$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$. Корреляция 0,93.

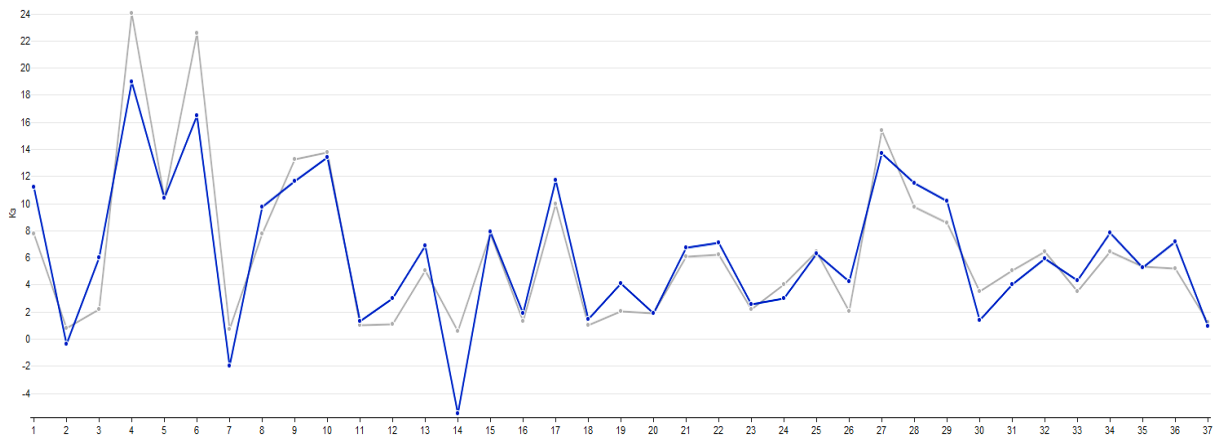


Рисунок 3 – Значения выходной переменной K'_{zy} модель 3

4. Нейронная сеть, при генерации которой использовались 10 % исходных данных в качестве обучающей выборки (рис. 4):

$$K'_{zy} = -0,00965573 - 0,3889 \cdot \Delta R_{вч}^2 \cdot N_3 + 0,0003 \cdot N_3^2,$$

где $N_3 = 0,0456266 - 0,152855 \cdot C - 0,0137125 \cdot C \cdot N_4 + 0,0612281 \cdot C^2 + 1,02147 \cdot N_4,$

$$N_4 = 1,78926 - 0,091 \cdot \sqrt[3]{R_6} + 1,00728 \cdot N_5 + (7,82697 \times 10^{-5}) \cdot N_5^2,$$

$$N_5 = 0,373555 - 0,79627 \cdot k_c^2 + 0,992601 \cdot N_6 + 0,00054 \cdot N_6^2,$$

$$N_6 = 0,006184 + 0,0261 \cdot \sqrt[3]{\Delta R_{св}}.$$

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,999$. Корреляция 0,999.

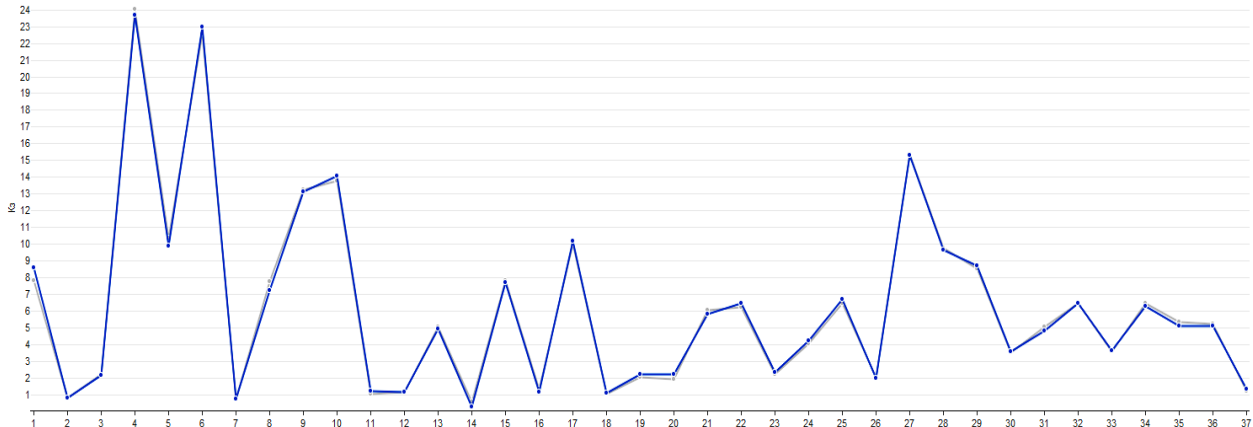


Рисунок 4 – Значения выходной переменной K'_{zy} нейронная сеть (модель 4)

5. Нейронная сеть, при генерации которой использовались 33 % исходных данных в качестве обучающей выборки (рис. 5):

$$K'_{zy} = -0,045 - 0,00074 \cdot N_4^2 + 1,01547 \cdot N_2,$$

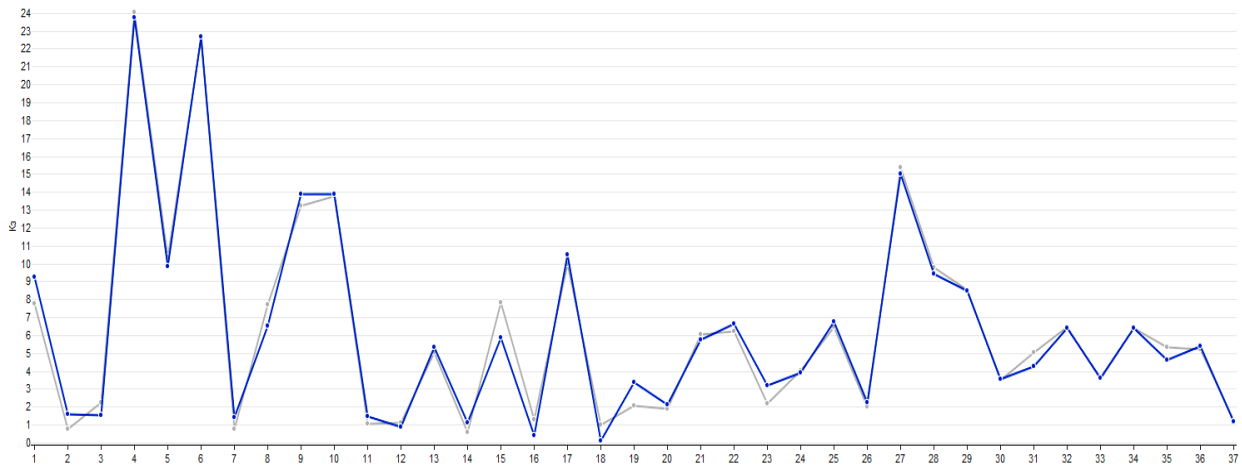
где $N_2 = -0,211772 + 0,0075041 \cdot N_6 \cdot N_3 - 0,01599 \cdot N_4^2 + 1,12562 \cdot N_3,$

$$N_3 = 0,0385369 + 0,050569 \cdot \sqrt[3]{\Delta R_6} \cdot N_4 - 0,00447 \cdot N_4^2,$$

$$N_4 = -0,0228964 + 0,250535 \cdot \sqrt[3]{\Delta R_{св}} \cdot N_5 + 1,02006 \cdot N_5,$$

$$N_5 = 4,06369 + 0,014 \cdot \sqrt[3]{P_{общ}} \cdot N_6 - 0,04576 \cdot \sqrt[3]{P_{общ}} + 0,05 \cdot N_6^2,$$

$$N_6 = 46,97 + 16,446 \cdot \sqrt[3]{\Delta R_{вч}} - 2,235 \cdot \sqrt[3]{\Delta R_{вч}} \cdot \sqrt[3]{P_{общ}} + 1,4 \cdot \sqrt[3]{\Delta R_{вч}^2} - 12,8 \cdot \sqrt[3]{P_{общ}} + 0,877 \cdot \sqrt[3]{P_{общ}^3}.$$

Рисунок 5 – Значения выходной переменной K'_{zy} , нейронная сеть (модель 5)

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,993$. Корреляция 0,992.

Следует отметить, что при обработке исходных данных было генерировано более 50 моделей, однако в данной работе приведены лишь те зависимости, корреляция которых составила не менее 0,9.

Наибольшее влияние входного фактора определяется очередностью попадания в модель. Так, образующие факторы входят в модель на первом ряду генерации, менее влияющие на втором и т.д.

ВЫВОДЫ. Анализ полученных зависимостей показал, что наибольшее влияние на величину коэффициента запаса (K'_{zy}) оказывают: отклонение породного контура ($\Delta R_{ев}$) и фактическая прочность бетона ($R_б$). Также значительное влияние на выходную переменную оказывают – отклонение внутреннего контура от круговой формы ($\Delta R_{св}$) и суммарное горное и гидростатическое давление ($P_{общ}$). Остальные факторы систематического воздействия не оказывают. Полученные результаты о влиянии различных факторов на прочность бетонной крепи ствола позволят вносить соответствующие коррективы в технологию проходки с целью минимизации объемов разрушаемой породы и применяемого бетона с обеспечением требуемого запаса прочности крепи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левит В.В., Солодянкин А.В., Янкин А.Е. Строительство стволов как неотъемлемая составляющая эффективного развития горнодобывающей промышленности Украины. *Уголь Украины*. 2016. № 1. С. 43-47.
2. Солодянкин А.В., Янкин А.Е. Повышение качества оконтуривания вертикальных стволов при проходке буровзрывным способом. *Розробка родовищ*. 2014. С. 229-237.
3. Солодянкін О.В., Янкін О.Е. Обґрунтування нової схеми вибухової відбійки порід при проведенні вертикальних стволів шахт. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. № 3. С. 125-131.
4. Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A. The Review

of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling. *Int. J. of Patt. Recog. and Image Analysis: Advanced in Mathem. Theory and Appl.* 1995. No. 4. P. 527-535.

5. Shashenko O.M., Sdvyzhkova O.O., Babets D.V. Method of argument group account in geomechanical calculation. *12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2010)*. 2010. P. 488-493.

6. Сдвижкова О. О., Бугрим О. В., Бабець Д. В., Иванов Д. В. Элементи теорії ймовірностей та математичної статистики в гірництві: навч. посібник. Дніпропетровськ: НГУ, 2015. 103 с.

7. Bishop C.M. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford: OxfordUniversity Press, 1995. 498 p.

8. Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A., Muller J.A. Self-organization of neural networks with active neurons. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1994. Vol. 4, no. 2. P. 185-196.

9. Янкин А.Е. Совершенствование параметров буровзрывной технологии проведения вертикальных стволов для повышения устойчивости породных обнажений и крепи. Дніпропетровськ: НГУ, 2016. 139 с.

10. Янкин А.Е., Сдвижкова Е.А., Левит В.В., Борщевский С.В. К вопросу о характеристиках отклонений от проекта фактической толщины крепи вертикальных шахтных стволов. *Наукові праці ДонНТУ*. 2004. Вип. 72. С. 27-33.

11. Ягодкин Ф.И., Прокопова М.В. Анализ влияния диаметра и глубины ствола на величину радиальных отклонений крепи. Совершенствование проектирования и строительства угольных шахт. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. С. 32-38.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE EXTERNAL FACTORS INFLUENCE
ON THE MARGIN OF STRENGTH WHILE SHAFT SINKING**

D. Babets, O. Solodyankin, O. Yankin

State Higher Educational Institution “National Mining University”

prosp. Dmitry Yavornytsky, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

E-mail: dbabets@i.ua, alex.solodyankin@gmail.com, sieges@ua.fm

Purpose. To improve structural and technological parameters of vertical shafts as an important issue in coal industry. To estimate the margin of strength of the vertical shaft lining considering the change of its thickness due to irregularities in the outer contour and displacements of the formwork and the different strength of the concrete. It is necessary to consider both deterministic and random factors whose impact to the final strength of the shaft lining can be different when designing a support. **Methodology.** At the initial stage of the research a standard technique for determining the thickness of the concrete lining was used. At the second stage, a group method of data handling was applied to evaluate the influence of technological factors on the strength of the monolithic concrete shaft lining. Mathematical models were obtained involving well proved criteria of structural identification and artificial neural networks with training on various parts of the initial sample. **Results.** The calculation of the safety factor of the lining strength along the depth of the shaft using the standard technique for determining the thickness of the concrete lining has been carried out. The actual thickness of the shaft lining according to the full-scale measurements when shaft sinking and laboratory test results of concrete strength are taken into account while modelling. **Originality.** The influence of deviation of the rock contour and strength of concrete on the safety factor of the shaft lining has been proved. Other structural and technological factors do not exert systematic influence. **Practical value.** The obtained results allow to minimize the area of the destructed rocks and save concrete while shaft sinking. The obtained models should be included in the shaft lining technology to provide the required margin of support strength. References 11, figure 5, table 2.

Key words: Shaft sinking, drilling and blasting, shaft lining, irregularities of contour, group method of data handling, margin of strength.

REFERENCES

1. Levit, V.V., Solodyankin, O.V. (2016), “Shaft sinking as an integral component of effective development of the mining industry in Ukraine”, *Ugol Ukrainy*, no. 1, pp. 43–47.
2. Solodyankin, O.V., Yankin, O.E. (2014), “Quality improvement of vertical shafts outlining at blast-hole drilling”, *Mining of Mineral Deposits*, vol. 8, iss. 2, pp. 229–237.
3. Solodyankin, O.V., Yankin, O.E. (2014), “Rationale for a new scheme blasting rocks during vertical shafts”, *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 3, no. 86, pp. 125–131.
4. Ivakhnenko, A.G., Ivakhnenko, G.A. (1995), “The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling”, *Int. J. of Patt. Recog. and Image Analysis: Advanced in Mathem. Theory and Appl.*, no. 4, pp. 527–535.
5. Shashenko, O.M., Sdvyzhkova, O.O., Babets, D.V. (2010), “Method of argument group account in geomechanical calculation”, *12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010*, pp. 488–493.
6. Sdvyzhkova, O., Buhrim, O., Babets, D., Ivanov, O. (2015), *Elementy teorii imovirnostei ta matematychnoi statystyky v girnyctvi* [Elements of probability theory and mathematical statistics in mining], National mining university, Dnipro, Ukraine.
7. Bishop, C.M. (1995), “Neural networks for pattern recognition”, Oxford University Press, Oxford, 498 p.
8. Ivakhnenko, A.G., Ivakhnenko, G.A., Muller, J.A. (1994), “Self-organization of neural networks with active neurons”, *Pattern Recognition and Image Analysis*, vol. 4, no. 2, pp. 185–196.
9. Yankin, O.E. (2016), *Sovershenstvovaniye parametrov burovzryvnoy tekhnologii provedeniya vertikal'nykh stvolov dlya povysheniya ustoychivosti porodnykh obnazheniy i krepki* [Perfection of parameters of drilling and blasting technology for vertical shafts for increasing the stability of rock outcrops and support], Dnipro, Ukraine.
10. Yankin, O.E., Sdvyzhkova, O.O., Levit, V.V., Borchevskii, S.V. (2004), “The issue of characteristics deviation between design and actual thickness of the shaft lining”, *Naukovi pratsi DonNTU*, no. 72, pp. 27–33.
11. Yagodkin, F.I., Prokopova, M.V. (2001), “Analysis of the influence of the diameter and depth of the mining shaft on the magnitude of the radial deflections of lining”, *Sovershenstvovanie proektirovaniya i stroitelstva ugolnykh shaht*, pp. 32–38.

Стаття надійшла 20.01.2018.