

УДК 622.002.

В.В. Янко, к.т.н.,  
Р.Н. Терешук, к. т. н.,  
доцент каф. строительства и геомеханики,  
(ГВУЗ «Национальный горный университет»),  
А.Э. Кипко,  
доцент, каф. Горного дела  
(ГВУЗ «Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля»,  
г. Антрацит)

## **НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОДНОГО МАССИВА ВОКРУГ ПРОТЯЖЕННОЙ ВЫРАБОТКИ ПРЕСЕКАЮЩЕЙ РАЗРЫВНОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ НАРУШЕНИЕ**

Наведені результати чисельного моделювання пружно-деформованного стану ділянки порідного масиву, який має протяжну гірничу виробку, яка перетинає розривне геологічне порушення. Основою методичного підходу до постановки задачі моделювання поставлено розгляд геомеханічних процесів на ділянці порідного масиву, виробка проходиться етапами, наближуючись та віддаляючись від геологічного порушення.

## **STRESS-STRAIN STATE OF ROCK MASS AROUND THE GENERATION EXTENDED CURB DISCONTINUOUS GEOLOGICAL FAULTS**

The results numerical simulation of the stress-strain state on site of a rock mass containing a long mining, geological faults intersecting the burst. The basis of the methodological approach to the problem statement delivered to the consideration of modeling the geomechanical processes at the site a rock mass containing the production stages, along the approach and the subsequent removal of geological disturbances.

**Введение.** Рост глубины разработки угольных месторождений приводит к увеличению горного давления, температуры окружающих пород, повышению вероятности внезапных выбросов угля, пород, газа и горных ударов, что существенно усложняет ведение горных работ, часто приводит к аварийным ситуациям, увеличивает себестоимость угля. В настоящее время ряд шахт в Украине ведет разработку угля на глубине более 1000 м, сталкиваясь с вышперечисленными трудностями. Перспективы дальнейшего развития угольной отрасли связаны с освоением больших глубин, что еще больше ухудшит условия, как при строительстве, так и при эксплуатации новых горизонтов и шахт.

Эффективность и надежность добычи угля во многом определяется устойчивостью капитальных и подготовительных горных выработок, протяженность которых на современных глубоких шахтах достигает нескольких десятков километров.

Горный массив, как объект технологического воздействия, отличается высоким уровнем структурных и текстурных неоднородностей и изменчивостью физико-механических свойств. В первую очередь это касается геологической нарушенности угольных месторождений, в большой степени присущей пла-

стам Центрального района Донбасса.

Известно, что дизъюнктивное нарушение сопровождается по обе стороны зонами влияния, которые характеризуются повышенными трещиноватостью и напряжениями, изменением прочности угля и пород, склонностью их к вывалообразованию [3-5]. Протяженность этой зоны для одиночного тектонического нарушения может достигать 30-100 м. Как показывает опыт эксплуатации угольных шахт именно к зонам влияния дизъюнктивных нарушений приурочено неудовлетворительное состояние крепи горных выработок.

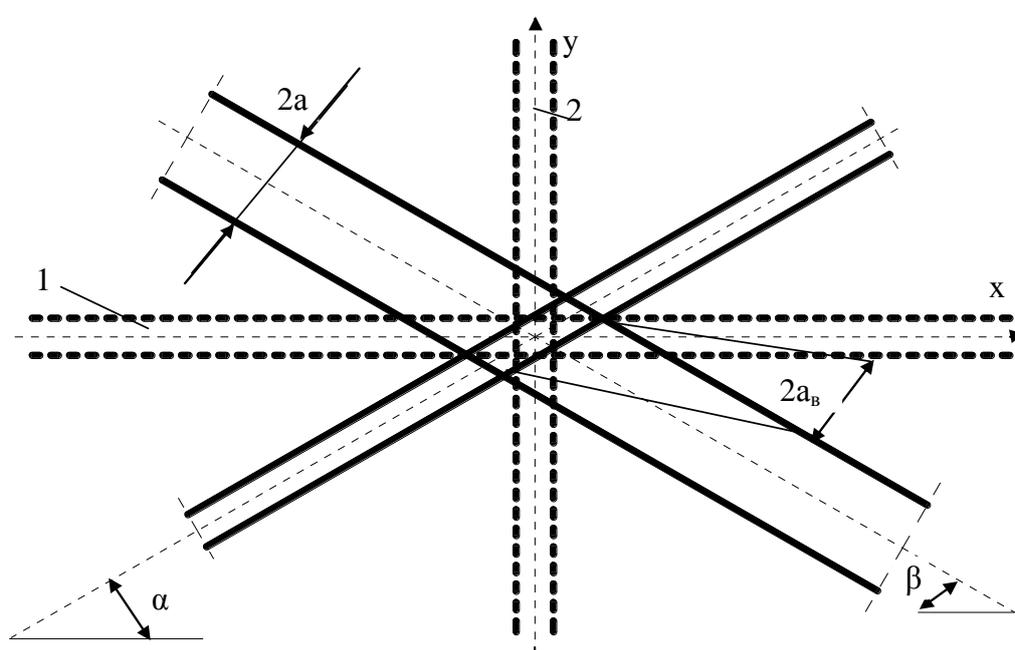
Актуальность исследований по данному вопросу заключается в том, что с увеличением глубины разработки степень разведанности геологических нарушений уменьшается, а степень сложности обеспечения устойчивости протяженных выработок и длительной их эксплуатации в таких условиях увеличивается. Более того, с увеличением глубины ведения горных работ на 100-120 м интенсивность (частота) нарушений возрастает на 5-7 % [1]. Анализ геологических показателей шахтопластов, приведенных в [2] показывает хоть и незначительное, но устойчивое увеличение числа нарушенных пластов с увеличением их глубины. Так же одной из интересующих задач геомеханики является исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива в процессе сооружения горизонтальной одиночной выработки. Взаимодействия поля напряжений от забоя проводимой выработки и полей напряжений вокруг геологических структурных неоднородностей в породном массиве существенно влияет на ее устойчивость и технологию сооружения. Одной из проблем при отработке угольных пластов является наличие в толще углевмещающих пород геологических разрывных нарушений. Устойчивость капитальных, подготовительных и очистных выработок существенно снижается при пересечении ими нарушенного породного массива. Установление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния породного массива при этом является актуальной задачей.

Одной из главных задач при проектировании горнодобывающих предприятий является учет геологической нарушенности породного массива при подготовке запасов к отработке, планирование рациональных способов прохождения нарушений, обеспечения устойчивости подземных выработок. Это связано с тем, что нарушения в виде трещин, разрывов и складок в некоторых случаях настолько усложняют строение породного массива, что вести горные работы в нем весьма проблематично, а порой и невозможно.

Исследование процесса перемещения одиночной протяженной горизонтальной выработки в породном массиве во время пересечения и после пересечения в численном виде достаточно корректно можно выполнить только на основе объемной модели. Принимая во внимание то обстоятельство, что рассматриваемая задача должна быть упругопластической, численная модель представляется очень сложной, громоздкой. Интерпретация результатов вычислений при этом чрезвычайно затрудняется. В этой связи интересным представляется подход, предложенный в работах [6-7], состоящий в следующем. За основу предлагается рассматривать выработку в продольном сечении

позатпно, по мере приближения, пересечения и ухода от нарушения. Для того, чтобы решение соответствовало условиям плоской деформации, к контуру выработки прикладывается некоторая эквивалентная нагрузка, распределенная по закону параболы. За основу приняты известные решения плоской упругопластической задачи о пересечении очистной выработкой (лавой) геологического нарушения [8, 9] и такой же задачи относительно одиночной выработки [10]. Ищется искусственное решение основной задачи, опирающееся на решении известных задач.

В нашем случае решается более сложная задача: выработка имеет произвольное расположение в пространстве. Расчетная схема такой задачи представлена на рис. 1. Породы в зоне влияния разрывного геологического нарушения имеют изменяющуюся в общем случае по нелинейному закону прочность (меньше к центру и больше к краям).



1 – горизонтальная выработка; 2 – вертикальная выработка;  $\alpha$  – угол наклона выработки;  $\beta$  – угол наклона оси разрывного нарушения;  $a$  – полуширина зоны геологических нарушений.

Рис. 1 – Схема к определению длины выработки, испытывающей повышенное горное давление

В связи с этим, целью данной работы было рассмотрение геомеханических процессов при численном моделировании состояния протяженной выработки поэтапно, по мере приближения и последующего отхода от геологического нарушения.

В модели задавались следующие физико-механические параметры пород: модуль Юнга –  $E$ , коэффициент Пуассона –  $\mu$ , предел прочности на одноосное сжатие –  $R_c$ , модуль сдвига –  $G$ , объемный вес пород –  $\gamma$ .

Выработка, размещенная в модели, имела арочную форму с шириной 4,5 м и высотой 3,2 м. По контуру выработки задавался отпор крепи.

Моделируемое структурное нарушение дизъюнктив представляет собой сброс. Угол наклона дизъюнктива принят  $30^\circ$ . В первом случае выработка, вокруг которой исследуется устойчивость породного массива, проходится горизонтально, примерно, посередине по отношению к вертикали исследуемого массива, в остальных под следующими углами:  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ . Высота и ширина выработки составляет 3,2 и 4,5 м соответственно. По отношению к простиранию нарушенных пород сброс является продольным.

Для реализации численной модели двадцатиметровая зона влияния вокруг дизъюнктива была разбита на 10 одинаковых по ширине частей, каждая из которой имела собственные физико-механические характеристики пород, изменяющиеся по линейному закону от его центра к краям.

На первом этапе решения задачи дизъюнктив находится на достаточно большом расстоянии от выработки, так что его влиянием можно пренебречь. Выработка моделируется вырезом прямоугольной формы, длина которого увеличивается по мере продвижения забоя. Каждому конечному элементу в зоне  $\pm 2$  м от нарушения задаются свои физико-механические параметры.

В процессе расчета в каждом элементе определялись компоненты напряжений и перемещений. Величина эквивалентных напряжений устанавливалась по формуле [11]:

$$\sigma_e = \frac{(\psi - 1)(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(1 - \psi)^2 (\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\psi(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 16\psi\tau_{xy}^2}}{2\psi}$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – компоненты главных напряжений,  $\psi$  – коэффициент хрупкости, равный отношению предела прочности на растяжение к пределу прочности на сжатие.

Величина эквивалентных напряжений сравнивалась с пределом прочности массива в конкретном конечном элементе

$$\sigma_{\text{Э}} \leq R_c k_c. \quad (1)$$

Элементы, в которых соотношение (1) не выполнялось, считались разрушенными.

Величина коэффициента структурного ослабления определялась по формуле [12]:

$$k_c = 1 - \sqrt{0,5\eta} \exp(-0,25\eta),$$

где  $\eta$  – коэффициент вариации прочности породного массива, определяемый по формуле [12]:

$$\eta = \sqrt{\frac{l_T + l_0}{l_T} (\eta_0^2 + 1)} - 1,$$

где  $l_T$  – среднее расстояние между трещинами;  $l_0$  – наибольший размер стандартного породного образца;  $\eta_0$  – коэффициент вариации результатов испытаний стандартных породных образцов.

На рисунке 2 показано распределение напряжений при движении протяженной выработки.

Результирующий график изменения величины минимального значения коэффициента запаса прочности породного массива в окрестности забоя проводимой выработки от угла ее наклона  $\alpha$  для рассматриваемого угла наклона оси разрывного нарушения  $\beta = 30^\circ$  показан на рис. 3. Он хорошо аппроксимируется следующей степенной зависимостью:

$$k_s = 5E - 5\alpha^2 - 0,005\alpha + 0,25. \quad (2)$$

При этом коэффициент вариации равен  $R^2 = 0,99$ .

В том случае, если угол наклона оси дизъюнктивного нарушения  $\beta$  не является величиной постоянной, а полуширина нарушения равна  $a$ , то длина выработки, которая будет подвергаться повышенному горному давлению  $2a_g$ , определяется из схемы, приведенной на рис. 1, на основании которой был получен график (рис. 4) по формуле:

$$\frac{a_g}{a} = \frac{k}{\sin(\beta - \alpha)}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при  $\alpha = 90^\circ$  и  $\beta = 0$  ( $180^\circ$ ),  $a_g = a$ . При  $\alpha = 0$  и  $\beta = 0$  ( $180^\circ$ ),  $a_g = \infty$ , или  $L$ , где  $L$  – длина выработки,  $k$  – коэффициент концентрации напряжений в окрестности пересечения нарушения ( $k \geq 1-2,5$ ). Таким образом, установлены основные зависимости, позволяющие определить часть выработки, которая подвергается повышенному горному давлению, и установить уровень этой нагрузки по сравнению с горным давлением вне зоны влияния дизъюнктива.

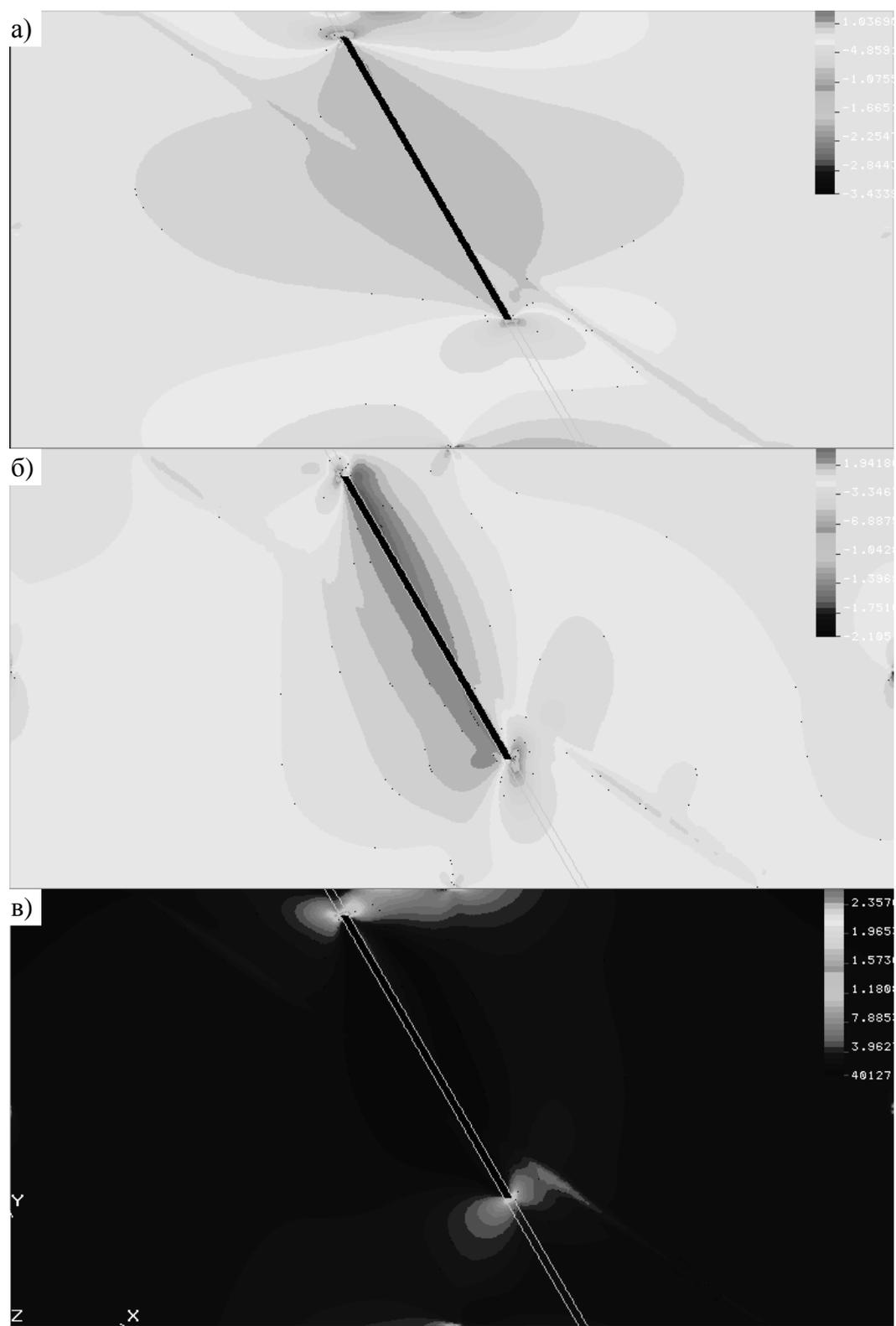


Рис. 2 – Распределение напряжений при движении выработки ( $\alpha=60^\circ$ ) от 0 до 100 м.

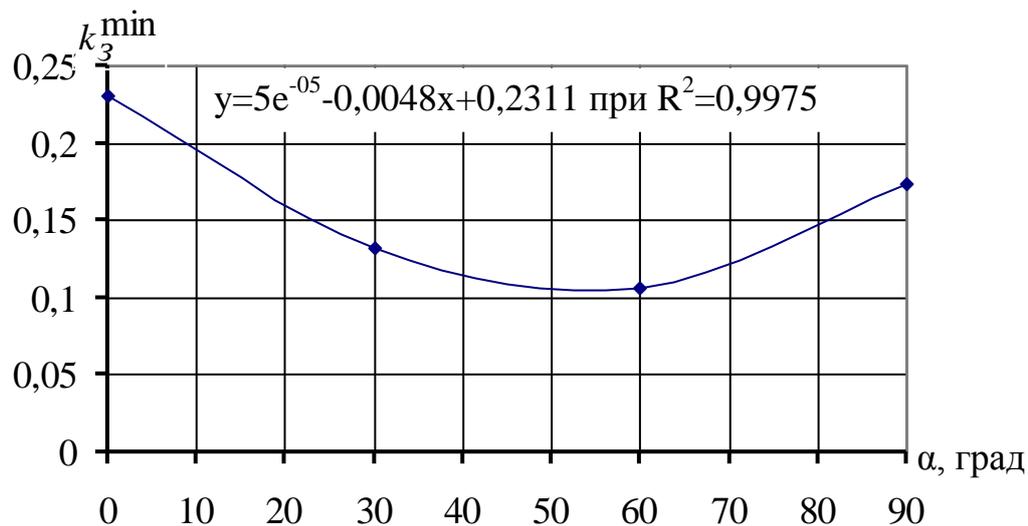


Рис. 3 – Зависимость минимального значения коэффициента запаса прочности от угла наклона выработки при угле наклона нарушения ( $\beta=30^\circ$ ).

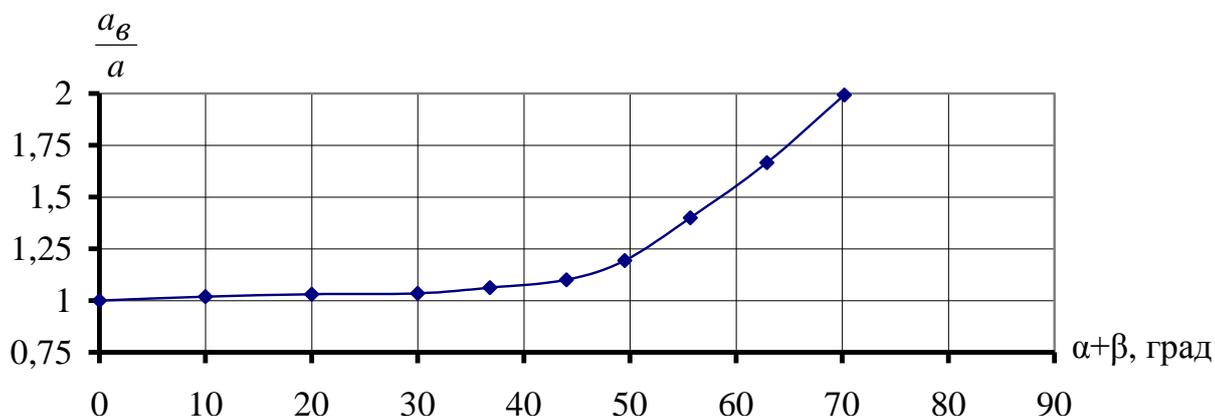


Рис. 4 – Зависимость относительной ширины зоны повышенного давления от взаимного расположения выработки и нарушения в пространстве.

#### Выводы:

1. Установлены основные зависимости, позволяющие определить часть выработки, которая на участке пересечения зоны разрывного геологического нарушения подвергается повышенному горному давлению, и установить уровень этой нагрузки по сравнению с горным давлением вне зоны влияния дизъюнктива.

2. Минимальное значение коэффициента запаса прочности породного массива в окрестности забоя не зависит от ориентации в пространстве протяженной выработки находится в параболической зависимости от угла падения разрывного нарушения, что позволяет оценить уровень нагрузки на крепь.

3. Длина протяженной выработки, имеющей угол наклона  $\beta$  при ее пересечении с разрывным нарушением шириной  $2a$ , имеющем угол падения  $\alpha$ , прямо пропорциональна ширине нарушения и обратно пропорциональна си-

нусу разности углов  $\alpha$  и  $\beta$ , что позволяет определить объемы работ по усилению крепи в районе нарушения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуряков Н.М. Управление состоянием массива горных пород: Учебник для вузов. М.: Недра, 1991. – 368 с.
2. Прогнозный каталог шахтопластов Донецкого угольного бассейна с характеристикой горно-геологических факторов и явлений. - М.: ИГД им. Скочинского, 1982. – 267 с.
3. Разрывные нарушения угольных пластов / И.С. Гарбер, В.Е. Григорьев, Ю.Н. Дупак [и др.] – Л.: Недра, 1979. – 190 с.
4. Рева В.Н., Белоусов А.П. Особенности поддержания горных выработок в трещиноватом скальном массиве вблизи тектонических нарушений // Уголь. – 1987. – № 5. – С. 11-13.
5. Прогноз размеров зоны влияния мелких дизъюнктивных нарушений в Центральном районе Донбасса // Уголь Украины. – 1997. – № 6. – С. 53-54.
6. Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П., Янко В.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности протяженной выработки // Вісті ДонНТУ.– Донецьк: ДонНТУ, 2008.– № 1.– С.3-8.
7. Янко В.В. Обоснование параметров способа обеспечения устойчивости протяженных горизонтальных выработок при пересечении геологических нарушений: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09.– Днепропетровск, 2008.– 169 с.
8. Шашенко А.Н., Тулуб СБ., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики.–К.: Пульсари, 2001.– 243 с.
9. Сдвижкова Е.А., Татаринов А.А., Рубец Г.Т. Анализ статистических моделей распределения нагрузки на крепь горизонтальных протяженных выработок // Науковий вісник НГАУ.– 1998.– №1.– С.40-41.
10. Шашенко А. Н., Гапеев С.Н. Численное решение упругопластической задачи применительно к устойчивости подземных выработок. Науковий вісник НГУ.– Дніпропетровськ: НГУ, 2007.– №12.
11. Шашенко А. Н., Пустовойтенко В. П. Механика горных пород: Підручник для ВУЗів. – К.: Новий друк, 2004. – 400 с.
12. Шашенко А. Н., Сдвижкова Е. А., Кужель С. В. Масштабный эффект в горных породах: Монография. – Д.:АРТ-ПРЕСС, 2004. – 132 с.