

УДК 622. 833.5

А.Н. Шашенко¹, д-р техн. наук, заведующий кафедрой строительства, геотехники и геомеханики,
shashenkoA@nmu.org.ua

Е.А. Сдвижкова¹, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой высшей математики,
sdvizhkova@front.ru

А.В. Смирнов², директор по добыче и обогащению угля, член правления «ДТЭК», info@dtek.com

¹Национальный горный университет (г. Днепрпетровск, Украина), ²Общество с ограниченной ответственностью «Донбасская топливно-энергетическая компания» (г. Донецк, Украина)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Тау жыныстары сілемінде туындайтын тау жыныстарының қысымын болжау үшін геомеханикалық үрдістерді сандық моделдеу әдісін қолдану мүмкіндігі көрсетілген. 3D-моделдеу әдісімен тау жыныстары сілемінің бекемдік теориясына және көптеген статикалық материалдарды өңдеу нәтижелеріне негізделген кешенді әдіс келтірілген. Сонымен қатар зерттеушілер мен ДТЭК компаниясының қосыла жұмыс істеу нәтижелері де баяндалған.

Проиллюстрированы возможности численного моделирования геомеханических процессов в породном массиве для решения ряда актуальных задач прогноза проявлений горного давления. Приведен комплексный подход, основанный на 3D-моделировании, использовании теории прочности, наиболее адекватно отражающей свойства породной среды, статистической обработке большого массива исходных данных. Приведены результаты сотрудничества исследовательских коллективов с компанией ДТЭК.

The possibilities of numerical modeling of geomechanical processes in the rock mass for solving actual problems of rock pressure prediction are illustrated. An approach based on 3D-simulation and using appropriate strength theory is given. It involves statistical analysis of a large set of input data and allows representing the rock property adequately. The positive cooperation experience of research groups with DTEK company are given.

Түйінді сөздер: сілемнің кернеулік-деформациялық жағдайы, беріктік сындылығы, сандық модель.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние массива, критерий прочности, численная модель.

Keywords: stress-strain state of rock mass, failure criterion, numerical simulation.

Современные технологии проектирования горных работ предполагают, прежде всего, глубокое обоснование новых технических решений с точки зрения проявлений горного давления в изменчивых специфических горно-геологических условиях.

С развитием вычислительной техники и применением численных методов механики деформируемого твердого тела расширились возможности моделирования всех видов анизотропии горных пород, в частности, слоистости породного массива, различных

типов неоднородностей: трещин, геологических нарушений, включений, разуплотненных пород, обрушившихся в выработанное пространство. Следует отметить, что моделирование напряженно-деформированного состояния объемного тела, ослабленного полостями (3D-моделирование), по-прежнему остается сложнейшей задачей механики.

Например, при использовании хорошо апробированного метода конечных элементов (МКЭ) для моделирования области, включающей сопряжение

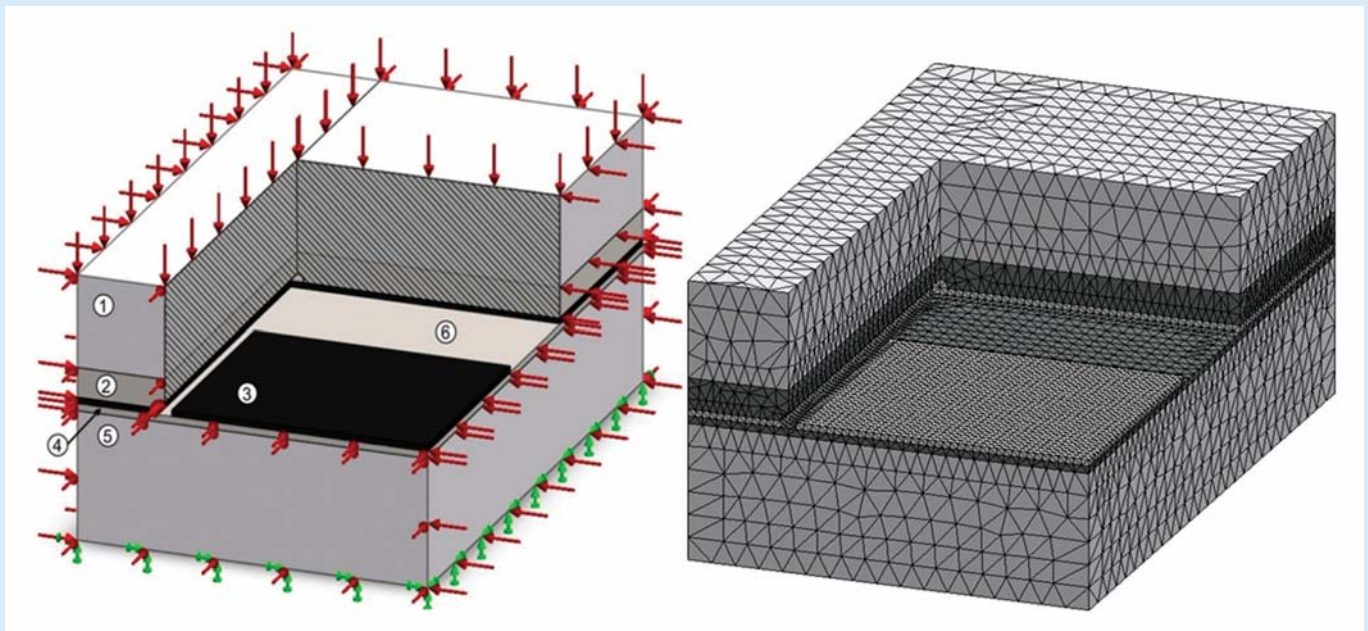


Рис. 1. Расчетная схема и конечно-элементная аппроксимация исследуемой области: 1 – основная кровля; 2 – непосредственная кровля; 3 – пласт угля; 4 – непосредственная почва; 5 – основная почва; 6 – выработанное пространство.

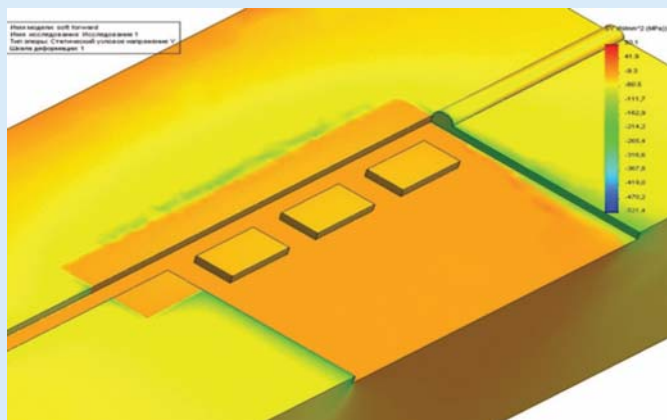


Рис. 2. Распределение нормальных вертикальных напряжений при охране подготовительной выработки угольными целиками в условиях шахты «Шахтерская Глубокая».

очистной и подготовительной выработки (рис. 1), необходимо создание конечно-элементной сетки, состоящей из более миллиона элементов, а это значит, что для определения напряжений и деформаций во внутренних точках моделируемого тела формируется система уравнений еще большего порядка. Наибольшие сложности, связанные с объемом оперативной памяти и быстродействием компьютеров, вызывают 3D-модели в упруго-пластической постановке, без которых невозможен прогноз реальных деформаций породного массива. Численный анализ в такой сложной постановке стал доступным, благодаря появлению мощных компьютеров и вычислительных программ, над созданием которых работают коллективы специалистов – программистов и механиков.

Детальный анализ напряженно-деформированного состояния породного массива может быть выполнен в любом сечении исследуемой области (рис. 2).

При этом по-прежнему актуальной остается проблема оценки устойчивости подготовительных выработок, выявления причин их неудовлетворительного состояния в зоне влияния очистных работ. Поэтому, параллельно с технологиями моделирования напряженно-деформированного состояния породного массива, развиваются теории прочности, устанавливающие критерии перехода горных пород в иное качественное состояние, отличное от состояния нетронутого массива, и, в зависимости от состава пород, характеризующееся необратимыми (неупругими) деформациями или хрупким разрушением. Эмпирические (О. Мора, З.Т. Бенявского, Хоека-Брауна) и аналитические (Треска-Сен-Венана, Мизеса-Генки, П.П. Баландина, И.Н. Миролубова) критерии прочности развивались в разные годы и продолжают развиваться сейчас. Аналитический критерий прочности, учитывающий неодинаковое сопротивление пород растяжению и сжатию, разработанный в Национальном горном университете Л.Я. Парчевским и А.Н. Шашенко [1, 2], имеет вид:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - K_c [R_c^2 \psi - (1 - \psi) R_c (\sigma_1 + \sigma_3)] = 0, \quad (1)$$

где σ_1, σ_3 – соответственно, наибольшее и наименьшее главные напряжения;

$\psi = R_p / R_c$ – показатель хрупкости;

R_p, R_c – пределы прочности пород на сжатие и растяжение соответственно;

K_c – коэффициент структурного ослабления, учитывающий отличие прочности массива R_m от прочности лабораторных образцов R_c .

Последняя величина, представляющая собой количественную оценку масштабного эффекта в горных породах, получена на основе обработки

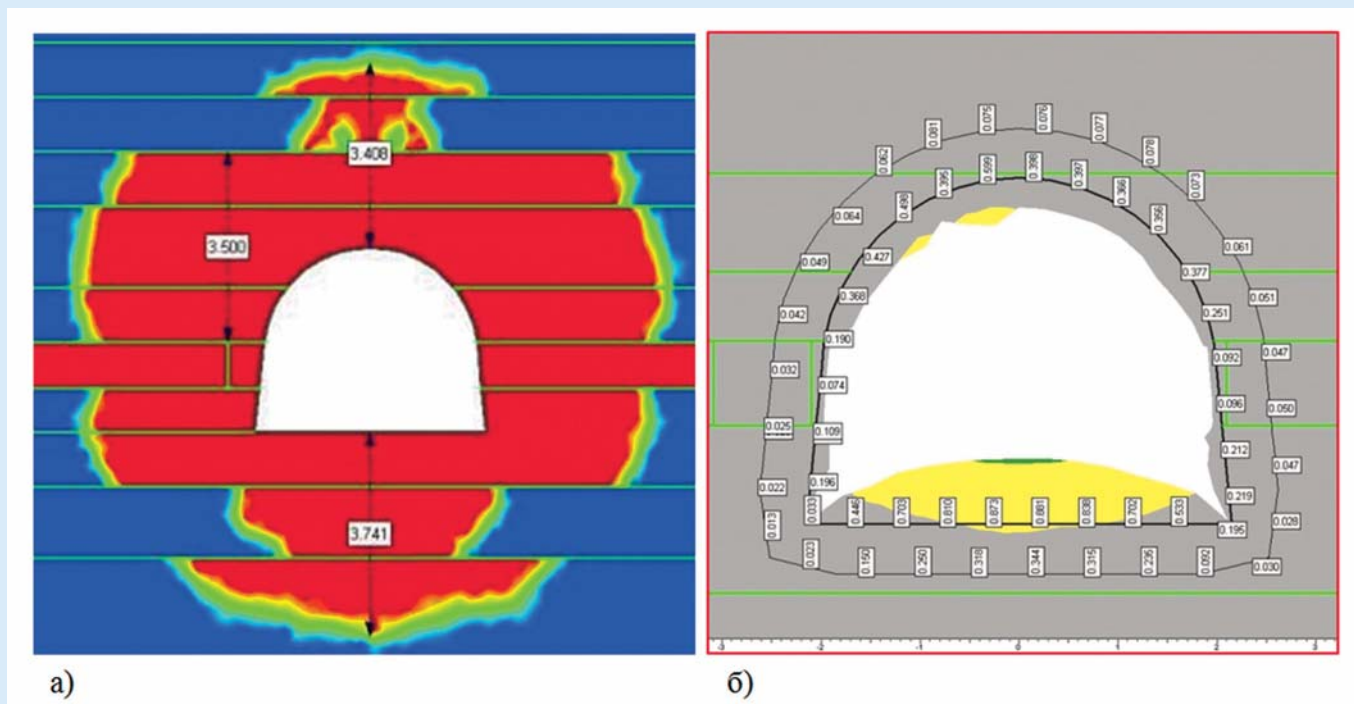


Рис. 3. Зона неупругих деформаций в слоистом массиве (а) и смещения пород на контуре выработки, а также на расстоянии 0,5 м от контура (б).

представительных статистических совокупностей значений прочности углевмещающих пород, а также вероятностного подхода к оценке сопротивляемости неоднородных твердых тел [3, 4]:

$$K_c = \frac{R_m}{R_c} = \frac{\exp(\arg F_0(1-p) \times \sqrt{\ln(\eta^2 + 1)})}{\sqrt{\eta^2 + 1}}$$

где η – вариация прочности породных образцов;

$F_0(t) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^t e^{-t^2/2} dt$ – нормированная функция нормального распределения;

$\arg F_0(1-p)$ – аргумент нормированной функции нормального распределения при ее значении, равном p .

На основе критерия прочности, адекватно отражающего поведение породной среды, определяются зоны неупругих деформаций (разрушений) в массиве, с размерами которых связана нагрузка на крепь выработки и смещения пород в приконтурной области (рис. 3).

Перечисленные выше этапы научного подхода широко используются на практике и представляют собой элементы технологии проектирования и сопровождения горных работ на той стадии, которую можно охарактеризовать как «текущее бизнес-планирование» или «актуализация общей стратегии». Иными словами, это оперативное реагирование на поставленную задачу, возникшую, например, в связи с переходом в новые горно-геологические или горно-технические условия.

Примером тесного сотрудничества специалистов лаборатории геомеханики, созданной в НГУ совместно с компанией ДТЭК, является обоснование ряда технических решений, направленных на увеличение темпов проходки выработок и ввода в эксплуатацию новых очистных забоев.

Так, для ускорения подготовки 163-й струговой лавы на шахте «Степная» возникла необходимость проведения 163-го бортового штрека с горизонта 330 м встречным забоем с одноименной выработкой, проводимой с горизонта 490 м. При этом 163-й бортовой штрек должен был проводиться вприсечку к 163-му сборному штреку выемочного участка 161-й лавы. Усложняющим фактором здесь является то, что штрек планировалось проводить навстречу движущемуся забою лавы (рис. 4), впереди которого, как известно, перемещается волна опережающего горного давления. Возник целый ряд вопросов в отношении крепи усиления и мер безопасности. В нормативных документах такая ситуация не прописана, опыт проведения выработок встречным забоем в условиях Западного Донбасса на момент принятия решения отсутствовал. Именно такая нестандартная ситуация предполагает предварительное моделирование с целью прогноза возможных увеличений нагрузок на крепь и смещений контура выработки. С точки зрения механики это довольно сложная задача, поскольку предполагает рассмотрение большой пространственной области массива, включающей различные полости: очистную выработку и две подготовительные, сложным образом расположенные по отношению друг к другу. В результате 3D-моделирования на основе МКЭ установлены зоны повышенной концентрации напряжений от взаимовлияющих выработок, определено

расстояние, на котором это взаимное влияние приводит к интенсивному нагружению крепи и требует принятия соответствующих мер безопасности: остановка забоя, вывод людей, усиление крепи и т. п.

В характерных сечениях, перпендикулярных оси присечных выработок, на основе решения упруго-пластической задачи определены зоны разрушения пород (рис. 5), размер которых, в свою очередь, определяет нагрузку на крепь и служит исходной позицией для разработки конструкции усиливающих элементов.

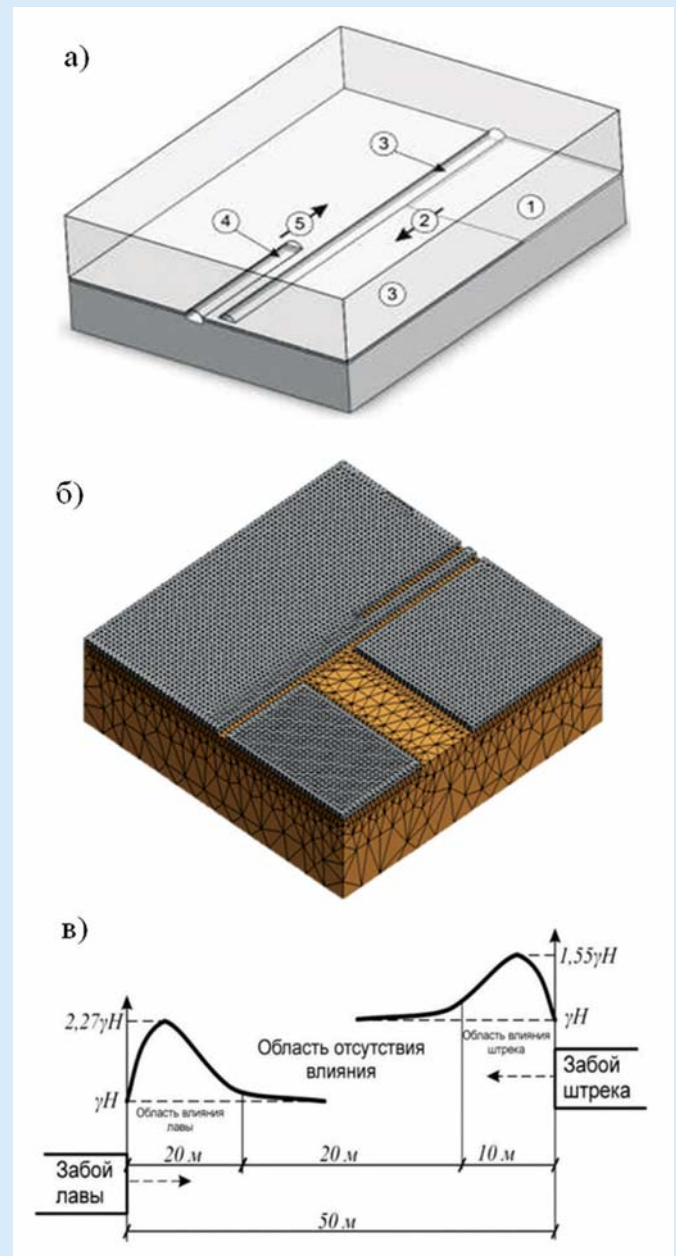


Рис. 4. Проведение бортового штрека встречным забоем вприсечку к сборному штреку: а – расчетная схема; б – конечноэлементная модель; в – эпюры концентраций напряжений впереди забоев лавы и штрека; 1 – выработанное пространство; 2 – направление движения лавы; 3 – сборный штрек; 4 – бортовой штрек; 5 – направление проходки бортового штрека.

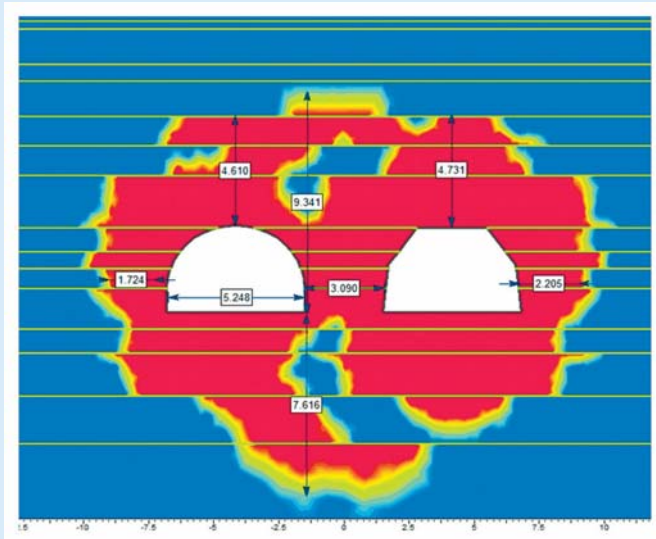


Рис. 5. Зоны неупругих деформаций вокруг выработок, пройденных вприсечку с целиком 3,0 м.

По результатам расчетов сформулированы рекомендации в отношении плотности крепи (она увеличена до 2 рам/м на участке встречи забоя выработки и забоя лавы), усиления рамной крепи сталеполимерными анкерами, установки продольного металлического профиля к рамам арочной крепи в сочетании с

деревянными ремонтными. В результате выполненных мероприятий устойчивость штрека и безопасность работ были обеспечены на протяжении всего срока в соответствии с его функциональным назначением.

Выводы

Современная геомеханика располагает мощным математическим аппаратом, алгоритмами калибровки моделей и адаптации их к реальным условиям, что в комплексе с методиками отбора исходных данных и инструментальным мониторингом позволяет с достаточной точностью выполнить прогноз поведения породной среды, взаимодействующей с подземными конструкциями в любых горно-геологических и горно-технических условиях.

В наибольшей степени востребованными на данном этапе развития геотехнологий являются численные методы механики деформируемых систем, которые, однако, даже будучи реализованными в виде программных комплексов, требуют, тем не менее, глубокого осмысления механических процессов в породном массиве, выверенной интерпретации расчетных результатов и дальнейшего совершенствования.

Вовлечение научных коллективов в процесс актуализации стратегии развития горных работ добывающими предприятиями обеспечивает эффективную и безопасную добычу угля при внедрении новых технологий и принятии нетривиальных технических решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шашенко А.Н. Критерии прочности в геомеханике / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, И.Ю. Старотиторов // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – Днепропетровск, 2007, №1. – С. 55-59.
2. Shashenko A. Strength theory application for heterogeneous rocks / A. Shashenko, O. Sdvizhkova // *Scientific bulletin of the national mining university. The Scientific and Technical Journal*. №6, 2008. – P. 44-46.
3. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: Монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Ганеев // – Д.: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
4. Shashenko A.N. Analysis of failure criterions and estimation of scale effect in rocks / Shashenko A.N., Sdvizhkova E.A. // *New challenges and Visions for mining 21-st World Mining Congress*. – 2008, Poland. – P. 103.

Статья публикуется по члена редакционной коллегии, доктора технических наук М.Б. Нурпеисовой

КАЗАХСТАНСКИЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫЙ ПОРТАЛ

С нами Вы не платите, а инвестируете в развитие своей компании!

тел. +7 727 257 71 61, тел./факс +7 727 292 90 71

e-mail: office@mining.kz, kgpp@list.ru

web: <http://www.mining.kz/>