

УДК 622.831

*д.т.н. Бондаренко В. И.,
к.т.н. Фомичев В. В.,
аспирант Соцков В. А.*

(ГВУЗ «Национальный Горный Университет», г. Днепропетровск, Украина)

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ ДЛЯ УСЛОВИЙ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

Проведена серия расчетов при приближении очистного забоя к выработке в упруго-пластической постановке с учетом физико-механических свойств пород и слоистости горного массива. Проанализированы результаты эксперимента, определены области концентрации напряжений и разгрузки в массиве, а также степень влияния горного давления на рамное и анкерное крепление выработки. Выявлены характерные особенности результатов полученных при решении линейной и билинейной задач, что позволило объективно оценить напряженно-деформированное состояние горного массива и крепления.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, упруго-пластическая постановка, очистные работы, крепёжная конструкция, напряженно-деформированное состояние.

Актуальность работы. В современной международной экономике топливно-энергетический комплекс занимает исключительно важное место. Совокупная чистая доля энергетической продукции в структуре мирового ВВП в настоящее время в среднем оценивается в 10-12%, или примерно в 1,8 тыс. долл. в год в расчете на душу населения.

Основными источниками энергии на сегодня являются геологические топливно-энергетические ресурсы: нефть, уголь, газ, горючие сланцы, торф, уран и т.д. На их долю приходится до 93% производимой в мире энергии. Мировые промышленные запасы угля составляют свыше 1 трлн тонн, что значительно превосходит запасы и ресурсы всех других энергоносителей. Данный факт делает уголь основным энергоисточником, который может удовлетворить постоянно растущий спрос на энергию, не покрываемый другими доступными источниками.

Ведущим угледобывающим предприятием Украины является ПАО «ДТЭК Павлоградуголь», в состав которого входит 10 шахт, суммарный объем добычи, которых за 2013 г составил 38,6 млн. т. При этом согласно долгосрочной страте-

гии компании до 2030 г. объем добычи угля должен достигнуть 50 млн. т. В связи с этим основная работа направлена на проведение целого комплекса мер по обеспечению стабильного роста объемов добычи. Основными способами повышения производственных показателей является разработка и внедрение новых технологических схем и использования современного высокопроизводительного оборудования. Наибольшее распространение в последнее время получила тенденция к увеличению длин лавы и очистного забоя, что при интенсификации очистных работ с помощью современной техники позволяет значительно увеличить добычу угля.

Однако полученный значительный рост объемов производства содержит в себе и ряд трудностей. В сложных горно-геологических условиях Западного Донбасса, где крепость угля зачастую превышает крепость вмещающих пород, с увеличением длины выемочных столбов одновременно увеличивается и протяженность подготовительных выработок, что приводит к серьезным проблемам их поддержания. Учитывая, производственную тенденцию по повторному использованию подготовительных выработок, необходимо

изначально использовать наиболее рациональные схемы крепления, чтобы избежать необходимости проводить перекрепление выработки, тем самым избегая дополнительных затрат на производство.

Одним из наиболее показательных примеров являются трудности, связанные с отработкой пласта С₅ на ШП «Самарская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь», где для устранения последствий сильного водопритока в лаву был проведен дренажный вентиляционный штрек на глубине 10м от угольного пласта. В результате проведение выработки связано с целым рядом технологических факторов, негативно влияющих на ее устойчивость. Во-первых, вода, которая по дренажным скважинам поступает в штрек с вышележащего горизонта, способствует размоканию пород почвы и провоцирует пучение, во-вторых, часть выемочных столбов, отработывающих угольный пласт, проходит непосредственно над штреком, что приводит к попаданию выработки в зону опорного давления вокруг лавы.

В результате складывается ситуация когда выбор рациональных параметров системы крепления дренажного штока не может осуществляться по рекомендациям СОУ для поддержания подготовительных выработок. Необходимо разработать новые параметры, полностью отвечающие специфике проведения выработки в сложных горно-геологических условиях, с учетом влияния наработки и наличия воды в кровле.

Постановка задачи. В связи с недостаточной степенью изученности проблемы и отсутствием решений аналогичных задач для конкретных горно-геологических условий возникает необходимость продолжить исследования по определению рациональных параметров крепления подготовительных выработок для горно-геологических условий Западного Донбаса с использованием современных методов расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород в условиях наработки.

На современном этапе развития компьютерных систем проведение вычислительного эксперимента большой сложности становится вполне доступным способом решения различных прикладных задач. Вычислительный эксперимент представляет собой метод исследований сложных проблем, основанный на построении и анализе с помощью вычислительной техники математических моделей изучаемого объекта. В отличие от аналитических методов решения численные методы позволяют использовать специально разработанное программное обеспечение для решения большого круга задач [1]. В основе вычислительного эксперимента лежит использование метода конечных элементов, как наиболее совершенного и подходящего для решения задач геомеханики. Это численный сеточный метод, который основан на представлении области, напряженно-деформированное состояние которой нужно определить, в виде совокупности плоских или пространственных элементов типа стержневых или рамных конструкций. Особенностью является ясная физическая трактовка решаемых задач. Возможность определения физико-механических свойств каждого отдельного элемента позволяет учитывать неоднородность свойств деформируемой области, что идеально сочетается с необходимостью моделировать тонкослоистый угольный массив. Технология пространственного моделирования дают возможность создавать элементы различной сложности для максимального соответствия модели реальным условиям. Обширные возможности для изменения граничных условий позволяют максимально приблизить модель к необходимым условиям.

Использование современных систем автоматизированного инженерного анализа (Computer Aided Engineering — CAE) является на сегодня одним из наиболее эффективных способов решения подобных задач. Одним из самых распространенных таких комплексов сегодня является программа ANSYS, использующая метод конечных

элементов. Многоцелевая направленность программы, независимость от аппаратных средств (от персональных компьютеров до рабочих станций и суперкомпьютеров), средства геометрического моделирования на базе B-сплайнов (технология NURBS), полная совместимость с CAD/CAM/CAE системами ведущих производителей и «дружеский» интерфейс позволили ANSYS стать одним лидером в сегменте специализированного инженерного ПО. В настоящее время ANSYS адаптирован и используется для выполнения научно-исследовательских работ в геомеханике.

Построение модели. Основным подходом к выбору исходных параметров модели было максимальное соответствие реальным горно-геологическим условиям конкретного участка, а также паспорту крепления дренажного вентиляционного штрека. Выполнена оценка размеров модели по вертикальной и горизонтальной координатам Y и X , которые являются вполне достаточными для описания представления картины распределения напряжений вокруг очистного забоя и нижележащей подготовительной выработки. В результате модель состоит из 25 породных слоев с реальными физико-механическими характеристиками пород, при этом ее размеры составили: 55 м по ширине и 48 м по высоте. Угол падения угольного пласта 3° , коэффициент Пуассона $\mu=0,3$. Для отработки угольного пласта моделируется очистной забой с механизированной крепью, которая для облегчения расчета строится в виде прямоугольного блока с размерами и физико-механическими свойствами соответствующими реальным. На глубине 10 м от угольного пласта проведен дренажный штрек, сечение которого смоделировано под крепь КШПУ. В выработку вписана рамная крепь с профилем СВП-22, а также анкерная крепь, состоящая из 7 анкеров в кровле длиной 2,4 м и 2 анкеров в боках выработки длиной 1,5 м.

Результаты эксперимента. Вычислительный эксперимент в упругопластической постановке состоял из двух этапов:

расположение очистного забоя на расстоянии 14 м от штрека и непосредственно над выработкой. Для анализа результатов расчета использовались эпюры интенсивности σ , вертикальных σ_y и горизонтальных σ_x напряжений. В статье для возможности проведения наглядного сравнительного анализа представлены попарно эпюры интенсивности σ горного массива в окрестности дренажного штрека и крепёжной конструкции выработки в упругой и упруго-пластической постановке с изменяющимся расстоянием приближения очистного забоя по вышележащему угольному пласту.

Результаты вычислительного эксперимента, полученные в упругой постановке с описанием зон повышенных напряжений, деформаций, областей разгрузки, а также характерными особенностями распределения напряжений, представлены в работе [3]. В отличие от линейной задачи при решении нелинейной напряжения в массиве падают, а деформации продолжают расти, что соответствует понятиям закона пластичности. Это подтверждает объективность полученных результатов, представленных на рисунке 1, так как при линейном расчете (рис. 1а) образуется зона опорного давления вокруг очистного забоя, которая распространяется на значительное расстояние в кровлю и почву пласта и достигает 20 м в высоту и 7 м в ширину. При этом интенсивность напряжений в породах кровли достигают 50 МПа, что превышает предел прочности пород на одноосное сжатие и соответственно свидетельствует о значительных деформациях слоев вплоть до образования трещин и нарушения целостности массива. Характерной особенностью расчета является непосредственная близость подготовительной выработки к извлекаемому угольному пласту. В связи с этим области концентраций напряжений, образованные от очистных работ и вокруг дренажного штрека соединяются, при этом на породные слои, залегающие между ними, оказывается воздей-

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

стве сразу двух зон опорного давления. Данная область занимает 13–16 м по ширине и до 10 м по высоте, напряжения находятся в диапазоне 20–30 МПа, что достаточно для образования трещин в слабых породах Западного Донбасса.

По сравнению с упругой постановкой, результаты решения билинейной задачи (рис. 1б) дают совершенно иную картину распределения напряжений в массиве горных пород. Напряжения вокруг очистного забоя и подготовительной выработки значительно снизились и только на 10–15% превышают равновесное состояния масси-

ва. При этом сохраняется качественное распределение зон опорного давления в боках, а также зон разгрузки в кровле и почве выработки. В кровле очистного забоя, а также над выработанным пространством происходит перегиб породных слоев, вследствие постепенного проседания вышележащих слоев на ранее обрушенные консоли основной кровли.

Для получения полноценной картины влияния надработки на подготовительную выработку необходимо проанализировать напряженно-деформированное состояние рамного и анкерного крепления.

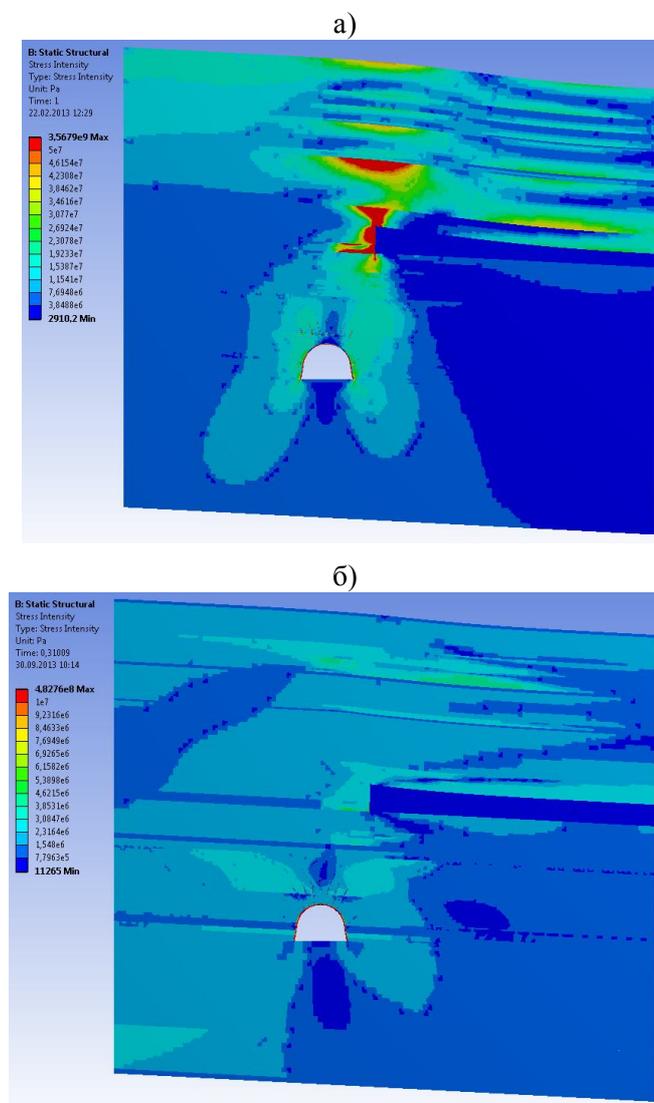


Рисунок 1 — Эпюра интенсивности напряжений σ горного массива при расположении очистного забоя над дренажным штреком:
а) упругая постановка; б) упруго-пластическая постановка.

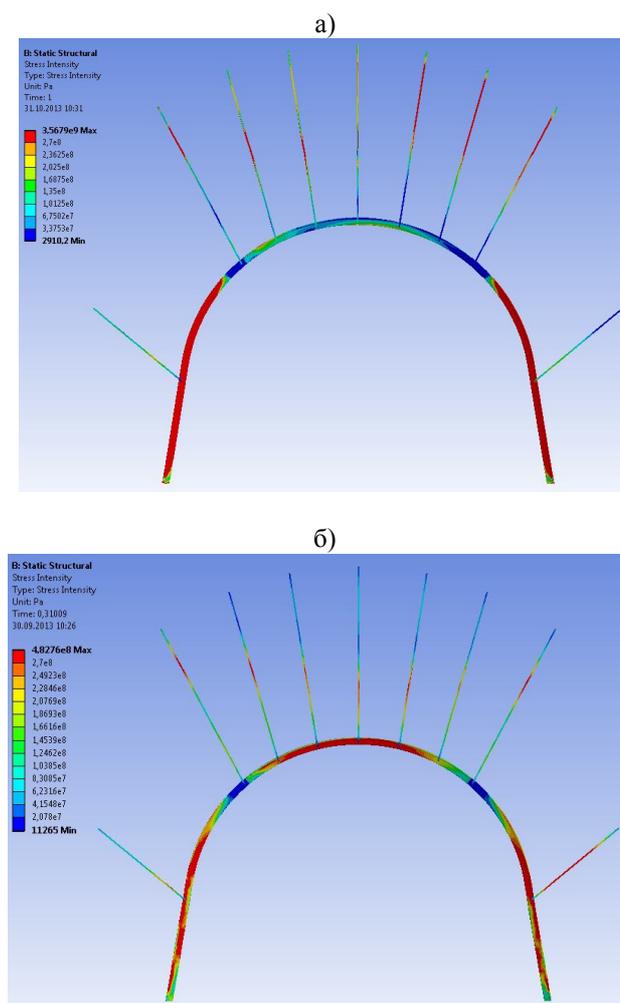


Рисунок 2 — Эпюры интенсивности напряжений σ рамной и анкерной крепи при расположении очистного забоя над дренажным штреком:
а) упругая постановка; б) упруго-пластическая постановка

На рисунке 2а представлена эпюра интенсивности напряжений σ , полученная в ходе линейного вычислительного эксперимента. При анализе эпюры необходимо выделить симметричное распределение напряжений свыше 270 МПа в обеих стойках крепи, что характеризует превышение предела текучести стали вследствие интенсивного воздействия горного давления в боках выработки. При этом верхняя рама относительно разгружена, максимальные напряжения не превышают 170 МПа. Анкерная крепь более нагружена со стороны подхода очистного забоя, что вполне закономерно. При этом анкера нагружены не равномерно по своей длине, происходит

явное защемление анкеров в породных слоях, что приводит к значительному повышению напряжений на отдельных участках арматуры, вплоть до превышения предела текучести, что свидетельствует о деформации стержня сталеполимерных анкеров. Более подробно неоднородность влияния горного давления на напряженно-деформированное состояние крепежной конструкции описана в работе [4].

В результате билинейного расчета (рис. 2 б) распределение приведенных напряжений в крепежной конструкции существенно изменилось. Боковые стойки рамы подвержены высоким напряжениям не по всей длине, а преимущественно в цен-

тральной части, при этом произошло уменьшение концентрации напряжений в нижней и верхней части стоек. В тоже время напряжения в верхняке рамы наоборот возросли вплоть до величин, позволяющих говорить о прогибе верхняка внутрь выработки вследствие значительного давления со стороны пород непосредственной кровли. Анализ эпюры напряжений анкерного крепления показывает устойчивую тенденцию к снижению напряжений. Напряжения близкие к пределу текучести стали присутствуют точно, либо на значительно меньшем участке анкеров. В остальном же произошло значительное снижение напряжений в среднем до 135 МПа. Исключением является только боковой анкер со стороны приближения забоя, 80% площади которого подвержены напряжениям свыше 270 МПа.

Выводы. В ходе анализа проблемы поведения крепежной системы подготовительных выработок с учетом наработки выявлено, что существующие параметры крепления не обеспечивают эксплуатационное состояние выработок. В результате

вычислительного эксперимента получены эпюры распределения напряжений и деформаций углевещающего породного массива и крепежной конструкции дренажного штрека для двух случаев проведения вычислительного эксперимента. Выявлены зоны критических приведенных напряжений в массиве, образованные вследствие ведения очистных работ и вокруг дренажного штрека, которые соединяются, при этом на породные слои, залегающие между ними, оказывается воздействие сразу двух зон опорного давления. Образованная область занимает 13–16 м в ширину и до 10 м в высоту, при этом напряжения достигают 20–30 МПа. Определены зоны пластического течения металла в боках и верхняка рамной крепи, превышающие 270 МПа, а также в отдельных участках анкеров. Сравнительный анализ результатов решения задач в упругой и упруго-пластической постановках показал, что оптимальным условием для получения объективных выводов является их совместное использование в преимуществах решений.

Бibliографический список

1. Самарский А. А. Численные методы / А. А. Самарский. — М.: Наука. — 1989. — 429 с.
2. Жидков А. В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А. В. Жидков. — Нижний Новгород. — 2006. — 115 с.
3. V. Sotskov Investigation of the rock mass stress strain state in conditions of the drainage drift overworking / V. Sotskov, I. Saleev // Mining of mineral deposits. — Netherlands: CRC Press / Balkema — 2013. — P. 197–201.
4. Соцков В. А. Исследование влияния наработки дренажного штрека на напряженно-деформированное состояние крепежной конструкции / В. А. Соцков // Розробка родовищ. — Днепропетровск: ТОВ «ЛізуновПрес». — 2013. — С. 317–322.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Литвинским Г. Г., д.т.н., проф. НГУ Ковалевской И. А.

Статья поступила в редакцию 21.02.14.

д.т.н., проф. Бондаренко В. І., к.т.н. Фомичов В. В., Соцков В. О.
(ДВНЗ «НГУ», м. Дніпропетровськ, Україна)

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ В ПРУЖНОПЛАСТИЧНІЙ ПОСТАНОВЦІ ДЛЯ УМОВ ЗАХІДНОГО ДОНБАСУ

Проведена серія розрахунків при наближенні очистного вибою до виробки в пружно - пластичній постановці з урахуванням фізико-механічних властивостей порід і шаруватості гірського масиву. Проаналізовано результати експерименту, визначені області концентрації напружень і розвантаження в масиві, а також ступінь впливу гірського тиску на рамне і анкерне кріплення виробки. Ви-

явлені характерні особливості результатів, отриманих при вирішенні лінійної та білінійної задач, що дозволило об'єктивно оцінити напружено-деформований стан гірського масиву і кріплення.

Ключові слова: обчислювальний експеримент, пружно-пластична постановка, очисні роботи, кріпильна конструкція, напружено-деформований стан.

Bondarenko V. I. Doctor of Engineering Sciences, Fomychov V. V. Candidate of Engineering Sciences, Sotskov V. O. (HIS «NMU», Dnipropetrovsk, Ukraine)

PECULIARITIES OF THE OF COMPUTER EXPERIMENT USAGE IN ELASTIC PLASTIC POSITION FOR WESTERN DONBAS CONDITIONS

A series of calculations when approaching of stope to the drift in the elastic-plastic position taking into account physical and mechanical properties of rocks and bedding of the rock massif were conducted. The results of the experiment were analyzed, areas of strain-stress state concentration and discharge in the massif were identified, and the degree of influence of rock pressure on frame and anchoring barring was also identified. Characteristic features of the results obtained in solving linear and bilinear tasks were revealed. It allowed to estimate objectively the strain-stress state in the rock mass and fastening.

Key words: computer experiment, elastic plastic position, stope, fastening system, strain-stress state