



В. И. БОНДАРЕНКО,
доктор техн. наук
(Национальный горный
университет)



В. В. ФОМИЧЕВ,
канд. техн. наук
(Национальный горный
университет)



Ю. Я. ЧЕРЕДНИЧЕНКО,
инж.
(ООО «ДТЭК»)

В современных промышленных-экономических условиях Украины основное препятствие для широкого использования угля в энергетике – высокая себестоимость добычи. Значительная ее часть приходится на затраты по поддержанию выемочных выработок. Оптимальные характеристики их крепления должны быть выбраны

УДК 622.264.001.57

Определение оптимальных параметров устойчивости системы трещиноватые породы–крепь выработки

Изложена разработанная авторами модель описания влияния трещиноватости пород на прочностные характеристики горного массива с проведением вычислительного эксперимента методом конечных элементов, позволяющим получать оптимальные параметры площади сечения и формы подготовительных выработок для шахт Свердловско-Ровеньковского угольного региона Донбасса. Проведены шахтные наблюдения и выполнены сравнения с исследованиями на моделях. Представлен вычислительный эксперимент.

Ключевые слова: подготовительные выработки, трещиноватость пород, двухступенчатый вычислительный эксперимент, механика сплошной среды.

Контактная информация: v_domna@yahoo.com

с учетом таких горно-геологических характеристик породного массива, как обводненность, трещиноватость и др. Проведение лабораторных или вычислительных экспериментов, позволяющих исследовать устойчивость выработки при различных вариантах схем поддержания, требует формирования системы описания горно-геологических особенностей породного массива, чтобы решить конкретную задачу геомеханики.

Для моделирования трещиноватости в вычислительных экспериментах часто используют поправочные коэффициенты, корректирующие предел прочности и модуль упругости породы [1, 2], с помощью которых нельзя в полной мере учитывать изменение состояний породного массива с ростом напряжений и трещин. С течением времени или развитием деформаций характеристики трещиноватости пород могут меняться. При нелинейной постановке задачи геомеханики расчетную область необходимо рассматривать не только как объект, но и как процессы, происходящие в нем и влияющие на него, что дает возможность получать уточненные решения по выбору систем поддержания выемочных выработок.

Цель исследований – определение оптимальных параметров площади сечения выемочной выработки, позволяющих максимально снизить вероятность вывалообразования для конкретных условий проведения горных работ.

Постановка задачи – разработка модели описания влияния трещиноватости пород на прочностные характеристики горного массива, определяющей условия вычислительного эксперимента, проводимого методом конечных элементов для выбора оптимальных параметров площади сечения выемочной выработки, пройденной в неустойчивых породах; выполнение сравнительного анализа,

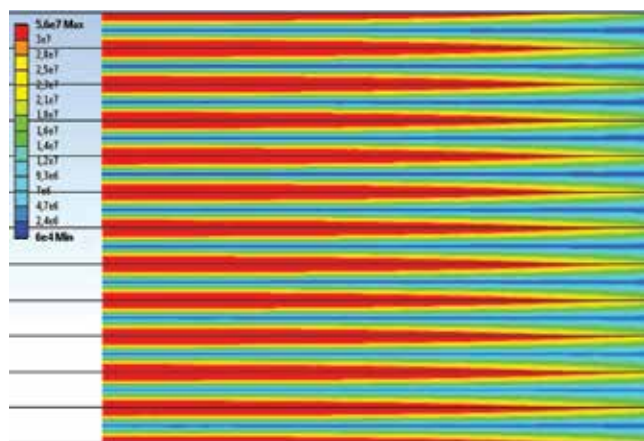
обеспечивающего выбор оптимальных показателей площади сечения выемочной выработки с учетом трещиноватости приконтурных пород, находящихся в состоянии высокой вероятности вывалобразования.

Определение характеристик моделирования трещиноватости в вычислительном эксперименте. Степень влияния трещиноватости оценивается путем проведения тестовых расчетов на микромоделах, описывающих реальные показатели систем трещин, присутствующих в горном массиве. Чем сложнее структура, тем сложнее рассматриваемые микромодели [3]. Выбор модели трещиноватости, используемой в последующих расчетах, определяется не ее сложностью, а степенью соответствия смещений и характера разрушения, получаемых в данном расчете и фиксируемых при натуральных наблюдениях в нашем случае для шахты «Красный Партизан».

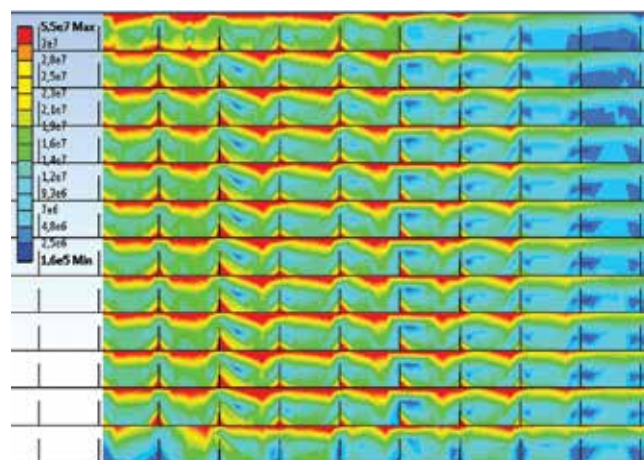
В качестве эталонного расчета рассмотрим следующую модель – 12 слоев длиной 30 м, высотой 0,4 м и шириной 0,6 м, свободно опирающихся на жесткие площадки. Вся система находится под действием собственного веса и удаленной нагрузки в 50 МПа. Крепкий песчаник используется как материал слоев.

Кроме эталонного расчета выполнили еще два – с одной системой трещин (расстояние между трещинами 0,5 м и глубина трещин 0,29 м) и с двумя (расстояние 1 м, глубина 0,03 м).

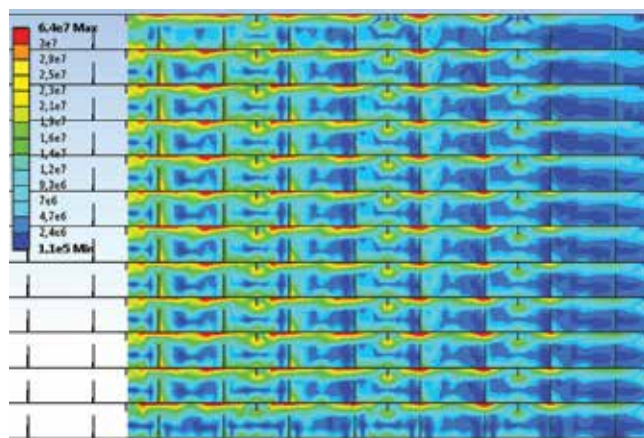
Распределение напряжений при различных условиях моделирования трещиноватости. Для эталонного расчета (рис. 1, а) распределение характеризуется единообразием во всех 12 слоях – максимальные напряжения сосредоточены вдоль контактных поверхностей и растут с приближением к оси вертикальной симметрии модели. Отметим, что распределение напряжений изменяется в верхнем и нижнем моделируемых слоях незначительно. Сравнивая максимумы интенсивности напряжений для разных вариантов расчетов, видим, что на рис. 1, а и б они практически одинаковы и равны примерно 55 МПа, а максимум напряжений на рис. 1, в превосходит эти значения на 10 МПа. Это указывает на то, что распределение напряжений в первых двух вариантах расчета сопровождается значительными пластическими деформациями, а в третьем формирование НДС определяется хрупким разрушением породы.



а



б



в

Рис. 1. Эпюры интенсивности напряжений для микромоделей: а – без поперечной системы трещин; б и в – с одной и двумя поперечными системами трещин.

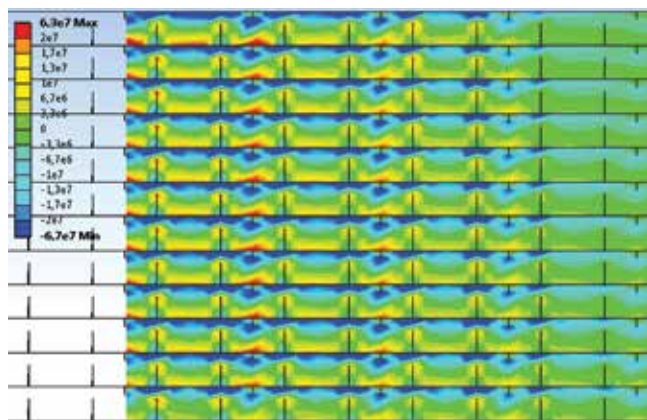


Рис. 2. Эпюры продольных напряжений в микромодели с двумя поперечными системами трещин.

Анализ эпюр интенсивности напряжений (см. рис. 1) позволяет однозначно сделать вывод об изменении физики поведения породы с различными показателями трещиноватости, находящейся в зоне повышенного горного давления. При этом происходит не только перераспределение напряжений и перемещений по контуру выработки, но и наблюдаются разные формы разрушения горного массива.

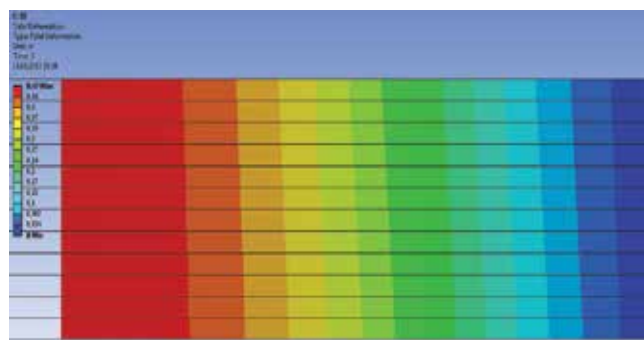
В этой связи возникает необходимость разработки ступенчатой модели описания трещиноватого породного массива при проведении вычислительных экспериментов. В рассматриваемом случае ступенчатость решений определяется анализом совокупности факторов, когда достигается предел целевой функции, описывающей степень влияния данной характеристики на распределение напряжений в приконтурной области породного массива. Поэтому следует изучать влияние совокупности параметров трещиноватости с разных прикладных направлений в рамках предлагаемого решения.

Для более глубокой оценки поведения породы в рассматриваемых трех системах трещин исследуем эпюру горизонтальных напряжений (рис. 2). Каждая из систем трещин по-своему влияет на развитие деформаций породных слоев. Если более длинные трещины благодаря их ориентации формируют в районах своих вершин зоны повышенных растягивающих деформаций, то короткие ослабляют площадь поперечного сечения выработки, т. е. влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) модели системы трещин зависит не только от их абсолютного значения, но

и от ориентации в пространстве. Сравнение концентрации горизонтальных напряжений, вызванных трещинами от разных систем, показывает, что степень их воздействия на данный компонент НДС системы одинакова. Исходя из этого, трещины в рассматриваемой модели максимально влияют на увеличение деформаций по направлению раскрытия, что хорошо согласуется с общими представлениями механики о поведении материалов в предельном и запредельном состояниях [4].

Кроме того, анализ эпюр полных перемещений (рис. 3) позволяет сделать вывод о качественном изменении в распределении деформаций при наличии системы трещин в модели породы. Представленные на рис. 3, а перемещения характерны для балки, закрепленной с одной стороны (в данном случае отсутствуют какие-либо особенности в их распределении). На рис. 3, б перемещения имеют ярко выраженный ступенчатый характер, что указывает на значительное взаимное проскальзывание моделируемых слоев (до 0,2 м), – показатель больших сдвиговых деформаций по плоскостям напластования. При этом угол наклона изолиний (см. рис. 3, б) показывает направление формирования свода естественного равновесия в рамках данной расчетной модели.

Таким образом, в процессе вычислительного эксперимента определены начальные показатели моделирования трещиноватости в упругом и предельном состояниях породного массива, имеющего усредненные прочностные показатели, т. е. можно применить математический аппарат механики сплошной среды для расчетов прочностных характеристик пород горного массива в нелинейной постановке до этапа образования магистраль-



а

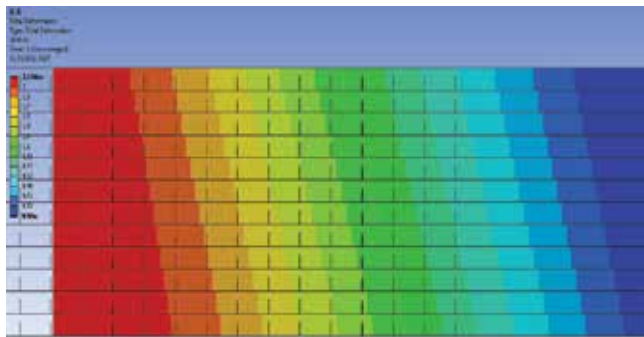
Рис. 3. Эпюры полных перемещений
а – без поперечной системы трещин;

ных трещин и сдвижения образованных породных блоков в полость выработки.

Анализ вычислительного эксперимента по определению оптимального контура выемочной выработки. Решение задачи по повышению устойчивости выемочных выработок шахты «Красный Партизан» базировалось на определении оптимальных характеристик площади сечения выработки, позволяющих снизить вероятность вывалообразования. Поэтому существенное значение в комплексе проведенных исследований имело изучение трещиноватости вмещающих выемочные выработки пород. Последние в месторождении характеризуются достаточно высокими прочностными показателями, но их трещиноватость значительно снижает устойчивость породных обнажений и существенно инициирует обрушение непосредственной кровли, образование вывалов в подготовительных и очистных выработках.

В целях обеспечения возможности реализации выбранного в результате предварительных исследований метода моделирования систем трещин были выполнены замеры трещиноватости в породах кровли пласта k_5^1 , которыми охвачены как очистные, так и подготовительные выработки пласта в пределах технических границ поля шахты.

Шахтными наблюдениями и исследованиями на моделях установлено, что в горно-геологических условиях проведения выемочных штреков на глубине 1300 м (например, шахты «Красный Партизан») трещиноватые породы в кровле призабойного пространства выработок находятся в разупрочненном состоянии и подвержены «руинному» разрушению.



б

для микромоделей:
б – с одной поперечной системой трещин.

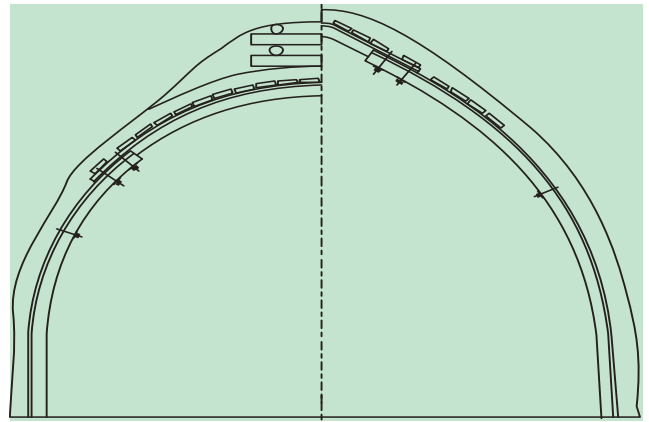


Рис. 4. Поперечное сечение выемочной выработки с крепью КМП-А3 (по паспорту) и возведением в вывалах кровли костров (слева) и предлагаемое сечение выработки с крепью КВТ-2 (справа), вписывающейся в фактический породный контур.

Начало обрушения разупрочненных пород кровли штрека (вывалообразование) происходит непосредственно в призабойном пространстве и продолжается до момента укладки в закрепном пространстве «костров». Породный контур площади поперечного сечения вчерне вблизи забоя формируется из площади проектного сечения вчерне собственно выработки плюс площади поперечного сечения вывала, приближаясь к форме эллипса как наиболее устойчивой форме контура породного обнажения.

Поэтому наиболее технологичным и экономически оправданным выходом из горнотехнической ситуации (устранение в проходческом цикле вывалообразования) будет изменение формы рамной крепи путем замены циркульной формы свода (рис. 4, слева) рамы (КМП-А3) на форму свода, максимально приближенного к эллипсу (крепь КМП тип АЗР2), или на остроконечную форму крепи выпуклой треугольной КВТ-2 (рис. 4, справа). Указанная крепь обеспечивает высокий эффект арочности и формирует консолидирующую грузонесущую породную оболочку вблизи и вокруг контура проводимой выработки, за счет чего происходит самозаклинивание разупрочненных пород по контуру породного обнажения и тем самым предотвращается вывалообразование.

Таким образом, в рамках вычислительного эксперимента были выполнены расчеты по определению НДС системы трещиноватые породы–крепь выработки для вариантов рамных крепей КМП-А3 и КВТ-2. Трещиноватость в кровле выработки мо-

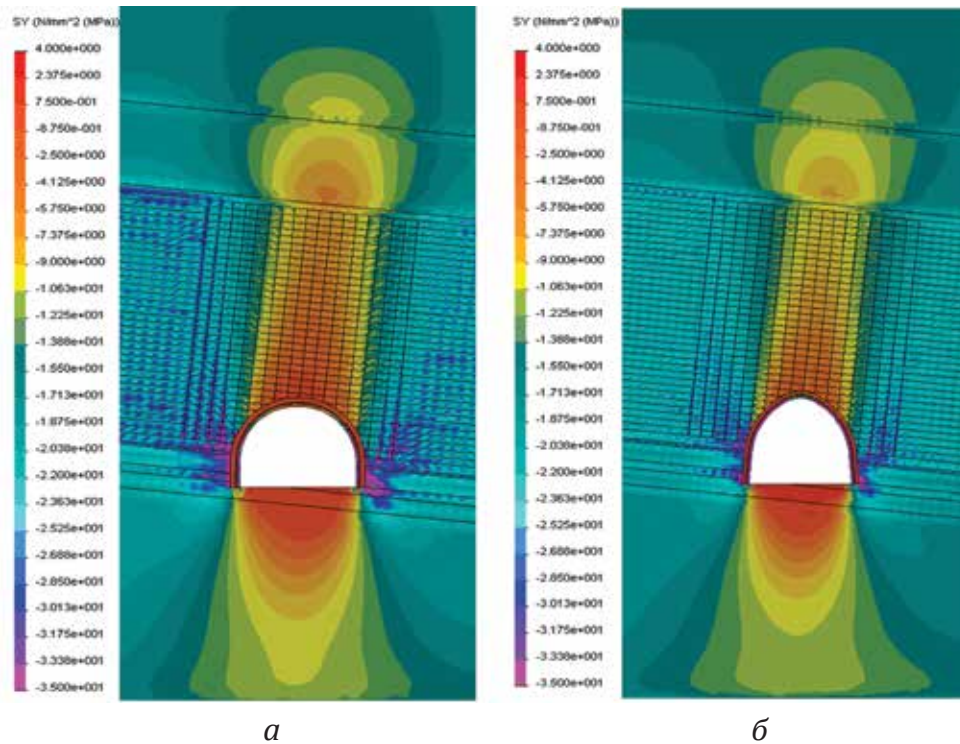


Рис. 5. Эпюры вертикальных напряжений для сечений выработок: а – с циркулярным сводом; б – с шатровым сводом.

делировали на основе варианта, представленного на рис. 1, в. Полученные результаты были оценены на базе сравнительного анализа эпюр вертикальных напряжений, их интенсивности и полных перемещений.

Во-первых, для обоих расчетов интенсивность напряжений в элементах рамной крепи оказалась

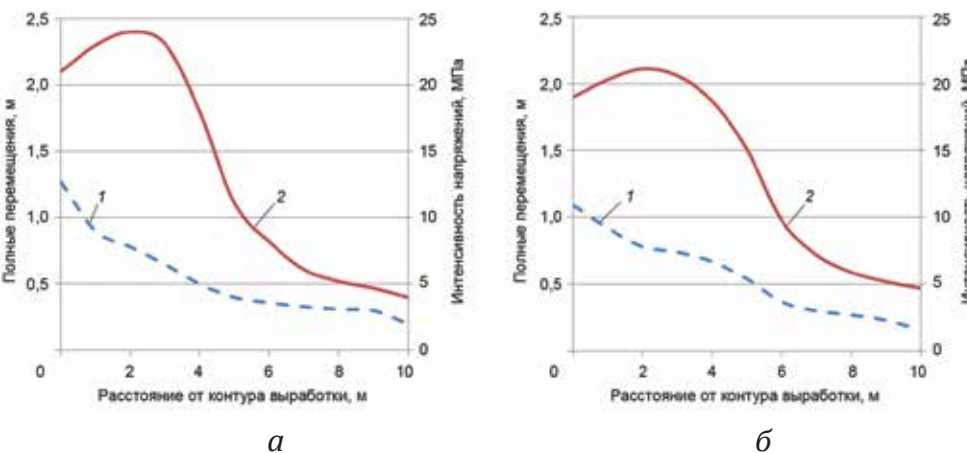


Рис. 6. Зависимость перемещений породных слоев 1 и интенсивности напряжений 2 в кровле выработки для площади ее сечения: а – с циркулярным сводом; б – с шатровым сводом.

близкой, но меньшей предела текучести стали Ст.5 и составила максимум 197 МПа в стойке крепи КМП-А3. Следовательно, по этому показателю рамные крепи сохраняют несущую способность вплоть до образования вывалов приконтурных пород.

Во-вторых, качественный анализ эпюр вертикальных напряжений (рис. 5) показал, что растягивающие напряжения в непосредственной кровле выработки с циркулярным сводом (см. рис. 5, а) на 9–12 % выше, чем для выработки с шатровым сводом (см. рис. 5, б), а геометрические размеры зоны таких напряжений на 18 % больше, чем в варианте с циркулярным сводом.

Эпюры (см. рис. 5) – результаты расчетов, когда на первую систему трещин накладывается перпендикулярная система трещин, ориентированная вдоль оси выработки. Взаимодействие этих систем трещин моделируется в виде последовательно сложенных блоков, имеющих по двум соприкасающимся граням единичные площадки контакта. Как видно, такое представление взаимодействия двух систем трещин применяется

только в той части породного пласта, которая расположена над выработкой и непосредственно примыкает к ней. В данном случае речь идет о компромиссе между адекватностью расчетной модели и затратами вычислительных мощностей. Подобное моделирование систем трещин по всей ширине породного слоя приведет к резкому возрастанию вычислитель-

ных затрат и снизит устойчивость проводимых расчетов.

В то же время максимальное воздействие трещиноватости на перемещения контура выработки связано прежде всего с областью, непосредственно формирующей структуру ее кровли. Это подтверждают полученные эпюры, резкий градиент изменения напряжений в которых совпадает с областью блочного описания трещиноватости породного массива.

Если размеры зоны растягивающих напряжений можно объяснить сугубо геометрическими различиями в ширине рассматриваемых сечений, то напряжения и градиенты в боках выработок могут быть вызваны только эффектом перераспределения усилий по всему контуру площади сечения выемочной выработки [5]. Для варианта, представленного на рис. 5, б, характерна симметрия распределения напряжений с обоих боков выработки. Максимальные напряжения составляют 37 МПа в боку выработки по восстанию и 35,8 МПа по падению. Для варианта, рассматриваемого на рис. 5, а, качественные различия настолько велики, что в боку выработки по восстанию при максимуме напряжений в 39,8 МПа градиент просматривается на всю высоту моделирования трещиноватости, в то время как по падению максимум напряжений составил 41 МПа и их концентрация наблюдается непосредственно на контуре выработки.

Поскольку анализ, выполненный на основе одного компонента НДС системы, не всегда дает объективное представление об устойчивости выемочной выработки [6] в реальных горно-геологических условиях, рассмотрим в дополнение к вертикальным напряжениям как изменяется интенсивность напряжений и перемещения породных слоев в кровле выработки (рис. 6).

Графики перемещений породных слоев и интенсивности напряжений построены на вертикальной оси, начинающейся в верхней точке свода выемочной выработки. При сравнении кривых перемещений видно, что на рис. 6, б они изменяются по закону, близкому к линейному. В то же время на рис. 6, а перемещения с приближением к контуру выработки растут интенсивнее, чем в глубине массива. Градиент интенсивности напряжений на рис. 6, а больше, чем на рис. 6, б, что

с учетом роста перемещений указывает на достижение предела текучести приконтурных пород и переход в запредельное состояние части породной кровли выработки. Можно констатировать, что по совокупности сравниваемых характеристик НДС системы трещиноватые породы-крепь выработки расчетный вариант для площади сечения выработки поддерживаемой рамной крепью КВТ-2 показал более высокие показатели устойчивости приконтурных пород, что позволяет снизить степень вероятности вывалообразования.

Выводы. В результате проведенных двухступенчатых вычислительных экспериментов была выбрана площадь сечения выработки, обеспечивающая предотвращение вывалообразования в конкретных условиях трещиноватости приконтурного породного массива. Разработанная вычислительная модель дает возможность максимально адекватно описать расчетную область путем определения параметров систем трещин в расчетах методом конечных элементов на основе представлений механики сплошной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклашов И. В. Механические процессы в породных массивах / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – М.: Недра, 1986. – 415 с.
2. Павлова Л. Д. Моделирование геомеханических процессов в разрушаемом углеродном массиве / Л. Д. Павлова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – 239 с.
3. Фомичев В. В. Влияние нелинейных характеристик приконтурных горных пород на процесс деформирования рамной крепи / В. В. Фомичев, А. И. Скитенко // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XXIII междунар. науч. школы. – Симферополь: Таврический национальный ун-т, 2013. – С. 275–278.
4. Krowiak A. Determination of optimal use of hydromechanical method of coal mining using plane in various geological-mining conditions / A. Krowiak, V. Fomychov // Mining & Environment. – Katowice: Central mining institute, 2012. – № 4. – С. 87–96.
5. Ковалевская И. А. Основные принципы построения геомеханической модели и исследования НДС массива с учетом неплановых остановок лавы / И. А. Ковалевская, Г. А. Симанович, В. В. Фомичев // Розробка родовищ: щорічний наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2013. – С. 269–275.
6. Ержанов Ж. С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород / Ж. С. Ержанов, Т. Д. Каримбаев. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 238 с.