

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»

ВІСТІ
ДОНЕЦЬКОГО ГІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ

Всеукраїнський науково-технічний
Журнал гірничого профілю
Виходить 2 рази на рік
Засновано у 1995 році

1'2008

Донецьк – 2008

УДК 622.831.3.001.5: 622.26

ШАШЕНКО А.Н., ГАПЕЕВ С.Н., СОЛОДЯНКИН А.В., ГАВРИШ А.К., ТЕРЕЩУК Р.Н., ХОЗЯЙКИНА Н.В., ПАШКО А.Н., ЯНКО В.В. (Национальный горный университет)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Показаны различные приложения численных методов к решению задач геомеханики для исследования напряженно-деформированного состояния породного массива и оценки устойчивости системы «выработка-породный массив».

Введение. Решение различных инженерных задач при освоении подземного пространства предполагает предварительное исследование и обоснование принимаемых решений. Рассмотрение таких задач в аналитической постановке предполагает использование относительно простых расчетных схем. Их усложнение с целью учета влияния очистных работ, других технологических факторов, наличия области разрушенных пород вокруг очистных или подготовительных выработок, структурных особенностей породного массива резко затрудняет решение, использование простых аналитических зависимостей становится невозможным даже в предположении упругого деформирования породной среды.

Более точное решение поставленной задачи можно получить, если расчетная схема или метод позволяют изначально учесть интересующие исследуемые факторы. Широкие возможности открывают в этом плане численные методы решения, заимствованные из механики твердого деформируемого тела. Наиболее эффективные из них – метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ).

Эти методы представляют собой мощные вычислительные средства, получившие в последние годы особую ценность с развитием компьютерной техники и программного обеспечения. Они достаточно гибки в отношении решения большого разнообразия задач для многосвязных областей с различным типом неоднородностей. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от решения задач с конкретными условиями.

Целью статьи является систематизация результатов решения некоторых геомеханических задач численными методами, выполненных на кафедре строительства и геомеханики Национального горного университета.

1. Задача о параметрах компенсационных полостей при обеспечении устойчивости выработок камерного типа.

Характерным примером использования МГЭ является задача по обоснованию параметров способа управления напряженным состоянием пород вокруг камерных выработок при разработке пильных известняков Крыма. Их месторождения представляют собой плотные, большой мощности толщи почти без трещин, залегающие на небольшой глубине. Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) пород в таких условиях могут быть использованы с достаточной степенью точности методы теории упругости. Применяемый для решения задачи МГЭ позволяет определять напряжения и деформации в любой точке исследуемой области.

Расчетная схема представляла собой три камеры прямоугольного попереч-

ного сечения. В углах камер под углом α_c располагались щелевые пропилены длиной l_c с внутренним давлением P_c .

Задача усложнялась тем, что исследуемый способ управления НДС породного контура основан на применении компенсационных полостей (пропилов), длина которых на порядок отличается от периметра выработки. В связи с этим предварительно были проведены исследования влияния количества аппроксимирующих граничных элементов, а также различия их длин на точность расчетов.

На основе известных алгоритмов, а также с учетом результатов проведенных исследований, был разработан новый программный продукт (ПП) *Underground*, на современном уровне реализующий метод граничных элементов.

На рис. 1 приведен один из вариантов расчета, характеризующий состояние приконтурного массива в окрестности камеры прямоугольного поперечного сечения, находящейся в устойчивых породах с пределом прочности на одноосное сжатие $R_c = 10$ МПа, на одноосное растяжение $R_p = 1$ МПа, на глубине $H = 100$ м.

Результатом выполненных исследований было установление рациональных параметров компенсационных полостей для повышения на 30-50% устойчивости выработок камерного типа, целенаправленно формирующихся при подземной разработке пильных известняков Крыма [1] с целью их последующего долговременного использования.

2. Исследование явления потери устойчивости почвы протяженной выработки.

В основу решения задачи о потере устойчивости пород почвы в протяженных выработках положен упрощенный подход Ишлинского-Лейбензона [2, 3] к исследованию состояния механической системы при потере устойчивости равновесия. Суть его заключается в том, что параметр нагружения вводится только в граничные условия, которые учитывают изменение формы границы при вспучивании. Это обстоятельство существенно упрощает решение.

Полученные в ходе решения упругопластической задачи размеры зоны неупругих деформаций (ЗНД) оценивались на предмет возможности возникновения вспучивания почвы. В качестве критерия использован критерий в виде [4]:

$$\bar{\epsilon}_V r_L^{*2} \ln^2 r_L^* + 2 > 0, \quad (1)$$

где $\bar{\epsilon}_V$ – среднее относительное объемное разрыхление пород (определяется из опытов на сжатие породных образцов в процессе контролируемого разрушения); r_L^* – некоторая критическая величина радиуса ЗНД, приведенного к радиусу выработки R_0 , при которой наступает возможность вспучивания.

В случае выполнения неравенства (что означает наступление потери устойчивости почвы и начало пучения), в конечно-элементных узлах на контуре выработки в почве задавались новые граничные условия в виде дополнительных перемещений. Величина этих дополнительных перемещений принималась равной «порогу пучения» [5] и составляла 0,3 м. Конфигурация нового контура почвы задавалась в виде косинусоиды с максимумом по центру выработки.

Аналізу подвергались размеры ЗНД вокруг выработки при данной величине перемещений в почве (рис. 2). Установлено, что размеры ЗНД в почве выра-

ботки при величине вспучивания 0,3 м в 2-3 раза превышают начальные.

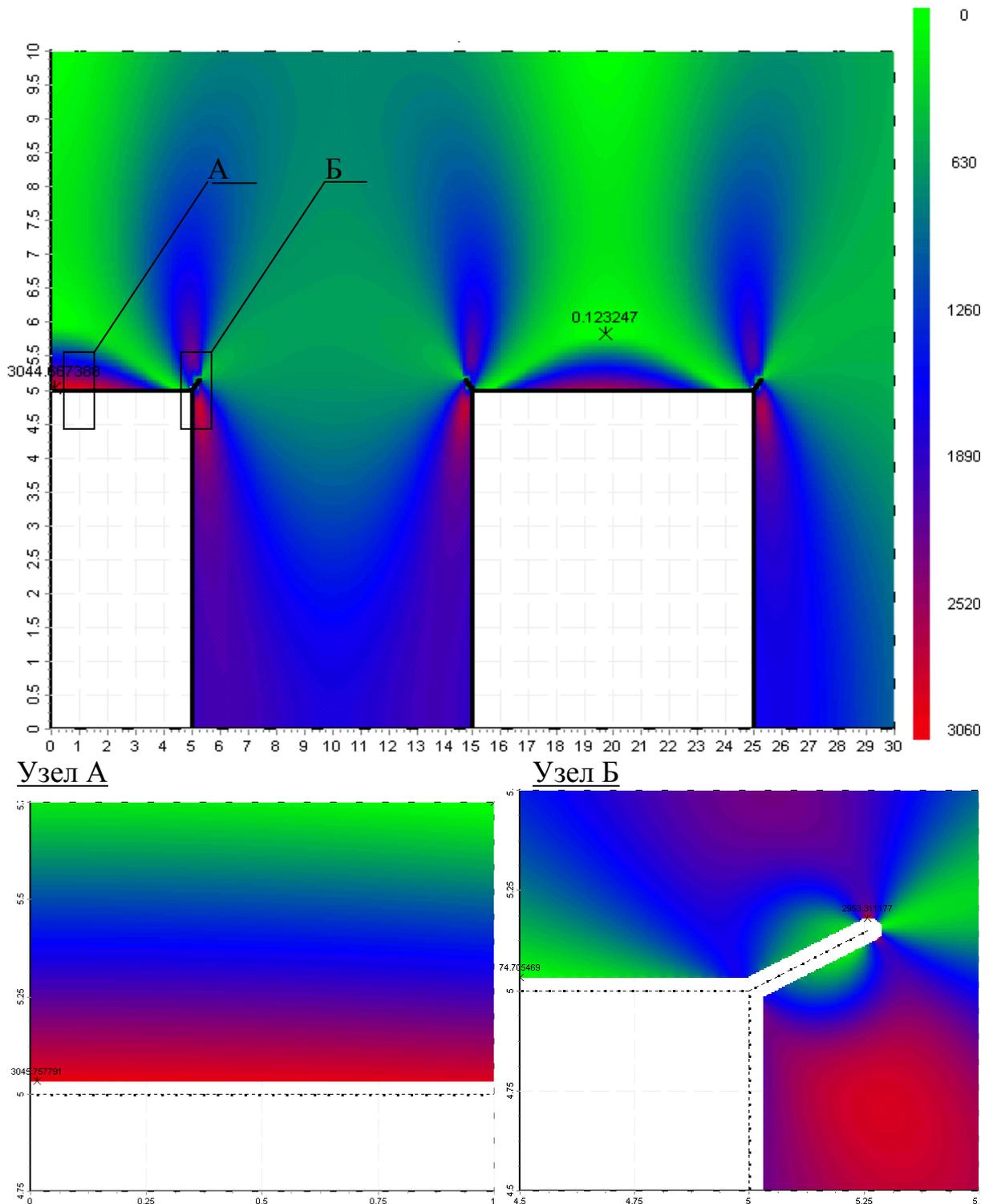


Рис. 1. Распределение эквивалентных напряжений в окрестности камер с применением компенсационных полостей длиной $l_c = 30$ см, расположенных под углом $\alpha_c = 30^\circ$ с внутренним давлением $P_c = 3$ МПа при $\sigma_{yy} = 1.2$ МПа, $\mu = 0.3$, $\psi = 0.125$

Натурные наблюдения за состоянием выработок, моделирование которых осуществлялось для условий по пласту l_8 на шахте «Белозерская» ГП «Доброполье-

уголь», показали характерные в таких условиях деформации крепи, как результат пучения почвы при сравнительно небольших деформациях крепи в кровле.

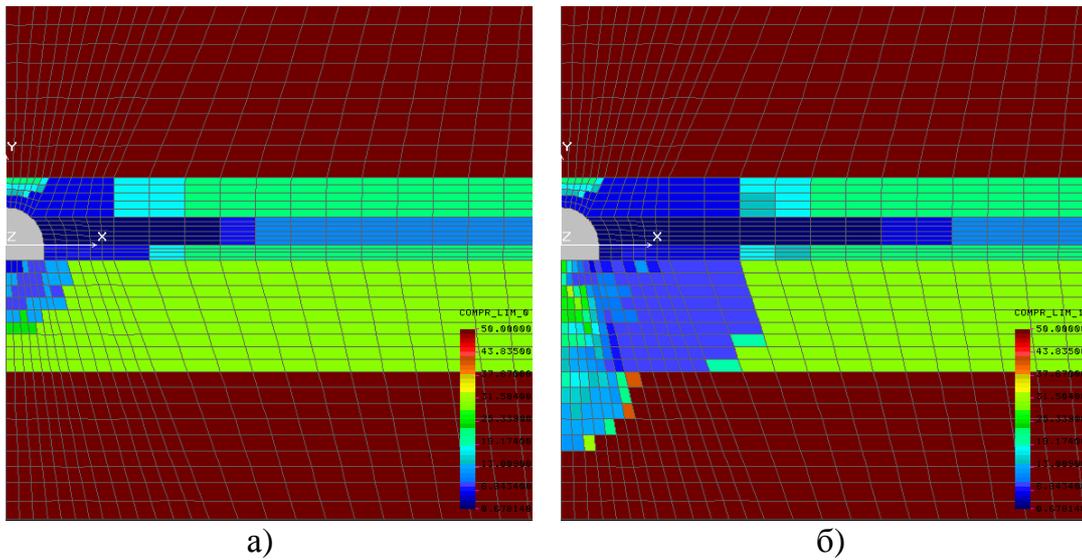


Рис. 2. Конфигурация зон неупругих деформаций до (а) и после (б) вспучивания (существенно неоднородный массив)

3. Деформирование породного массива в окрестности протяженной выработки, закрепленной анкерной крепью.

Решение задачи об НДС породного массива вокруг выработки, закрепленной анкерной крепью, выполнено с целью обоснования параметров анкерной крепи для условий шахты «Алмазная» ГП «Добропольеуголь». Для выполнения расчетов использован метод конечных элементов.

Учет нелинейного поведения массива производится путем решения задачи известным методом секущих модулей [6]. В ходе решения определяются те конечные элементы, имитирующие горные породы, в которых выполняется условие

$$\sigma_e \geq R_c \quad (2)$$

где R_c – предел прочности породы на одноосное сжатие, σ_e – эквивалентное напряжение, определяемое через компоненты тензора напряжений в точке в соответствии с критерием прочности Парчевского-Шашенко [7]:

$$\sigma_3 = \frac{1}{\psi} \left[(\psi - 1) \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \sqrt{(1 - \psi)^2 \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + 4\psi \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2} \right]$$

где $\psi = R_p/R_c$ – величина отношения предела прочности на растяжение к пределу прочности на сжатие, а σ_1, σ_3 – главные значения тензора напряжений.

Эти элементы сформировали новую группу, которая характеризуется нелинейными механическими свойствами и моделирует разрыхленную породу. Рис. 3 дает представление об общей форме и размерах области разрыхления при установке в выработку семи анкеров длиной 1,0 (рис. 3,б); 2,5 (рис. 3,в) и 3,0 м (рис. 3, г). На рис. 3, а представлена зона разрыхления в выработке при отсутствии анкеров.

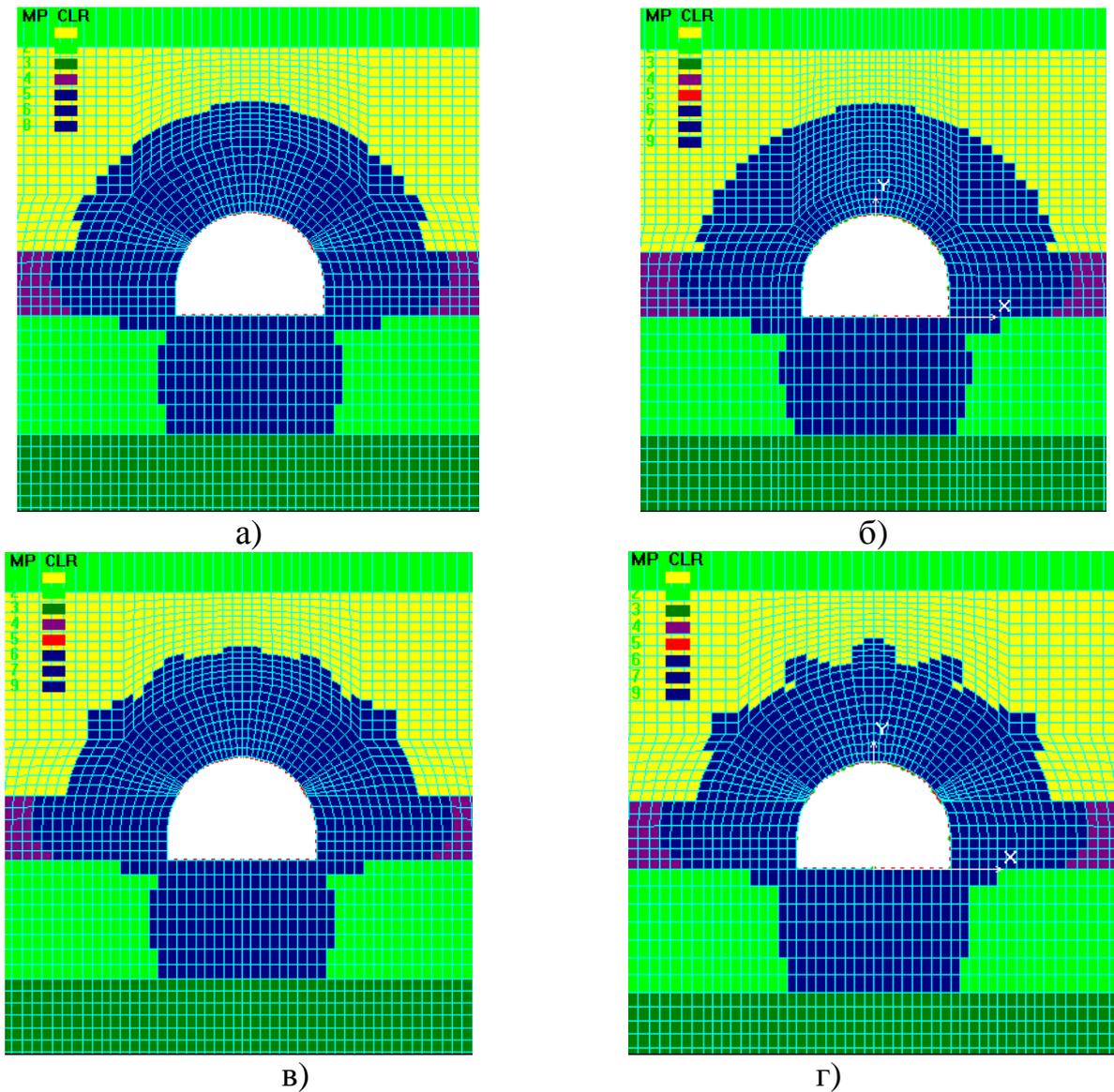


Рис. 3. Зона разрыхления в выработке при различной глубине анкеров

Анализ НДС приконтурного массива вокруг выработки с анкерной крепью показывает, что при ее проведении в неоднородном породном массиве и установке анкерной крепи с параметрами: плотность анкерования $0,8...1,2$ анк/м², длина анкеров $2,2...2,5$ м, также весьма значительно снижается уровень напряжений и перемещений на своде выработки, что приводит к повышению ее устойчивости [8].

4. Компьютерное моделирование процесса обрушения сложноструктурной кровли в лавах пологопадающих пластов.

Процесс обрушения основной кровли в лаве сопровождается рядом специфических проявлений горного давления, которые затрудняют работу механизмов, снижают темпы проходки и безопасность ведения очистных работ. Поэтому возникает задача прогнозирования момента обрушения пород основной кровли.

Изменение НДС породного массива при очистной выемке связано с непрерывным перераспределением концентрации напряжений, которое вызвано постоянным подвиганием очистного забоя, т.е. увеличением размеров обнажения.

Для определения изменений НДС пород рассмотрена последовательность

расчетных схем, имитирующих подвигание очистного забоя. Нагрузка на контуре области задавалась с учетом коэффициента пригрузки k_σ . Решение задачи по МКЭ заключалось в выполнении последовательности расчетов (этапов), на каждом из которых моделировалась полость различных размеров (рис. 4).

В произвольной точке исследуемого массива угроза разрушения материала определяется на основе точечного критерия прочности, имеющего вид (2). Область массива, внутри которой выполняется условие (2), считается разрушенной. Однако обрушение пород кровли может произойти только в том случае, если выполняется интегральное условие прочности, определяющее целостность всей системы «выработка-породный массив», имеющее вид [9]

$$a = \frac{10R_c k_c^p h \sin \alpha}{\gamma h - 10R_c k_c^p}, \quad (3)$$

где k_c^p – коэффициент структурного ослабления при растяжении ($k_c^p = 0,1 k_c$); h – высота пород основной кровли, м; α – угла наклона боковых линий аппроксимированной параболы свода обрушения кровли к горизонту. Параметр a в выражении (3) имеет смысл шага обрушения пород кровли.

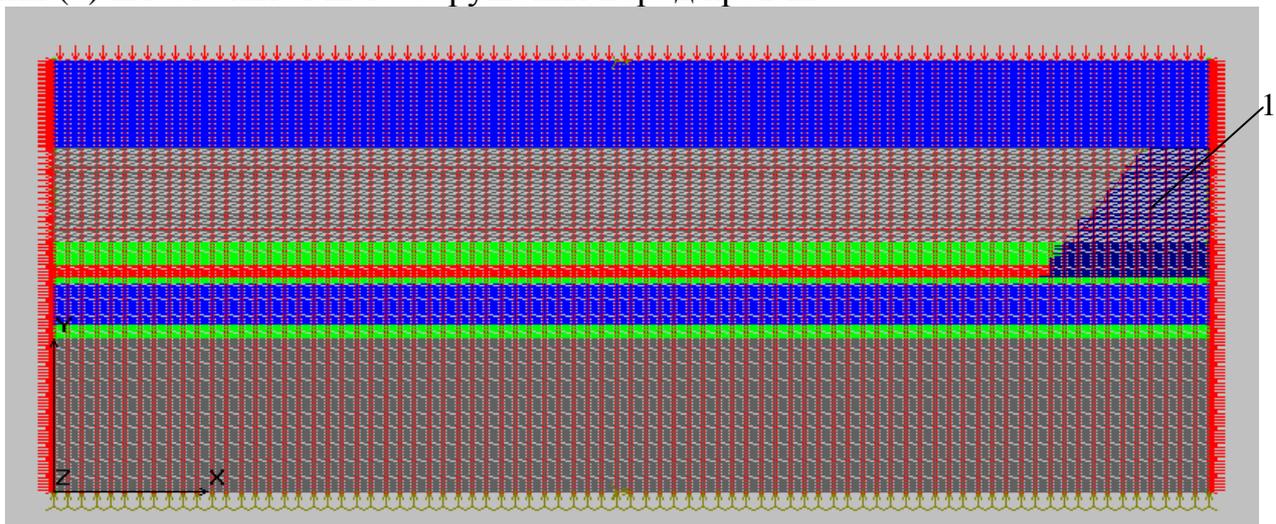


Рис. 4. Первоначальная компьютерная модель породного массива для изучения параметров установившегося шага обрушения, аппроксимированная треугольными элементами (1 – зона обрушенных пород)

Смыкание области, внутри которой выполняется точечное условие прочности (2), с границами области, определенной в соответствии с интегральным условием (3), служит признаком потери равновесия, т.е. обрушения пород кровли.

Определив в каждой точке массива значения эквивалентных напряжений и связанные с ними значения запаса прочности, можно оценить размеры и местоположение условных зон разрушения для сравнительного анализа изменений, которые произошли в массиве на каждом этапе подвигания очистного забоя.

Качественная картина размера и местоположения условной зоны разрушения при генеральном обрушении представлена на рис. 5, в при $l_g=110$ м. Линия 1 ограничивает область, в пределах которой выполняется точечный критерий прочности (2), а линия 2 ограничивает поверхность, на которой величина растягивающих

нормальных напряжений превосходит предел прочности на растяжение, т.е. выполняется интегральный критерий прочности (3). В предельном состоянии обе эти линии практически совпадают и образуют криволинейный свод обрушения.

5. Оценка устойчивости выработок, пройденных в сложноструктурном

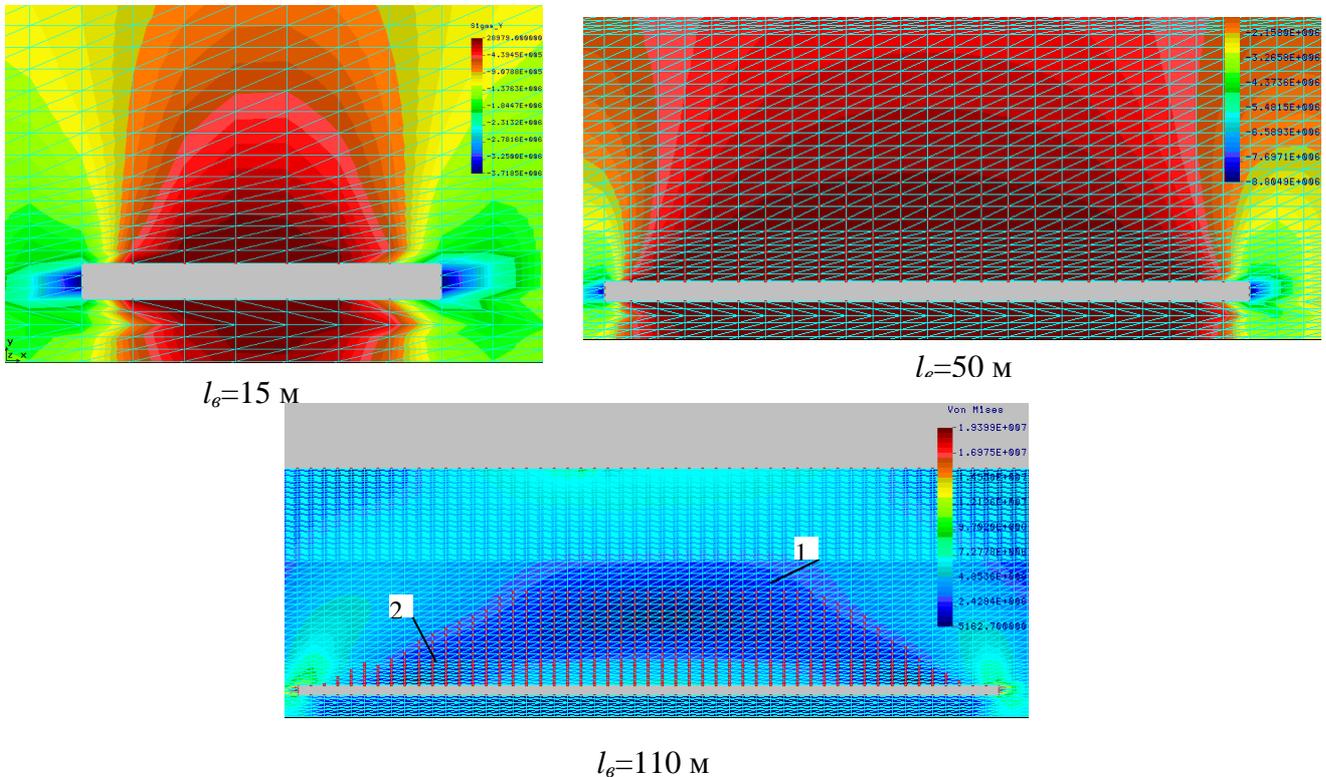


Рис. 5. Качественные картины условных зон разрушения кровли угольного пласта, представленные куполообразной формой, размеры которой по мере увеличения выработанного пространства растут, и при $l_e = 15$ м, 50 м охватывают постепенно непосредственную кровлю, а при $l_e = 110$ м – всю основную кровлю.

породном массиве.

При сооружении южного полевого штрека гор. 1315 м шахты «Родина» ОАО «Криворожский железорудный комбинат» была применена методика оценки устойчивости, включающая компьютерное моделирование условий заложения выработки. Суть методики заключается в следующем:

- анализу подвергаются имеющиеся данные о горно-геологических условиях по трассе проводимой (или проектируемой) выработки;
- на основе этого анализа выбираются некоторые характерные участки трассы, в пределах которых наблюдаются особенности массива, которые могут повлиять на устойчивость выработки, например, геологические нарушения, пересечение границы контакта пород с различными физико-механическими параметрами, участки локального ослабления пород в массиве (повышенная трещиноватость, обводненность и т.п.) и др.;
- для выбранных участков на ЭВМ решается упругопластическая задача о НДС массива в окрестности выработки, расположенных на заданной глубине при заданных условиях;

– по результатам расчета определяются условия эксплуатации выработки (размеры и конфигурация зоны неупругих деформаций, распределение напряжений в окрестности выработки) и оценивается ее устойчивость по критерию, учитывающему возможность вспучивания [10]:

$$K_y = \frac{r_L^*}{r_L} = 1, \quad (4)$$

где r_L – радиус зоны неупругих деформаций, отнесенный к радиусу выработки.

Если критерий (4) меньше единицы, то в выработке ожидается вспучивание пород почвы и состояние выработки в целом неустойчивое, т.е. в данных условиях при данной крепи эксплуатировать выработку нецелесообразно.

В ходе компьютерной оценки устойчивости южного полевого штрека были получены размеры и форма ЗНД вокруг выработки для четырех выделенных участков на которых ожидалась и наблюдалась различная устойчивость штрека.

Из рисунка 6 видно, что во всех случаях параметры зоны неупругих деформаций различны, что и обуславливает различную устойчивость выработки на этих участках: показатель K_y принимает значения от 0,87 (для ситуации на рис. 6, а) до 2,03 (для ситуации на рис. 6, б). Вполне очевидно, что характер и величина смещения пород в пределах ЗНД на указанных участках будет различной и тем большей, чем больше размеры этой зоны нарушенных пород.

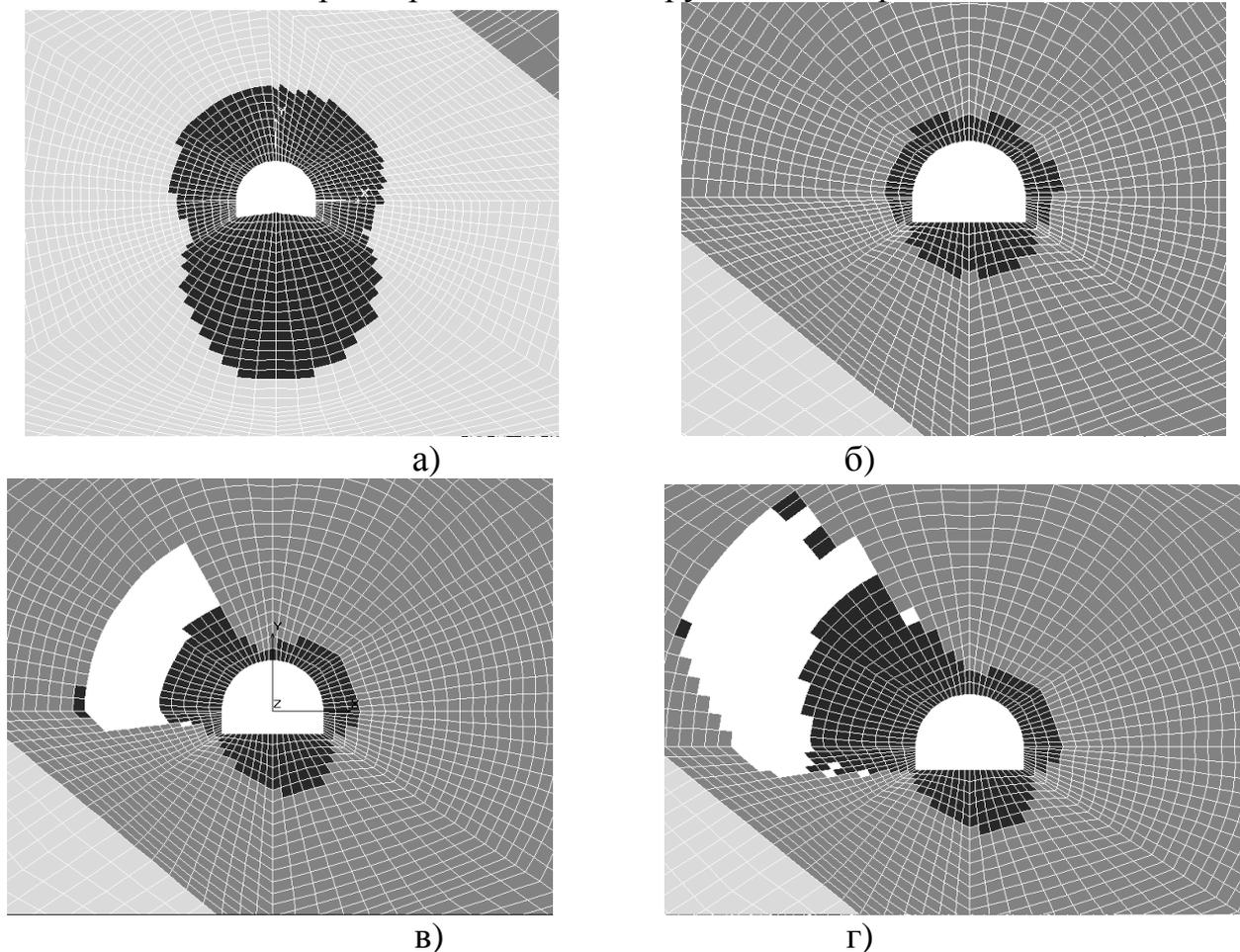


Рис. 6. Расчетные конфигурации зон неупругих деформаций (темный цвет) в окрестности выработки на различных участках трассы

Конфигурация зон разрыхления (рис. 6) свидетельствует: в таких условиях будет иметь место несимметричная нагрузка на крепь, что может и наверняка приведет к концентрации напряжений в ее элементах. Следовательно, в этом случае необходимо проводить проверочный расчет крепи на устойчивость с учетом характера формирования нагрузки, перейдя от величин смещений к величинам действующей на крепь нагрузки.

6. Состояние породного массива в окрестности протяженной выработки в условиях вывалообразования.

Полость вывала породы оказывает дополнительное влияние на состояние породного массива, и как следствие, на устойчивость выработки, находящейся в подобных условиях. Задача исследований в этом случае заключается в определении уровней напряжений, деформаций и величин перемещений на контуре такой выработки, оценить ее устойчивость и влияющие факторы.

При решении задачи с применением МКЭ рассматривается ситуация, когда выработка арочной формы закреплена крепью, обладающей отпором P_0 . При этом породы в ближней окрестности контура обнажения подвержены объемному разрыхлению (дилатансии), т.е. являются упругопластической средой. Считается, что область породного массива переходит в разрыхленное состояние в том случае, когда для материала внутри нее выполняется условие (2). Размеры полости вывала могут варьироваться, тогда, как ее положение относительно вертикальной оси выработки определяется трещиноватостью и остается постоянным.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что увеличение размера зоны разрыхления в кровле выработки не влияет на размер зоны в почве, а, следовательно, и на величину поднятия пород почвы, но существенным образом снижает НДС приконтурного массива.

Увеличивается размер зоны пластических деформаций (разрыхления) (рис. 7, 8). При увеличении размера вывала происходит образование в верхней части купола зоны неразрушенных пород и изменение характера распределения напряжений.

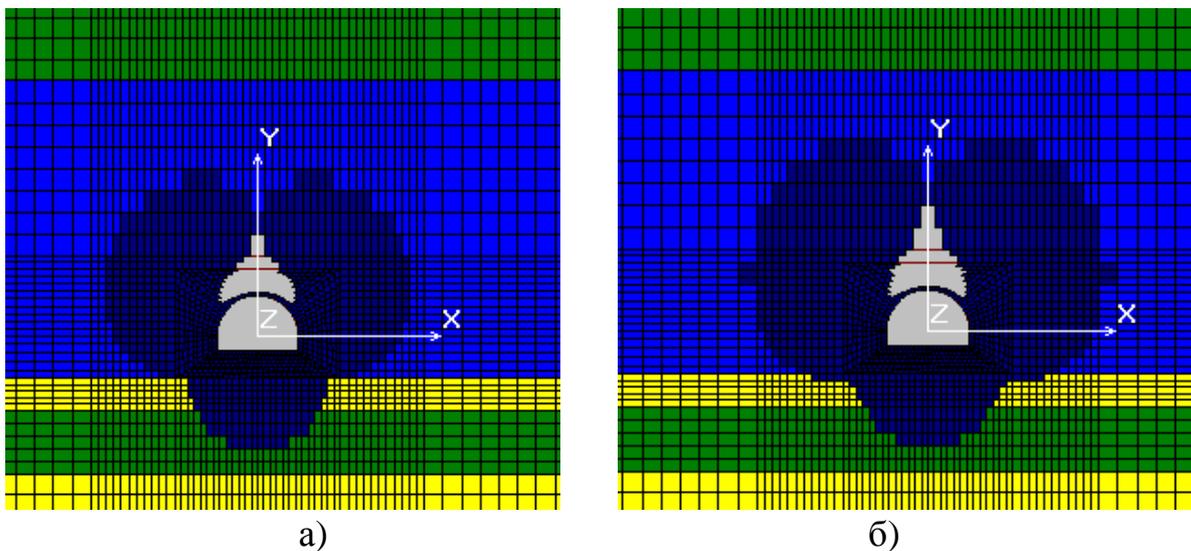


Рис. 7. Зона разрыхления для одиночной выработки с вывалом на высоту R_0 от контура (а), $2R_0$ от контура (б)

С увеличением размера обрушения кровле от 0,5 до 9 м максимальный размер зоны неупругих деформаций увеличивается в 2,14 раза. При этом количество разрушенных элементов в почве выработки остается неизменным или изменяется незначительно. При этом смещения пород на контуре превышают в 1,8 раза максимальные смещения пород при расчете напряженно-деформированного состояния выработки при отсутствии вывала.

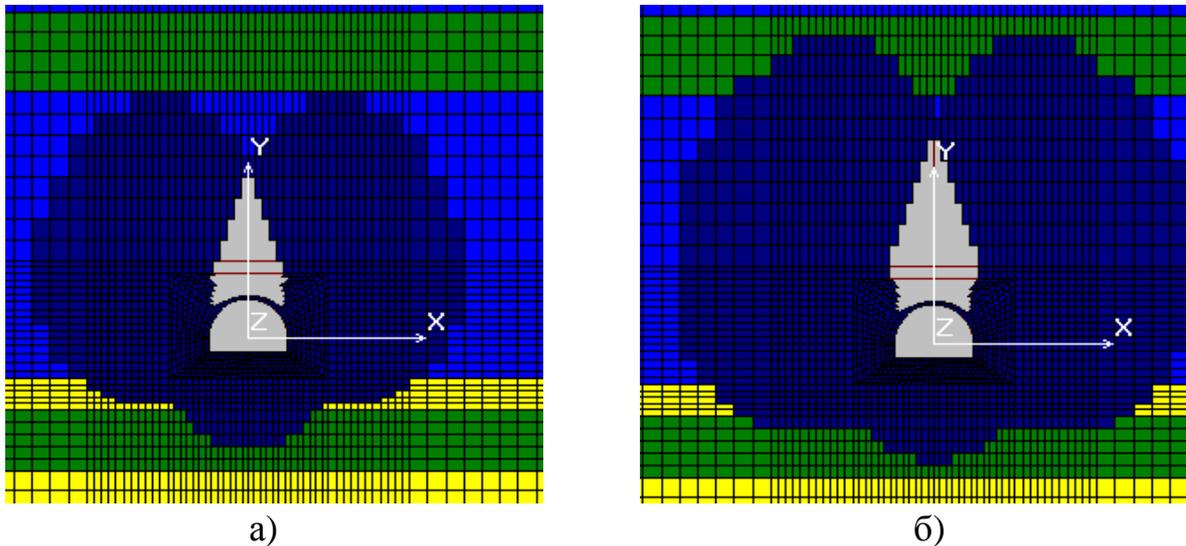


Рис. 8. Зона разрыхления для одиночной выработки с вывалом на высоту $3R_0$ от контура (а) и $4R_0$ от контура (б)

7. Оценка НДС породного массива в окрестности протяженной выработки, пересекающей геологическое нарушение

Состояние протяженных выработок существенно ухудшается при пересечении нарушенного породного массива, что делает актуальной задачу прогнозирования устойчивости выработки при пересечении зон геологических нарушений.

К рассмотрению принята упруго-пластическая задача, в качестве метода исследования выбрана конечно-элементная модель.

Для исследований был выбран типичный породный углевмещающий массив с размерами в поперечном сечении 300 x 200 м. Угол наклона дизъюнктива принят равным 40 градусам. Выработка, вокруг которой исследуется устойчивость породного массива, проходит горизонтально, примерно, посередине по отношению к вертикали исследуемого массива. Высота и ширина выработки составляют 3 м.

Для реализации численной модели десятиметровая зона влияния вокруг дизъюнктива была разбита на 20 одинаковых по ширине частей, каждая из которой имела собственные физико-механические характеристики пород. В частности, прочность породного массива на одноосное сжатие корректировалась варьированием коэффициента структурного ослабления массива, который изменяется по линейному закону в большую сторону по мере отдаления от дизъюнктива. Изменение модуля упругости имела ту же тенденцию, а коэффициент Пуассона – противоположную. Разбиение на относительно большое количество областей с разными физико-механическими свойствами обусловлено стремлением свести к минимуму влияние дискретности. Выработка моделируется вырезом прямоугольной формы, длина которого увеличивается по мере продвижения забоя (рис. 9).

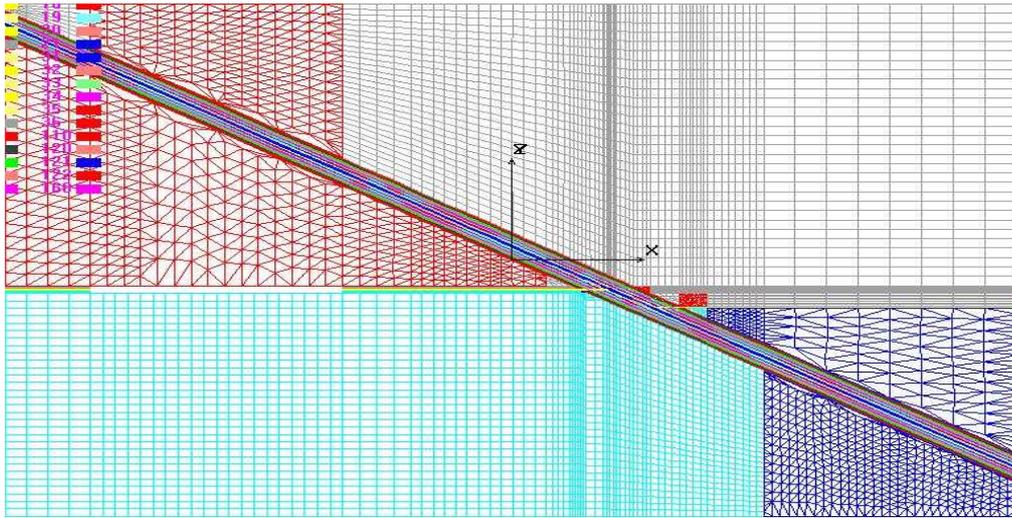


Рис. 9. Расчетная конечно-элементная схема к решению задачи

В процессе расчета в каждом элементе определялись компоненты напряжений и перемещений. Для установления зоны неупругих деформаций определялась величина эквивалентных напряжений и сравнивалась с пределом прочности массива в конкретном конечном элементе. Элементы, в которых соотношение (2) не выполнялось, считались разрушенными.

На рис. 10 показан рост ЗНД вокруг выработки по мере приближения ее забоя к геологическому нарушению и при его пересечении.

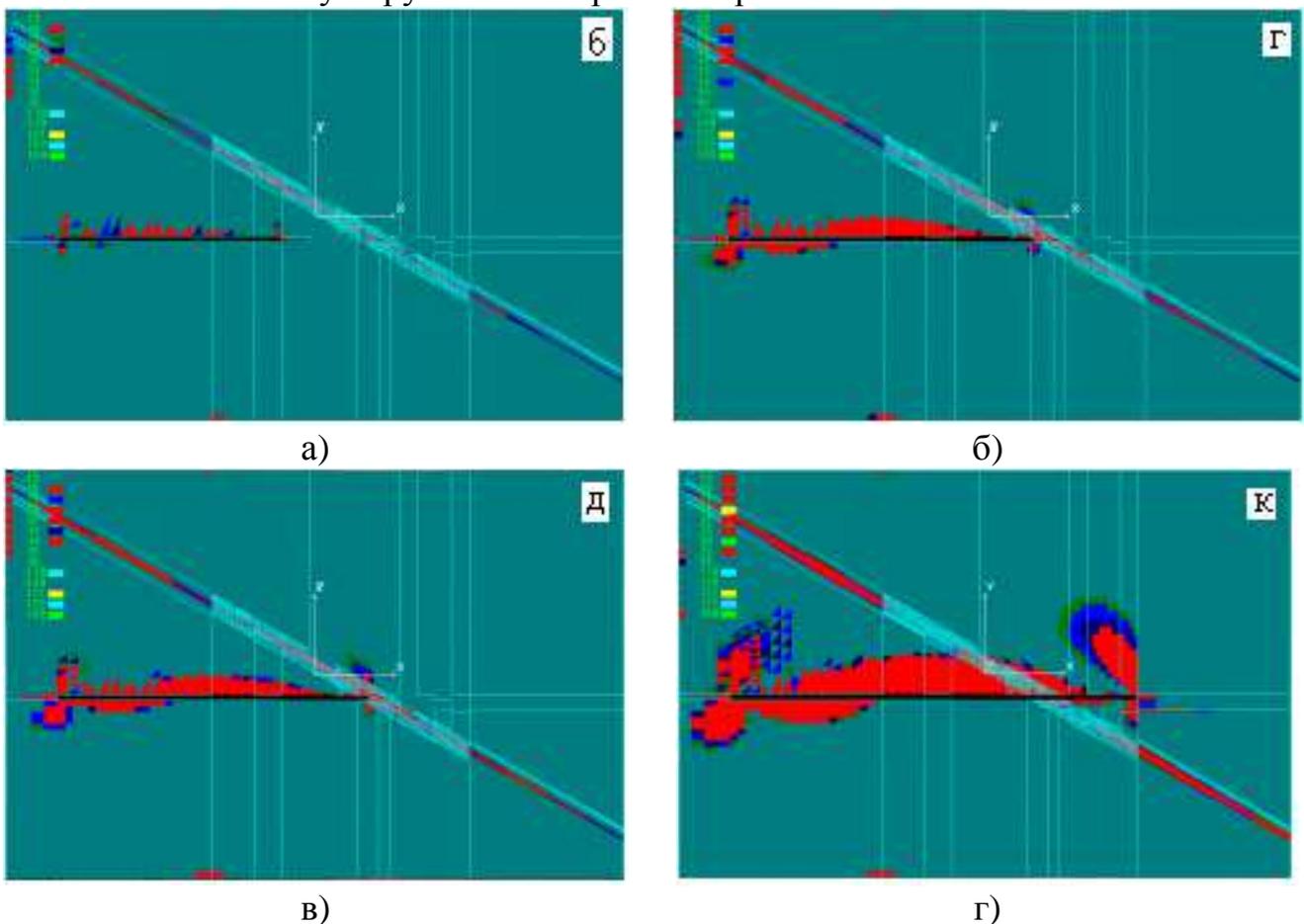


Рис. 10. Изменение зоны неупругих деформаций по мере приближения забоя выработки к геологическому нарушению

Это позволяет количественно оценить соответствующее снижение устойчивости выработки в рассматриваемых условиях.

Таким образом, предлагаемый метод исследования НДС породного массива в окрестности выработок при пересечении ими геологических нарушений дизъюнктивного типа позволяет, в первом приближении, решить поставленную задачу прогнозирования устойчивости и оценки эффективности возможных мероприятий по повышению устойчивости выработок.

Выводы. Приложение численных методов к решению задач геомеханики существенно расширяет условия, в которых становится возможным исследование НДС породного массива, оценка устойчивости системы «выработка-породный массив». Применение соответствующих алгоритмов и подходов позволяет приблизить условия в модели к реальным условиям, изначально учесть влияющие факторы, смоделировать развитие того или иного геомеханического явления, открывая тем самым перед исследователем новые горизонты познания.

Библиографический список

1. **Гавриш А.К.** Геомеханическое обоснование способа управления напряженным состоянием пород вокруг выработок камерного типа. Дис...канд. техн. наук: 05.15.04. – Днепропетровск, 2004. – 195 с.
2. **Ишлинский А.Ю.** Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости // Украинский математический журнал.– 1954.– т.6.– № 2.– С.140-146.
3. **Лейбензон Л.С.** О применении гармонических функций к вопросу об устойчивости сферической и цилиндрической оболочек // Собр. тр.– М., 1951, т.1.– С.50-85.
4. **Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А.** Некоторые задачи статистической геомеханики.– К.: Универ. изд-во «Пульсари», 2002.– 304 с.
5. **Заславский Ю.З.** Исследование проявлений горного давления в капитальных горных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна.– М.: Недра, 1966.– 180с.
6. **Фадеев А.Б.** Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 236 с.
7. **Шашенко А.Н., Майхерчик Т., Сдвижкова О.О.** Геомеханические процессы в породных массивах.- Днепропетровск: НГУ, 2005.- 319 с.
8. **Терещук Р.Н.** Обоснование параметров анкерной крепи капитальных наклонных выработок в условиях шахт ГХК «Добропольеуголь»: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04.– Днепропетровск, 2002.– 162 с.
9. **Хозяйкина Н.В.** Закономірності зміни граничного напруженого стану у складно структурній покрівлі лав положистих вугільних пластів: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.15.09 / НГУ: Дніпропетровськ, 2004.– 17 с.
10. **Шашенко А.Н., Пустовойтенко В.П.** Механика горных пород: Учебник для ВУ-Зов.– К.: Новий Друк, 2004.– 400 с.