

*д.т.н. Литвинский Г.Г.,
к.т.н. Фесенко Э.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ПО РАСЧЁТУ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ВЫРАБОТКАХ

*Проведено аналіз застосування сучасних обчислювальних комплексів на прикладі програми **Phase 2** для вирішення задач в області геомеханіки, сформульовано вимоги до програмного забезпечення для проведення досліджень проявів гірського тиску.*

***Ключові слова:** гірський тиск, розрахунок, гірнича виробка, гірська порода, комп'ютерні програми, геомеханічні процеси.*

*Проведен анализ использования современных вычислительных комплексов на примере программы **Phase 2** для решения задач в области геомеханики, сформулированы требования к программному обеспечению для проведения исследований проявлений горного давления.*

***Ключевые слова:** горное давление, расчёт, горная выработка, горная порода, компьютерные программы, геомеханические процессы.*

Технический прогресс во многих отраслях промышленности неразрывно связан с широким применением вычислительной техники. В настоящее время ведутся интенсивные исследования и разработки различных пакетов прикладных программ для определения параметров геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород при ведении горных работ (напряжённо-деформированное состояние массива, смещение и разрушение отдельных областей массива, влияние горноинженерных воздействий на состояние массива, развитие процессов разрушения пород вокруг выработки во времени, взаимодействие крепи с разрушенными породами и ее влияние на напряженное состояние и смещения пород и т.д.). Ключевым условием решения подобных задач является широкое применение вычислительной техники и современных программных комплексов, которые позволяют выполнить постановку весьма сложных плоских и объёмных задач горного давления путём использования метода конечных элементов, новых теорий прочности и совершенных алгоритмов.

Однако существующие программные разработки наталкиваются на значительные сложности, что обусловлено вероятностным и мало-

достоверным характером исходных данных, необходимости учёта сложного иерархического и неоднородного строения массива, технологическими особенностями сооружения и эксплуатации горных разработок и их вариациями во времени и пространстве и т.д.

Попытки использовать существующие пакеты прикладных программ, предназначенных для расчёта строительных конструкций, для подземных объектов оказывались, как правило, неудачными [1, 2]. Это объясняется особенностями поведения горного массива и его взаимодействия с инженерными конструкциями, которые, как правило, не учитываются в таких программных продуктах. Особенно рельефно это проявляется при рассмотрении задачи о взаимодействии массива горных пород с искусственными подземными горными конструкциями, в первую очередь, с крепью горных выработок.

Отметим принципиальные отличия расчётов горной крепи от расчётных схем строительных конструкций:

- горная крепь всегда взаимодействует с массивом горных пород весьма сложным образом, т.к. крепь воспринимает активное нагружение со стороны массива и, деформируясь, передаёт часть усилий на окружающие породы массива, создавая «пассивный» отпор пород на той части периметра, который смещается в сторону массива;

- активная нагрузка на подземную конструкции формируется двояким образом: путём силового на одних участках крепи и деформационного на других при взаимодействии крепи и массива, что обусловлено деформационно-силовыми параметрами крепи, причём, чем более податлива крепь, тем меньше на неё действует нагрузка,

- распределение нагрузки по периметру крепи отличается высокой неравномерностью и зависит от многих случайных факторов, и заметно варьируется от распределения напряжений в массиве пород, их неоднородности и анизотропии, работоспособности крепи, технологии проведения и крепления горной выработки и др.;

- крепь только на начальной стадии своей работы с массивом ведёт себя как упругая конструкция, а при дальнейшем нагружении переходит в запредельную стадию, когда последовательно один за другим образуются участки разрушения, условно названные «пластическими» шарнирами, как правило, со сложной нелинейной зависимостью между деформациями и силовыми параметрами (моментом, продольными и поперечными усилиями);

- даже при появлении разрушенных участков, распорные конструкции крепи, находясь в окружающем массиве, постепенно деформируются и не теряют окончательно своей несущей способности, меняя особенности своего взаимодействия с массивом пород, т.е. в процессе нагружения меняют свою расчётную схему.

Эти и целый ряд других особенностей работы крепи с массивом чрезвычайно усложняют расчёты конструкции и заставляют использовать во многом упрощённые гипотезы, идеализации и методы. Так, в существующих расчётных методах используется, главным образом, эмпирический подход, реализованный в действующих нормативных документах [4 – 7 и др.]. Основным достоинством такого подхода является предельная простота и доступность использования, отсутствие требований по проведению инструментальных инженерных изысканий для определения свойств и исходного напряжённо-деформированного состояния горного массива. При проведении расчётов горного давления здесь достаточно знать лишь прочность горных пород на одноосное сжатие и глубину заложения выработки. Таким образом, существующие расчёты отличаются минимальной потребностью в исходных данных, низким уровнем требований к квалификации проектировщика, т.е. вполне соответствует уровню науки начала XX в.

Однако такие методики нередко приводят к появлению грубых, иногда и фатальных ошибок при проектировании, которые заканчиваются разрушением горных выработок и даже трагическими случаями травматизма горняков. Переход на большие глубины освоения подземного пространства и ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях вскрыл несостоятельность существующих подходов и поставил задачу их кардинального изменения.

Поэтому при проектировании и строительстве подземных горных объектов различного назначения необходим переход к более надёжным и обоснованным методам расчёта горного давления и различных конструкций горных крепей с целью обоснованного выбора их параметров. Для решения этой задачи необходимо установить основные закономерности, которым подчиняются процессы деформирования и разрушения пород в окрестности горной выработки с учетом особенностей совместной работы массива и крепи, строения и свойств вмещающих пород и материала крепи. Кроме того, следует перейти от статической картины равновесия пород над выработкой к исследованию развития горного давления вокруг выработки во времени, т.е. изучению направленности процессов разрушения и деформирования пород вокруг подземного объекта.

В настоящее время известно несколько программных продуктов, с помощью которых можно производить расчеты конструкций различного назначения (ПК «Ли́ра» [2, 8], Solid Works [1] и др.). Однако в своем большинстве эти программы предназначены для расчетов обычных строительных конструкций (ПК «Ли́ра») или машиностроения (Solid Works) и не адаптированы к особенностям расчета горного давления и подземных конструкций крепей. Здесь отметим программу канадских

разработчиков – расчетный комплекс *Phase 2* [3]. *Phase 2*, предназначенную для решения плоских упругопластических задач в области горной геомеханики и геотехнических объектов различного назначения. В основу программы положен метод конечных элементов. *Phase 2* позволяет рассчитывать состояние массива (напряжения и деформации) в окрестности подземных объектов.

Рассмотрим особенности использования программы *Phase 2*, менее знакомой отечественным специалистам, для расчёта напряжений и смещений пород вокруг горных выработок.

Как обычно, перед началом решения задачи составляют расчётную геометрическую схему. Для этого задают геометрию выработки – координаты характерных точек контура, углы, ширина, высота, закругления, затем вводят размеры исследуемой модели (автоматически или вручную) и производят (в ручном режиме или автоматически) разбивку модели на конечные элементы. Исходное напряжённое состояние массива задают путем введения главных компонент напряжений σ_1 , σ_3 , σ_z , а также угла между напряжением σ_1 и осью X. Далее вводят свойства различных слоев модели (массива) и крепи (если она установлена в выработке). Каждому материалу слоя массива пород присваивают свой модуль упругости (Юнга), коэффициент Пуассона, критерий прочности (Кулона-Мора, Хоека-Брауна, Друкера-Прагера и др.), когезию разрыва, прочность на одноосное растяжение, угол внутреннего трения, тип поведения слоя (упругий или пластический). Как видим, для выполнения расчетов требуется довольно обширный набор исходных данных, что далеко не всегда находится в распоряжении наших проектировщиков и производителей, что существенно снижает достоверность расчётов.

После формирования расчетной схемы и задания граничных условий и свойств материалов производят компьютерный расчёт и анализ результатов.

Дадим пример решения задачи по определению напряженного состояния пород в окрестности горной выработки сводчатого сечения. Задаём в массиве исходное поле напряжений: главное максимальное напряжение $\sigma_1 = 20$ МПа действует под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонтальной оси, главное минимальное напряжение принимаем $\sigma_3 = 10$ МПа. На рисунке 1 показаны расчётная схема и распределение главных напряжений, а на рисунке 2 отражены графики запаса прочности в массиве пород и на контуре выработки (рис. 2).

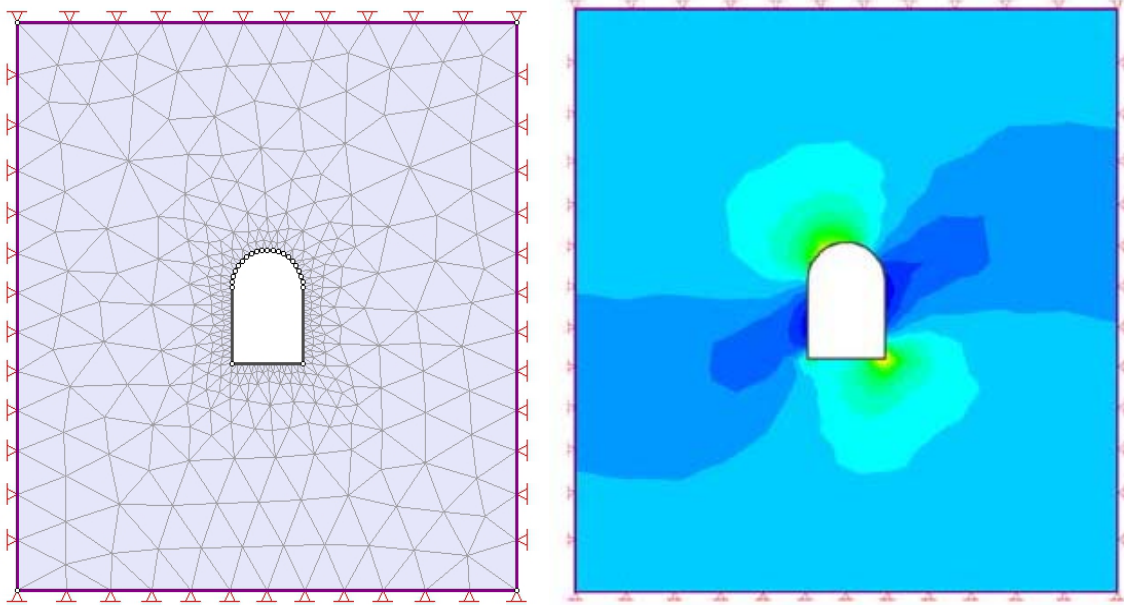


Рисунок 1 – Расчётная схема и распределение напряжений в окрестности сводчатой горной выработки

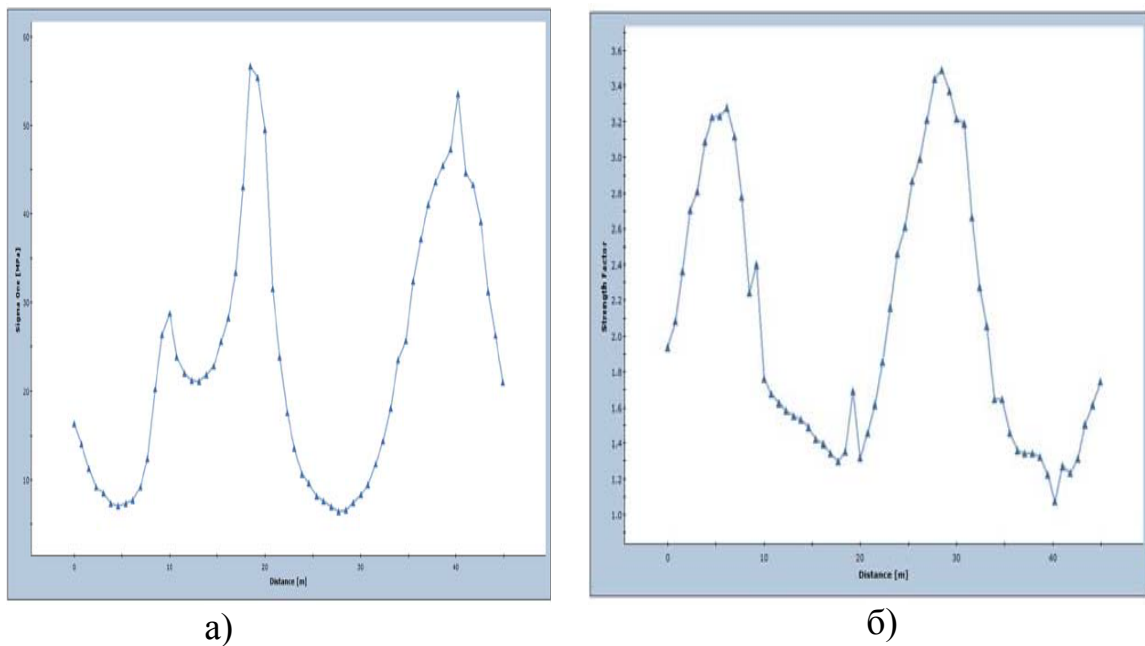


Рисунок 2 – Распределение главных напряжений (а) и критерия прочности пород (б) по контуру выработки

Кроме напряжений в программе можно рассчитать деформации массива и смещения контура выработки (рис. 3). Необходимо учитывать, что для наглядности отображения результатов масштаб перемещений завышен.

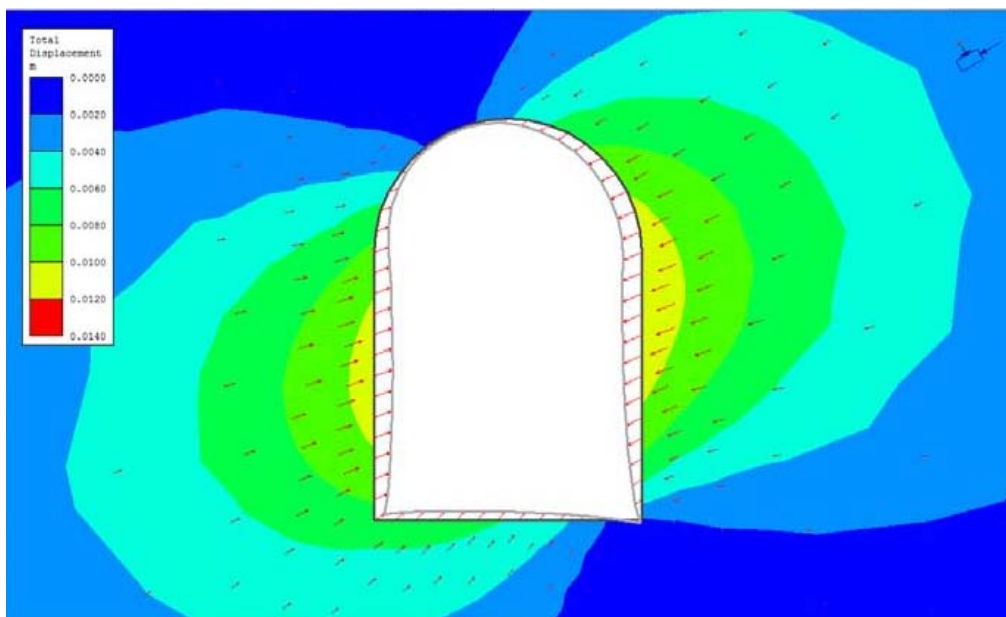


Рисунок 3 – Итоговые смещения массива и контура горной выработки с ориентацией направлений смещений

Одной из важных особенностей программы *Phase 2* является возможность постадийного расчета напряжений при последовательном подвигании забоя выработок, движении лавы и т.п. Рассчитывая очередную стадию, программа учитывает предысторию, т.е. результаты решения задачи на предыдущей стадии. На рисунке 4 показан пример решения задачи о распределении напряжений вокруг очистной камерной выработки при последовательной выемке пород.

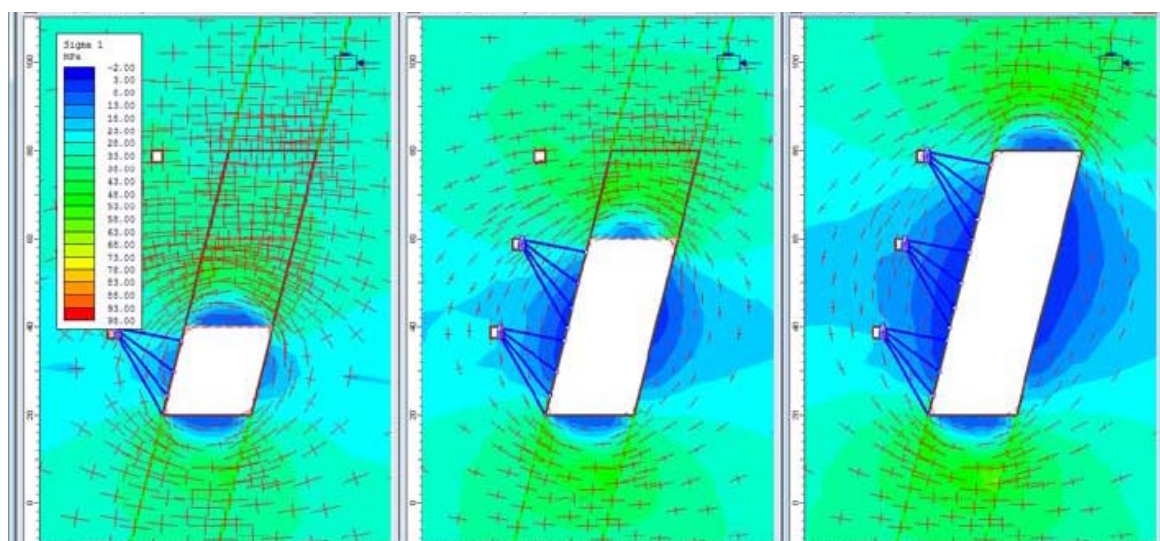


Рисунок 4 – Распределение главных напряжений вокруг очистной выработки при постадийной выемке пород

Рассчитываемая с помощью программы **Phase 2** выработка может иметь крепь различных конструкций (анкерная, железобетонная, металлическая). При задании параметров крепи используют встроенную библиотеку данных. Так, на рисунке 5 показано диалоговое окно задания параметров армирования железобетонной крепи, а на рисунке 6 – распределение напряжений вокруг тоннеля, закрепленного железобетонной крепью. Случай использования анкерной крепи показан на рисунке 4, когда применялись анкера замкового типа, хотя программа позволяет выбирать и другие типы анкеров и задавать их параметры.

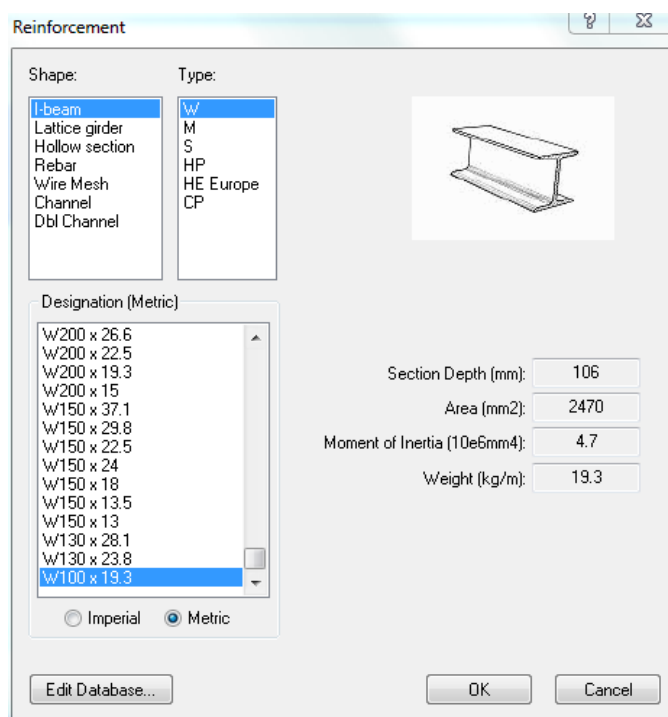


Рисунок 5 – Диалоговое окно выбора параметров жесткого армирования железобетонной крепи

В зависимости от типа крепи диалоговое окно для задания её параметров автоматически изменяется, давая возможность пользователю задавать характеристики, присущие именно данной конструкции крепи (диаметр анкера, максимальное усилие на разрыв – для анкерной крепи; толщина, модули упругости бетона и арматуры, сечение арматуры и другие показатели – для железобетонной крепи).

К достоинствам программы **Phase 2** можно отнести простой и интуитивно понятный интерфейс; возможность получения результатов путём несложных построений расчётных схем и задания свойств массива пород и параметров крепей; моделирования слоистости; наглядного отображения результатов решения задач в виде зон распределения на-

пряжений и деформаций, представленных различными цветами (рис. 1, 3, 4, 6) или в виде графиков (рис. 2); экспорта результатов решения задачи в другие программы (Microsoft Excel и т.д.).

В целом данную программу можно рекомендовать для использования в учебном процессе при подготовке горных инженеров различных специализаций.

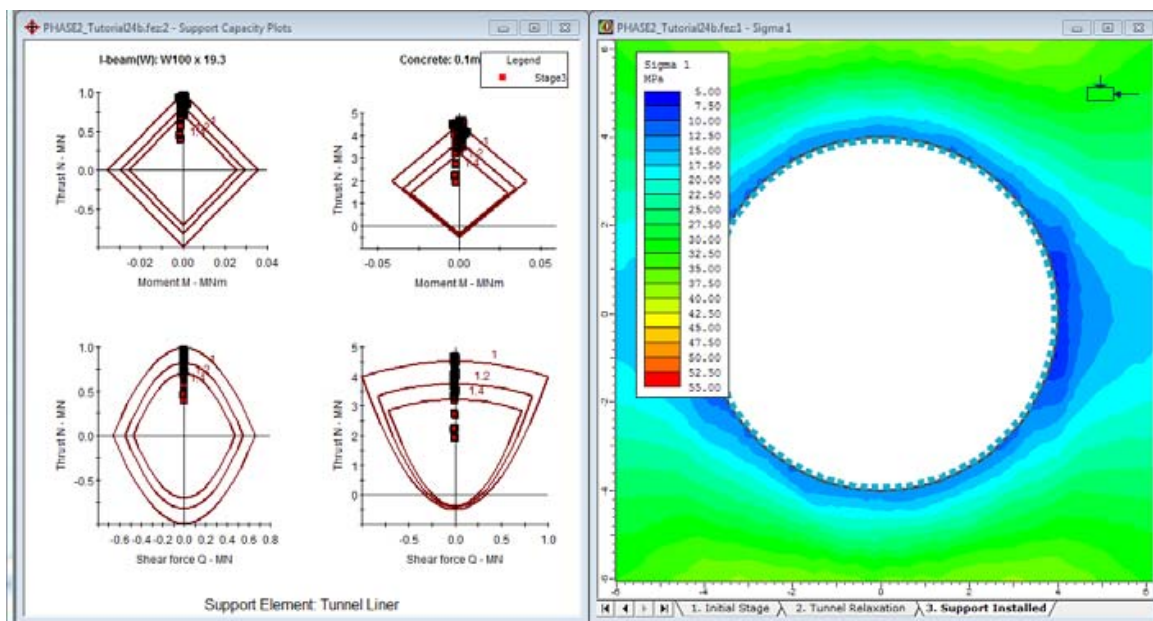


Рисунок 6 – Результат решения задачи о распределении главных напряжений вокруг тоннеля, закрепленного железобетонной крепью

Однако наряду с несомненными достоинствами программы **Phase 2** необходимо отметить и присущие ей недостатки:

1. Невозможность построения объемных расчетных схем и решения объемных задач (3D моделирование).

2. Программа решает задачи лишь в упругой постановке. Несмотря на то, что разработчики декларируют возможность решения упруго-пластических задач, расчетные смещения контура выработки оказываются порядка нескольких миллиметров даже при выборе типа материала – пластический. Расчет реальных смещений пород и определение напряжений при нарушении сплошности пород при образовании зон предельных деформаций (ЗЗД) невозможно.

3. При определении зон разрушений пород вокруг выработок, а также смещений пород применён некорректный метод упругого наложения, для слоёв пород используются ограниченное число и критериев прочности (Кулона-Мора, Хоека-Брауна, Друкера-Прагера и др.), которые не всегда точно и правильно описывают происходящие в массиве

процессы. Программа не допускает возможности введения новых теорий прочности, критериев и т.д.

4. Основной упор в программе сделан на визуальном отображении результатов решения задач в виде цветных зон распределения полей напряжений или деформаций (рис. 1, 3, 4, 6). Представление результатов в виде графиков данных явно недостаточно, поскольку нет возможности построения других графиков, вывода и обработки численных массивов данных, перехода в другие координатные оси, выбора необходимых для конкретных задач факторов и параметров (тангенциальные, радиальные напряжения, деформации под определенным углом к координатным осям и т.п.).

5. Ограничены возможности учёта деформационно-силовых характеристик крепи, их режима работы, моделирования специфических элементов крепей, - узлов податливости с различными параметрами, податливых и комбинированных конструкций крепей, которые отсутствуют в стандартном наборе программы *Phase 2* и т.д.

Указанные недостатки рассмотренного программного продукта присутствуют и в других вычислительных программах, что значительно ограничивает их применение для реальных расчётов и реального проектирования. Поэтому нельзя считать достигнутый уровень программного обеспечения проектирования горного давления и конструкций крепи достаточным.

Сформулируем требования к программам для расчётов геомеханических процессов вокруг подземных выработок, в частности, для прогноза проявлений горного давления и выбора параметров крепи:

1. Корректное решение хотя бы пошаговыми методами последовательного приближения упругопластических задач, а также задач, относящихся к таким проявлениям горного давления, как образование вывалов, сводов естественного равновесия, ЗНД, запредельного поведения пород и материала крепи.

2. Моделирование поведения «особых» элементов крепи и её конструкции в целом – замки податливости, шарниры, блоки, расклинка и пр., анкерные крепи не только в упругом, но и предельном состоянии, пластические шарниры, потеря местной и общей устойчивости и т.п.

3. Расчёт совместной взаимовлияющей работы крепи и массива, нагружение крепи не только активными (заданными) нагрузками, но и заданными деформациями с учётом пассивного отпора пород в упругой, предельной и запредельной стадиях деформирования с учётом физической и геометрической нелинейности.

4. Исследование развития горного давления вокруг выработки во времени, т.е. постадийное решение задач с возможностью учета предыстории решения предыдущей стадии, особенностей формирования во

времени и пространстве нагрузок на крепь, смещения массива и породного контура.

5. Учёт особенностей залегания и состояния породных слоёв в окрестности горной выработки (слоистость, трещиноватость, угол падения, наличие поверхностей ослабления и т.д.).

6. Удобное представление результатов расчётов и их передачи в виде массивов данных в другие программы (MathCad, Excel) для последующей их обработки.

Выводы.

1. Анализ показал, что существующие программные продукты не решают проблему расчёта и проектирования геомеханических объектов, в первую очередь проявлений горного давления в подземных выработках.

2. Наиболее современная программа *Phase 2* может быть рекомендована для учебного процесса горных вузов, хотя в реальной проектной практике её использование ограничено.

3. Сформулированные требования к компьютерному расчёту проявлений горного давления могут быть положены в основу для разработки новых программ и оценки их эффективности.

4. Задачей дальнейших исследований следует считать разработку нового поколения компьютерных программ, учитывающих важные нелинейные эффекты проявлений горного давления в выработках и особенности взаимодействия массива с крепью.

Библиографический список

1. <http://www.solidworks.com>.
2. <http://www.lira.com.ua>.
3. <http://www.roscience.com>.
4. СНиП II-94-80. *Подземные горные выработки. Нормы проектирования.* – М.: Стройиздат, 1982. – 30 с.
5. *Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР.* – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
6. *Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР.* – Л.: ВНИМИ, 1986. – 222 с.
7. *Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок.* – Санкт-Петербург: ВНИМИ, 1991. – 125 с.
8. Литвинский Г.Г. *Расчет крепи горных выработок на ЭВМ: учебн. пособ. / Литвинский Г.Г., Фесенко Э.В., Емец Е.В.* – Алчевск: ДонГТУ, 2011. – 174 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Фрумкиным Р.А..