

УДК 622.831.

## **К ВОПРОСУ ВЫБОРА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ**

*М.н.с. КУРДЮМОВ Д.Н., к.т.н. НЕГРЕЙ С.Г., асп. МОКРИЕНКО В.Н., студ. Кривцов А.В. ДонНТУ, г. Донецк, Украина*

**Проблема и ее связь с практическими задачами.** Дальнейшая разработка угольных месторождений полезных ископаемых в условиях увеличения глубин ведения горных работ связана с проблемой обеспечения эксплуатационного состояния выемочных выработок. В связи с этим находят распространение схемы отработки выемочных участков с поддержанием подготовительных выработок вслед за очистным забоем, при этом большое внимания уделяется разработке эффективных способов и средств охраны подготовительных выработок. Считается, что существуют зависимости между устойчивостью подготовительных выработок и рядом факторов, основным из которых является уровень напряженности боковых пород [1, 2].

Поэтому разработка новых технологических решений по охране и поддержанию подготовительных выработок направлена на нейтрализацию этого основного фактора, т.е. на уменьшение концентрации напряжений в окружающих выработку породах.

Изучение проявлений горного давления традиционно базируется в основном на анализе результатов шахтных наблюдений и физическом моделировании. Методы шахтных натуральных измерений позволяют получить достаточно надежные решения, которые справедливы только для конкретных горно-геологических условий проведения экспериментов. Методы физического моделирования дают возможность расширить диапазон этих условий, но со значительной степенью схематизации объектов изучения. Этим недостатком могут быть лишены аналитические методы, которые позволяют получить решения с наибольшей степенью общности и в широких диапазонах изменения условий. Основным условием их применения является адекватность натуре используемых в определенной мере идеализированных схем– математических моделей исследуемых объектов и процессов, в которых они участвуют.

К настоящему времени существует множество методов аналитических исследований, а также разработано достаточное количество программных комплексов для их реализации, при этом каждый из них имеет свою ограниченную область применения.

В связи с этим **целью** статьи является выбор наиболее приемлемого метода аналитического моделирования, который позволит с наибольшей степенью общности и в широких диапазонах изменения условий получить информацию о распределении напряжений вокруг выработки при

проектировании различных способов охраны, а также выбор программного комплекса для реализации принятого метода.

**Основная часть.** В настоящее время получили широкое распространение численные методы, в которые входят: метод конечных разностей, метод дискретного элемента, метод граничных элементов, метод конечных элементов и др.

Сущность метода *конечных разностей* состоит в следующем: область непрерывного изменения аргументов, заменяется дискретным множеством точек (узлов), которое называется сеткой или решёткой. Вместо функции непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определённые в узлах сетки и называемые сеточными функциями. Производные, входящие в дифференциальное уравнение и граничные условия, заменяются разностными производными, при этом краевая задача для дифференциального уравнения заменяется системой линейных или нелинейных алгебраических уравнений [3]. Методы конечных разностей можно приложить к любой системе дифференциальных уравнений, но учет граничных условий задачи очень часто является громоздкой и трудно программируемой операцией. Точность полученного численного решения полностью зависит от степени измельчения сетки, определяющей узловые точки, и, следовательно, в процессе решения задачи всегда приходится иметь дело с системами алгебраических уравнений очень высокого порядка

*Метод дискретного элемента* – метод для расчёта движения большого числа частиц, таких как молекулы или песчинки. Этот метод может быть использован для моделирования частиц с не сферической поверхностью [4]. В основу метода положено то, что материал состоит из отдельных, дискретных частиц. Эти частицы могут иметь различные поверхности и свойства (жидкости и растворы, сыпучие вещества, такие как разрушенная горная порода; гранулированный материал, такой как песок и пр.). Моделирование начинается с помещения всех частиц в конкретное положение и придания им начальной скорости. Затем силы, воздействующие на каждую частицу, рассчитываются, исходя из начальных данных и соответствующих физических законов. Все эти силы складываются, чтобы найти результирующую силу, воздействующую на каждую частицу. Преимущества: возможность моделирования и последующего анализа практически любого материала. Недостаток: метод дискретного элемента требуют интенсивной работы процессора ЭВМ; это ограничивает протяжённость модели или количество частиц. [5].

*Метод граничных элементов*, в основу которого положено решение граничных интегральных уравнений относительно значений искомых величин, не заданных граничными условиями [6]. Для решения граница исследуемой области разбивается на граничные элементы и требуется решение уравнения в узловых точках элементов. В результате получается система линейных алгебраических уравнений относительно значений поверхностных напряжений и перемещений в узлах. Недостатком данного

метода является отсутствие программно-вычислительных комплексов, в которых он был бы реализован.

*Метод конечных элементов (МКЭ)* в настоящее время занял лидирующее положение благодаря возможности моделировать широкий круг объектов и явлений. В основе метода МКЭ лежит дискретизация (разбивка на более мелкие, обособленные, но взаимосвязанные между собой) объекта с целью решения уравнений механики сплошной среды в предположении, что эти соотношения выполняются в пределах каждой из элементарных областей. Эти области называются конечными элементами. Они могут соответствовать реальной части пространства, как, например, пространственные элементы или же быть математической абстракцией, как элементы стержней, балок, пластин или оболочек.

В пределах конечного элемента назначаются свойства, ограничиваемого им участка объекта (это могут быть, например, характеристики жесткости и прочности материала, плотность и т. д.) и описываются поля интересующих величин (применительно к механике это перемещения, деформации, напряжения и т. д.). Параметры из второй группы назначаются в узлах элемента, а затем вводятся интерполирующие функции, посредством которых соответствующие значения можно вычислить в любой точке внутри элемента или на его границе. Задача математического описания элемента сводится к тому, чтобы связать действующие в узлах факторы. В механике сплошной среды это, как правило, перемещения и усилия [7].

Преимуществом метода конечных элементов является возможность учитывать в расчетах разнообразные и сложные свойства материалов, возможность сведения задачи к системе линейных или нелинейных алгебраических уравнений непосредственно, без предварительной формулировки их дифференциальных аналогов. Основные процедуры МКЭ стандартны и не зависят от размерности и типа используемых конечных элементов, что позволяет осуществить унификацию этих процедур и создавать программные комплексы по расчету конструкций широкого класса и назначения.

Метод конечных элементов в сочетании с ЭВМ допускает использование моделей материалов практически любой степени сложности, поэтому необходимо выбрать программные комплексы позволяющие изучать различные физические процессы в окружающих выработку породах.

В настоящее время существует большое количество систем автоматизации инженерных расчетов и анализа базирующихся на методе конечных элементов: Nastran, Abaqus, T-FLEXCAE, Deform, Plaxis, Qform, LS-DYNA, ANSYS, SolidWorks, и др. Наиболее распространёнными являются два последних программных комплекса.

ANSYS - это пакет прочностного и теплового анализа, позволяющий выполнять большинство линейных и нелинейных задач конечно-элементного анализа, включающий функции: прочностного анализа, решения контактных задач; динамического анализа неустановившихся процессов; устойчивости

конструкций; механики разрушений в линейных и нелинейных задачах для изделий из композиционных и армированных материалов, включая температурные воздействия. Недостатком применения данного программного пакета для анализа процессов происходящих вокруг выработки является сложность построения моделей [8].

Система автоматизации проектных работ (САПР) SolidWorks приобрела популярность благодаря простому интерфейсу пользователя. Функциональные возможности системы SolidWorks выгодно отличаются от ближайших конкурентов гибридностью параметрического моделирования, (2D и 3D -эскизы, твердые тела), возможностью автоматизации проектирования деталей и сборок. В приложении COSMOSXpress: возможно определение напряжений, деформаций, расчет коэффициента запаса прочности и других физических величин.

Нередки случаи, когда важно знать эволюцию процесса деформирования (или разрушения) пород вмещающих выработку с продолжающимся во времени внешним воздействием. При этом естественны большие геометрические и физические нелинейности, такого рода задачи вполне под силу программному комплексу Solidworks [9].

Также в последнее время все больше внимания уделяется системе Plaxis, которая представляет собой специализированную двухмерную или трехмерную компьютерную программу, основанную на методе конечных элементов, которая используется для расчетов деформации и устойчивости различных геотехнических объектов. Эта программа имеет удобный графический интерфейс, который дает возможность выполнять высококачественные геотехнические расчеты: фундаментов, подпорных стен, свай, устойчивости откосов, прокладки тоннелей и др. [10,11].

Все вышеупомянутые программные пакеты требуют ввод исходных данных (параметров модели), при которых результаты моделирования будут согласовываться с экспериментальными и определение которых в большинстве случаев представляет некоторую сложность, так как предварительно необходимо выполнить испытания моделируемого материала. Также в процессе моделирования проводится проверка на сходимость результатов численного моделирования с результатами расчетов известными апробированными методами или экспериментальными данными [12, 13].

**Выводы.** Таким образом, на основе анализа литературных источников установлено, что наиболее приемлемый метод аналитического моделирования, позволяющий с наибольшей степенью общности и в широких диапазонах изменения условий получить информацию о распределении напряжений вокруг выработки при проектировании различных способов охраны, является метод конечных элементов, который реализован во множестве программных комплексов, однако наиболее приемлемыми являются комплексы ANSYS, Solidworks и Plaxis, что подтверждается результатами ряда исследований, в том числе проведенными

сотрудниками ДонНТУ при решении пространственных задач для дискретных сред.

### Библиографический список

1. Технология, механизация и организация проведения горных выработок / Б.В. Бокий, Е.А. Зими́на, В.В. Смирняков, О.В. Тимофеев. Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1983.– 264с.
2. Медяник В.Ю. Обоснование параметров способа охраны подготовительных выработок при комбинированной системе разработки пологих пластов на больших глубинах: Дис. ... канд. техн. наук. – Д.: НГУ, 2005. – 193 с.
3. Рыжков А.В. Никулин Л.А. “Решение бигармонического уравнения методом Зейделя”. Воронеж, 1997
4. Сачков В.Н. Введение в комбинаторные методы дискретной математики.- Наука; 2004. -385 с: ил
5. Колесников Г. Н., Раковская М. И. Об одном варианте метода дискретных элементов. -сб.: Материалы XV Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2007). М.: Вузовская книга, 2007.
6. А.П. Господариков Л.А.Беспалов применение метода граничных элементов при расчете параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности выработок различного очертания. Записки Горного института; Стр. 217-220; С.-Петербург, 2009.
7. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред: Пер. с англ. — М.: Мир, 1976.
8. ANSYS - Simulation Driven Product Development.: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
9. 3D CAD Design Software SolidWorks.: [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)
10. PLAXIS Программный комплекс конечно-элементных расчетов геотехнических объектов.: [www.plaxis.ru](http://www.plaxis.ru)
11. И.Ивахов. Plaxis- геотехнические расчеты / CADmaster, 2002, №1.- С.58-60.
12. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Негрей С.Г. Моделирование структурно-неоднородных массивов горных пород с применением метода конечных элементов / Науковий вісник Національного гірничого університету.– Дніпропетровськ.– №7.– 2008.– С. 49-52.
13. Касьян Н.Н., Негрей С.Г., Александров С.Н., Мокриенко В.Н., Курдюмов Д.Н. Обоснование возможности применения метода конечных элементов при расчете напряженно-деформированного состояния дискретизированных пород / Вісті Донецького гірничого інституту. Донецьк, 2010, №2, С. 138-144.