УДК 004.9:622.831

Е.С. Корнев, Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Широкое распространение современной высокопроизводительной вычислительной техники существенно изменило процесс инженерной деятельности. Появление на рынке программного обеспечения систем автоматизированного проектирования (CAD) и систем автоматизации инженерных расчётов, анализа и моделирования физических процессов (CAE) позволяет ускорять процессы проектирования и исследования различных конструкций и сооружений. Использование методов вычислений, реализованных в комплексах CAD, дает возможность проводить исследования различных характеристик проектируемых объектов, что позволяет изменять их конструкцию без создания экспериментальных образцов и не прибегать к длительной и дорогостоящей процедуре натурных исследований [2].

Среди средств обеспечения исследований важное место занимают программные комплексы, основанные на использовании метода конечных элементов (МКЭ), которые позволяют проводить имитационное моделирование работы конструкции на основе описания ее геометрии, физики моделируемых процессов, свойств применяемых материалов, эксплуатационных характеристик и иных указываемых пользователем исходных и начальных данных. Среди комплексов программ конечно-элементного анализа можно указать такие продукты, как ANSYS, MSC/NASTRAN, COSMOSWorks, SAMCEF, ABAQUS, FEMAP и другие [1, 2, с. 5-7].

Программные комплексы, основанные на использовании метода конечных элементов, подразделяются на две основные группы:

1. Программы конечно-элементного анализа (COSMOSWorks, DesignSpace, MSC/InCheck и другие), встраиваемые на уровне меню в известные пакеты CAD и располагающие необходимым инструментарием для быстрого расчета элементов или сборочных единиц непосредственно в среде их разработки.

2. Программы, ориентированные на подготовку полноценной конечно-элементной модели исследуемого объекта или процессов с максимальными возможностями моделирования, учета особенностей геометрического, силового характера и выполнения различных видов расчетов.

Общим недостатком комплексов программ конечно-элементного анализа является то, что они имеют ограниченный набор возможностей для создания и расчета моделей с усложненными свойствами по функциональным схемам, граничным условиям, нагрузкам, геометрическим особенностям и другие. Это приводит к тому, что построенные в этих средах расчетные модели исследуемого объекта не всегда решают поставленные задачи.

Универсальные конечно-элементные программные комплексы широко применяются в смежных областях науки и техники. Однако механическое использование этих комплексов для определения объемного напряженно-деформированного состояния (НДС) углепородного массива при подземной разработке пластов не обеспечивает потребности горной практики, так как решение, как правило, выполняется для однородного изотропного материала, без учёта структуры горного массива, механических свойств породных слоев, наличия сложных горнотехнических объектов. Во многих расчетных схемах не учитывается сложная геометрия угольного пласта, вмещающих пород горных выработок, игнорируются зоны обрушенных горных пород, не рассматривается воздействие пород кровли на почву выработанного пространства.

Перспективным направлением адаптации МКЭ к конкретным условиям горного производства для оптимального моделирования геомеханических процессов и обеспечения промышленной безопасности в процессе разработки угольного месторождения является решение трёхмерной задачи, а также учета блочного строения и естественного неравномерного напряженного состояния массива горных пород.

Таким образом, несмотря на многообразие программных комплексов, основанных на использовании МКЭ, актуальной научно практической задачей является разработка алгоритма и специализированного комплекса проблемно-ориентированных программ, адаптированного для решения трехмерных задач горной геомеханики МКЭ в упругой и нелинейной постановке с учетом структуры массива горных пород, механических свойств породных слоев и наличия горнотехнических объектов, положение которых изменяется во времени и пространстве.

Комплекс проблемно-ориентированных программ (MGP program complex) разработан в виде проекта, содержащего программы, созданные с использованием Microsoft Fortran Power Station 4.0 и Borland Delphi 7 и функционирующие под управлением среды разработки для поддержки

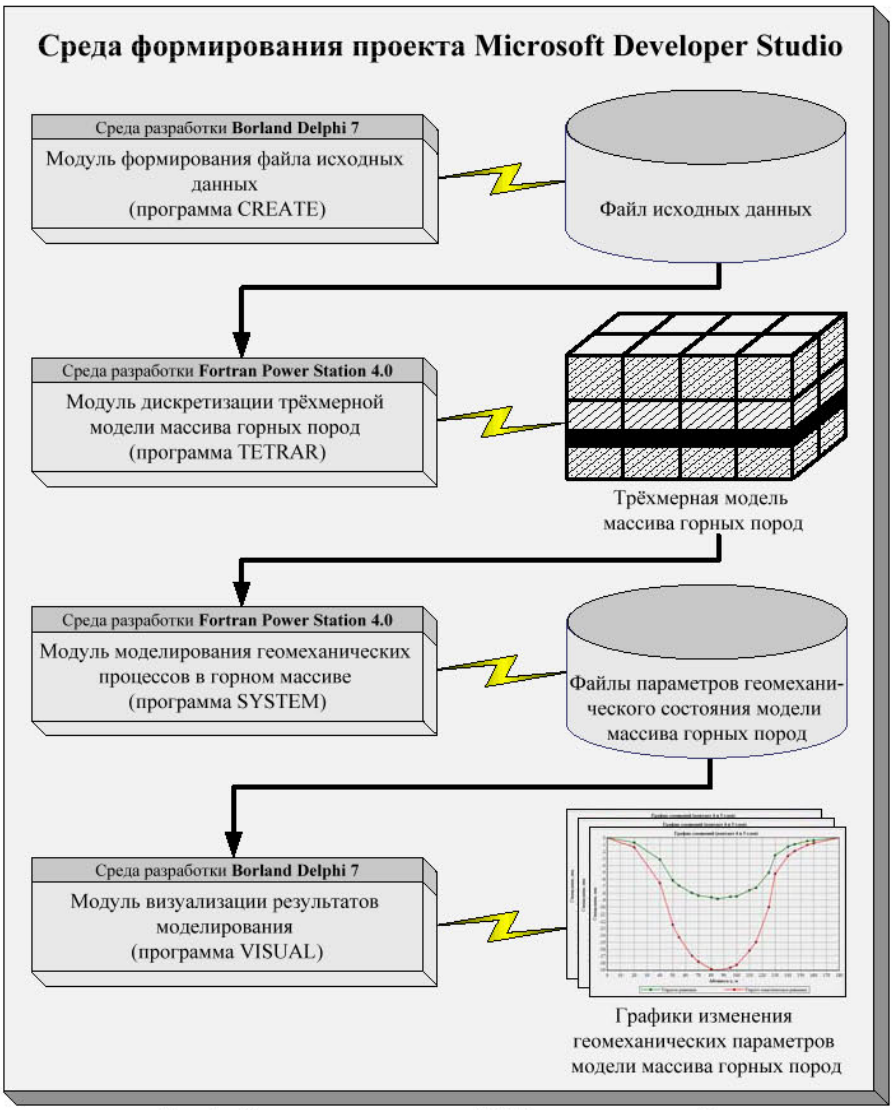

Рис.1. Структура проекта MGP program complex

больших программных проектов Microsoft Developer Studio (рис.1).

Каждая программа проекта предназначается для выполнения определенного этапа работы:

Create – формирует файл исходных данных;

Tetrar – осуществляет трехмерную дискретизацию геомеханической модели массива горных пород на конечные элементы;

System – реализует необходимые вычисления с использованием стандартных процедур метода конечных элементов;

Visual – осуществляет вывод и визуализацию результатов моделирования.

Первым этапом работы проекта является выполнение программы Create. Программа создана с использованием интерфейса стандартного окна Windows, который позволяет пользователю быстро ориентироваться при работе с программой и легко осуществлять ввод исходных данных в форму (рис.2).

Форма программы включает элементы, предназначенные для ввода данных, пояснительный текст, а так же кнопки, активирующие различные действия программы. Для удобства работы все элементы, размещённые на форме, сгруппированы по категориям.

В результате работы программа осуществляет формирование файла исходных данных путем записи в файл значений величин, введенных в форму.

Вторым этапом работы проекта является выполнение программы Tetrar, которая реализует трехмерную дискретизацию геомеханической модели массива горных пород на конечные элементы.

Массив горных пород является сложной физической средой и обладает рядом структурно-механических особенностей, которые в значительной степени определяют его механическое состояние. Математическое описание подобной среды трудновыполнимо, поэтому при исследовании механических процессов в массиве горных пород рассматривается не собственно породный массив, а некоторое его идеализированное отображение, учитывающее только главные существенные свойства. Это отображение является гео-

механической моделью массива горных пород [3, 4].

Для исследования геомеханических процессов в неоднородном массиве горных пород при отработке угольных пластов камерной системой разработки используется трансверсально-изотропная упруго-вязкая геомеханическая модель среды, в которой массив горных пород идеализируется следующим образом:

– по структурным признакам массив горных пород принимается слоистым с трансверсально-изотропным распределением механических характеристик пород (прочностных, деформационных, реологических), учитываются наклонное расположение слоев, форма и размеры выработок;

– по геометрическим характеристикам массив горных пород, для аппроксимации непрерывной функции перемещения, идеализируется дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе элементов;

– по механическим характеристикам горные породы считаются вязкоупругими: учитываются упругие мгновенные деформации, которые возникают в породах при нагружении в начальный момент, и деформации ползучести, развивающиеся во времени;

– область исследования в пределах массива горных пород считается ограниченной: сверху земной поверхностью, снизу высотой зоны надработки угольного пласта, по простиранию и падению пластов – максимальными размерами горных выработок и зон опорного горного давления;

– на всех ограничивающих поверхностях задаются граничные условия в виде нагрузок или смещений: силовые воздействия, распределенные по всему обьему массива горных пород, рассматриваются как статические нагрузки, прикладываемые на внешних и внутренних границах области исследования.

Метод трехмерной дискретизации основан на том, что область исследования представляется в декартовой системе координат в виде параллелепипеда, разделенного по вертикальной оси параллельными слоями, имитирующими угольные пласты и породные слои с заданными физико-механическими свойствами (рис.3).

На нижнем и верхнем основаниях каждого породного слоя задаются точки разбиения по координатным осям X и Y. Координаты точек разбиения по оси Z при горизонтальном залегании пласта вычисляются в зависимости от мощности породных слоев и глубины разработки. При наклонном залегании угольного пласта по заданным углам наклона в плоскостях XOZ или YOZ определяются угловые коэффициенты уравнения плоскости и вычисляются вертикальные координаты точек разбиения на поверхности каждого слоя.

В пределах нижней и верхней границ породного слоя выделяются призматические элементы, которые разбиваются на тетраэдры по разработанным схемам. Полученные тетраэдры рассматриваются как конечные элементы с узлами, расположенными в вершинах.

При моделировании формы выработки её контур представляется в виде прямоугольника, форма которого определяется координатами его вершин. Координаты вершин прямоугольника указываются последовательно при обходе контура выработки против часовой стрелки, начиная с произвольного угла. Координаты углов выработки должны совпадать с координатами точек разбиения исходной области исследования на конечные элементы. Для конечных элементов внутри выработанного пространства задаются нулевые значения модуля деформации и модуля сдвига.

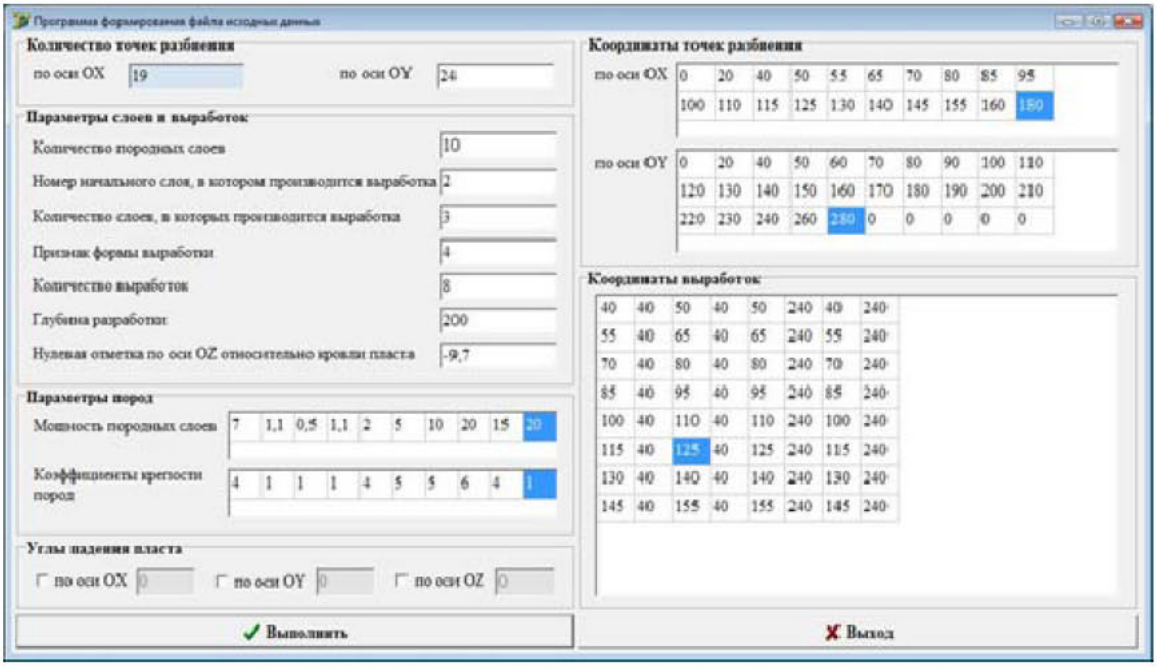

Рис.2. Пример ввода исходных данных в окне программы Create

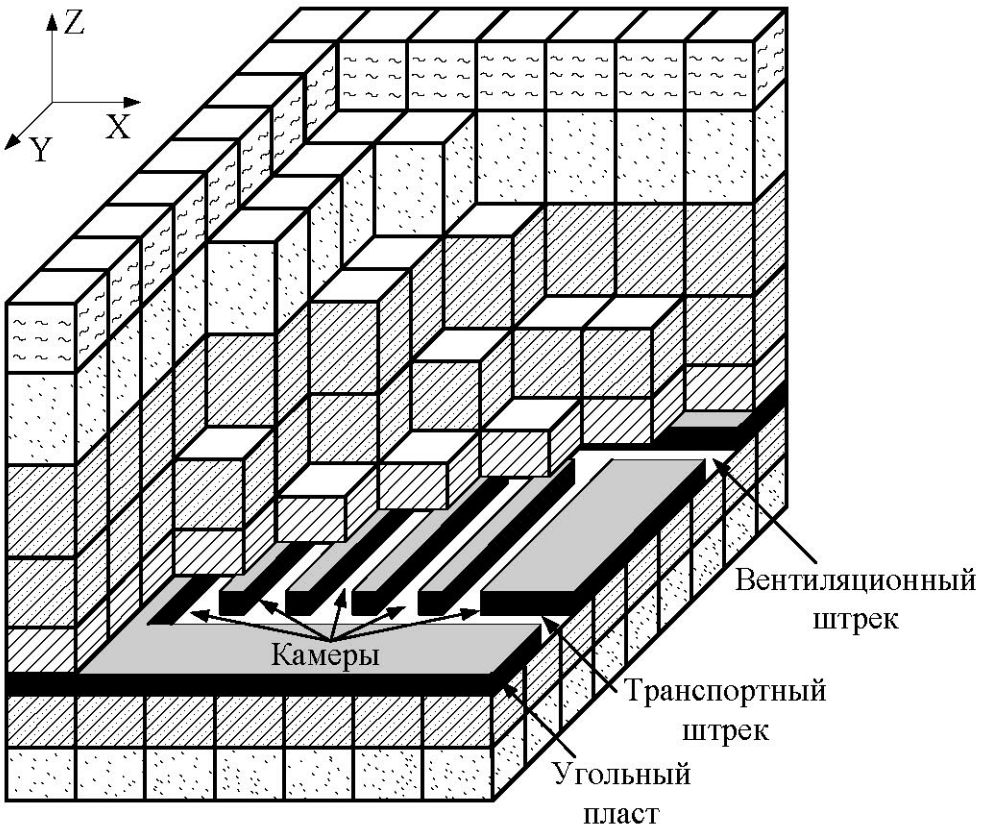

Рис.3. Дискретизация области исследования в декартовой системе координат

Высота выработки принимается равной высоте слоя, в котором расположен угольный пласт. При моделировании угольного пласта большой мощности выработка может располагаться в нескольких слоях, последовательно расположенных друг за другом.

Третьим этапом работы проекта является выполнение программы System, которая осуществляет решение упругой и/или упруго-пластической (нелинейной) задачи.

При упругом решении локальные матрицы жесткости конечных элементов вычисляются в зависимости от принадлежности элементов к угольному пласту или породному слою с заданным начальным модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Используя локальные матрицы жесткости конечных элементов, строится глобальная матрица жесткости и решается система уравнений с использованием стандартных процедур метода конечных элементов для определения параметров объемного напряженно-деформированного состояния слоистого массива горных пород.

При нелинейном решении, на основе анализа полученных при упругом решении параметров напряженно-деформированного состояния слоистого горного массива, для каждого элемента вычисляется значение секущего модуля деформации в зависимости от состояния породы в конечном элементе на паспорте прочности породы. Матрицы жесткости конечных элементов модифицируются с учетом деформированного состояния горных пород в зоне влияния системы горных выработок. Используя модифицированные локальные матрицы жесткости, строится глобальная матрица и повторно решается система уравнений для определения перемещений в узлах элементов и параметров напряженно-деформированного состояния слоистого массива горных пород под влиянием горных выработок.

Четвертым этапом работы проекта является выполнение программы Visual. Программа разработана с использованием графического интерфейса, позволяющего получить доступ к объектам и функциям в виде графических компонентов экрана. Применение такого подхода предоставляет пользователю возможность легко и быстро осуществлять вывод результатов вычислений в виде графиков (рис.4).

Форма программы содержит компонент, предназначенный для построения графиков, элементы для ввода данных, независимые переключатели для включения/выключения режимов, зависимые переключатели для выбора единственного значения из множества, пояснительный текст, а так же кнопки, активирующие различные действия программы. Для удобства работы все элементы, размещённые на форме, сгруппированы по категориям.

В результате работы программа осуществляет построение графиков вертикальных смещений, деформаций и напряжений в угольном пласте,

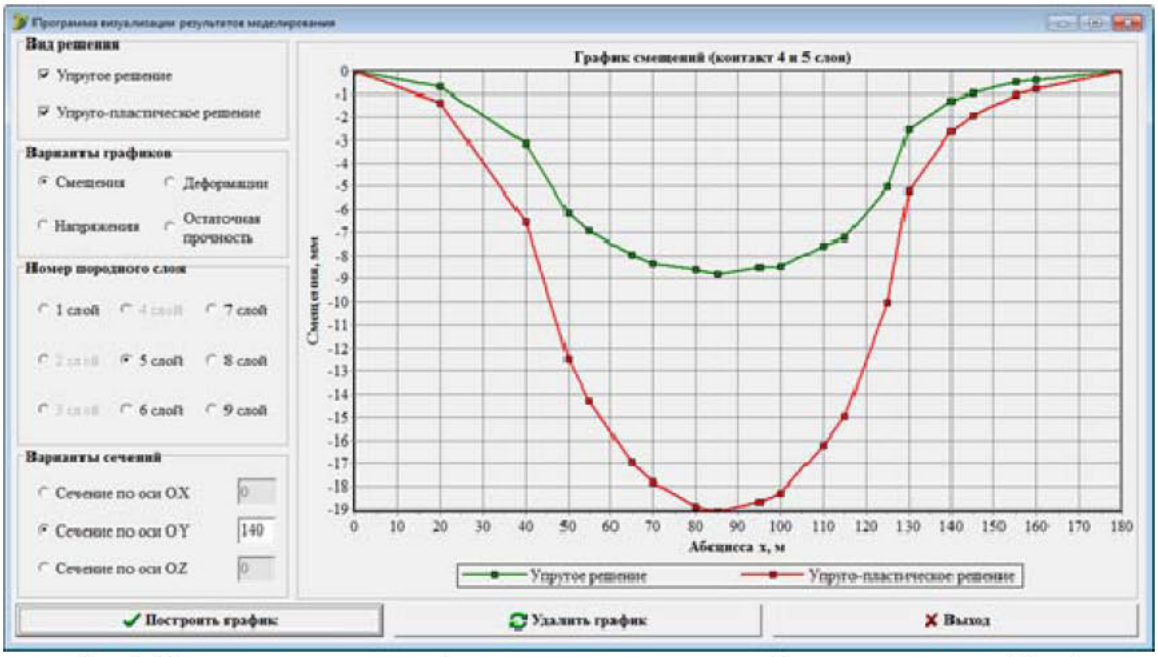

Рис.4. Пример построения графиков вертикальных смещений в окне программы Visual

породах кровли и почвы, а так же остаточной прочности горных пород для упругого и упруго-пластического решения по любому из слоев.

Разработанный комплекс проблемно-ориентированных программ, специально адаптированный для решения трехмерных задач горной геомеханики МКЭ в упругой и нелинейной постановке рекомендуется для:

– моделирования процессов формирования напряжений и деформаций в массиве горных пород при воздействии системы взаимовлияющих подземных выработок с учетом формы и размеров объектов систем разработки угольных пластов;

– моделирования процессов изменения во времени и пространстве прочностных и деформационных свойств пород в зоне влияния очистных и подготовительных выработок при подземной разработке угольных пластов;

– прогнозирования предельных размеров устойчивых целиков различного назначения при подземной разработке угольных пластов;

– прогнозирования устойчивых обнажений пород кровли и почвы подготовительных и очистных выработок угольных шахт;

– установления зависимостей параметров объемного напряжённо-деформированного состояния углепородного массива при подземной разработке угольных пластов в широком диапазоне основных горно-геологических факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алямовский А.А.* SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
2. *Басов К.А.* ANSYS: справочник пользователя. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
3. *Булычёв Н.С.* Механика подземных сооружений. – М. : Недра, 1994. – 382 с.
4. Геомеханика: учеб. пособие / П.В. Егоров Г.Г. Штумпф, А.А. Ренев, Ю.А. Шевелев, И.В. Махраков, В.В. Сидорчук. – Кемерово: КузГТУ, 2002. – 339 с.
5. *Каплун А.Б.* ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
6. *Севастьянов Л.* Вычислительный комплекс Samcef – решение сложных расчетных задач [Электронный ресурс]. URL: http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=6696 (дата обращения: 18.04.2012).
7. *Шимкович Д.Г.* Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. – М. : ДМК Пресс, 2003. – 448 с.

□ **Авторы статьи**

Корнев Евгений Сергеевич, ст. преподаватель каф. прикладной информатики СибГИУ, e-mail: ekornev@yandex.ru

Павлова Лариса Дмитриевна, докт.техн.наук, профессор каф. прикладной информатики СибГИУ, e-mail: lara@rdtc.ru

Фрянов Виктор Николаевич, д.т.н., профессор каф. разработки пластовых месторождений СибГИУ, e-mail: zzz338@rdtc.ru