

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 191 с
2. Ступин А.В., Асланов П.В., Симоненко А.П., Быковская Н.В., Фоменко С.А. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях. // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74 – 81.
3. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий // Ю.Д. Баранов, Б.А. Блосс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин – Д.: «Новая идеология», 2006. – 416 с.
4. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
5. Семененко Е.В. Моделирование изменения гранулометрического состава горной массы при пропитывании жидкостью // Науковий вісник Національної гірничої академії України, 2000, №4. – С. 100 - 103.
6. Николаев Н.И., Нифонтов Ю.А., Блинов П.А. Буровые промывочные жидкости. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2002. – 102 с.
7. Соколов В.Н. Глинистые породы и их свойства // Соросовский Образовательный Журнал. – 2000. – № 9. – С. 59 – 65.

УДК 622.831.312:550.3:622.841

Канд. техн. наук Е.А. Слащева
(ИГТМ НАН Украины)

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВОКРУГ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Робота присвячена експрес-оцінці напружено-деформованого стану породного масиву навколо геотехнічних об'єктів на основі обґрунтування методів, створення алгоритмів і програмно-технічних засобів математичного моделювання з врахуванням зміни електропровідних властивостей реального масиву під дією геомеханічних факторів та водонасичення.

THE EXPRESS-ESTIMATION THE STRESS-STRAINED STATE OF ROCK MASS AROUND THE GEOTECHNICAL INSTALLATION

The work is devoted the express-estimation the stress-strained state of rock mass around the geotechnical installation on the basis the substantiated methods for creation algorithms and program-technical means for mathematical modeling with accounting the changing of the real massif's electrical conductivity under the influence of the geomechanical factors and water saturation.

Устойчивое состояние подземных выработок, обеспечивающее безопасность проведения горных работ и безаварийное выполнение всего технологического цикла добычи полезных ископаемых, определяется соотношением напряжений, действующих в породном массиве, и прочности пород. В общем случае поле напряжений вокруг выработок зависит от совокупного действия многих взаимосвязанных факторов, которые можно подразделить на несколько групп. Первая группа факторов охватывает особенности начального поля напряжений в массиве. Вторую группу составляют пространственно-геометрические параметры рассматриваемых выработок, прежде всего, форма и размеры поперечного сечения, соотношение длины, ширины и высоты выработки, близость соседних параллельных и наличие пересекающихся выработок, естественных аномальных зон и водоносных горизонтов. К третьей группе относятся физико-механические

характеристики пород, которые непосредственно окружают выработку, поскольку именно эта часть массива воспринимает дополнительные нагрузки при их образовании. Наконец, четвертую, динамическую группу факторов, составляют условия воздействия на породы вокруг выработки в процессе ее эксплуатации.

Важным аспектом экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния является обоснование базового метода расчета геомеханической задачи, который должен соответствовать принципу проведения расчета в режиме «реального времени». Традиционная геомеханика делит геомеханические задачи на две группы: предельного состояния и деформационные. В первую группу вошли задачи определения несущей способности подземных выработок, камер, стволов шахт и рудников, устойчивости карьеров, откосов, насыпей, плотин, фундаментов, давления на подпорные стенки. Ко второй группе относят задачи расчета осадок грунтовых оснований под нагрузками от зданий и других сооружений, в том числе с учетом фильтрационной консолидации, контактные задачи взаимодействия сооружений с грунтами, прогноза устойчивости подземных выработок путем сопоставления напряжений с прочностными свойствами пород [1-3].

Для описания поведения геоматериалов при решении краевых задач теории упругости сложно применять классические аналитические методы, а зачастую практически невозможно. Поэтому широко применяют численные методы: метод конечных разностей, вариационно-разностный, методы конечных и граничных элементов. Методы базируются на общих принципах механики сплошных сред и их объединяет необходимость построения дискретных математических моделей рассчитываемых объектов. При этом напряженно-деформированное состояние объектов описывают системой алгебраических уравнений, решение которой дает дискретное множество значений в заранее намеченных точках (узлах) области, однако процесс получения уравнений равновесия каждым методом имеет некоторые различия, что в значительной степени определяет область их применения. При использовании метода конечных разностей сеточные уравнения составляются непосредственно из дифференциальных уравнений заменой производных конечными разностями, но метод не использует вариационных принципов, что может привести к нарушению системы алгебраических уравнений и к дополнительным трудностям при формулировке граничных условий.

В основе вариационно-разностного метода лежит минимизация полной энергии Π системы, под которой понимают разность между энергией деформирования W и работой объемных и поверхностных сил A [4]

$$\Pi = W - A, \quad (1)$$

где в условиях плоской задачи:

$$W = \frac{1}{2} \iint_S (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \varepsilon_{xy}) ds;$$

$$A = \iint_S (X\delta_x + Y\delta_y) ds + \int_l (\bar{X}\delta_x + \bar{Y}\delta_y) dl;$$

$\sigma_x, \varepsilon_x, \sigma_y, \varepsilon_y, \tau_{xy}, \varepsilon_{xy}$ - компоненты тензоров напряжений и деформаций, которые связаны между собой соотношениями:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\}; \quad (2)$$

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{\delta\}; \quad (3)$$

$\{\sigma\}, \{\varepsilon\}, \{\delta\}$ - векторы напряжений, деформаций и перемещений; $[D]$ - матрица, зависящая от физических свойств массива; $[B]$ - матрица, зависящая от координат вершин элементов, матрица формы; \bar{X}, \bar{Y}, X, Y - соответственно компоненты поверхностных и объемных сил; δ_x, δ_y - компоненты вектора смещений по осям координат.

На основе этих соотношений, минимизируя уравнение (1) по перемещениям и заменяя частные производные их разностными аналогами, а интегрирование – суммированием, получают основное уравнение метода для решения задачи в перемещениях, которое в матричной форме записывается в виде

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\}, \quad (4)$$

где $[K]$ - матрица жесткости системы; $\{F\}$ - вектор объемных и поверхностных сил.

Чтобы решить задачу, необходимо составить матрицы $[K]$ и $\{F\}$, а затем определить вектор $\{\delta\}$ из системы алгебраических уравнений. Самым сложным является построение матрицы жесткости, которая составляется на основании матриц жесткости отдельных элементов, отражающих деформационные свойства материала, и координат вершин элементов. Вектор сил находится суммированием объемных и поверхностных сил в соответствующих узлах. Для плоской задачи объемные силы рассчитываются по формуле [5]:

$$Y_i = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^m \gamma_k S_k, \quad (5)$$

где i - номер узла; m - количество элементов, примыкающих к узлу; γ_k - объемный вес элемента; S_k - площадь элемента. Для учета веса среды к вертикальной составляющей поверхностных сил прибавляется соответствующая составляющая веса. Распределенная нагрузка заменяется сосредоточенной и рассчитывается по формулам

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}_i &= \sigma_x \frac{l_1 + l_2}{2} \cos \alpha \\ \bar{Y}_i &= \sigma_y \frac{l_1 + l_2}{2} \sin \alpha \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где l_1, l_2 - длины сторон, совпадающие с границей в треугольных элементах, примыкающих к данному узлу; α - угол между направлением силы и оси Ox . Главные напряжения определяют в центрах элементов по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_{1,2} &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}; \\ \tau_{max} &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}; \quad \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для расчетов упругих моделей реализован вариационно-разностный метод и составлена программа STRESS [5] (возможности программы – до 1000 узлов и 2000 элементов).

Наиболее распространенным приближенным методом, который отличается своей универсальностью и наглядностью, является метод конечных элементов (МКЭ). В МКЭ переход к дискретной расчетной схеме осуществляется, в отличие от предыдущих методов, из соображений механики. Исследуемая область разбивается на элементы, чаще всего треугольной либо четырехугольной формы. Существует три подхода в решении геомеханических задач: на основе перемещений (задаются функции, которые аппроксимируют перемещения внутри элемента); на основе сил (задаются функции, которые аппроксимируют напряжения внутри элемента); на смешанных условиях (задаются функции, аппроксимирующие на одной части элемента перемещения, а на другой – напряжения). Механические свойства (параметры функции) каждого элемента, а следовательно, всей системы, задаются на основе вводимых механических гипотез, а искомые усилия (перемещения) – из условия кинематической (статической) совместимости системы. Это позволяет естественно формулировать граничные условия, рационально располагать расчетные узлы сеточной области, свободно сгущая ее в местах возможного большего градиента разрешающей функции, более эффективно применять метод к исследованию комбинированных систем, сопрягаемых из фрагментов различной конфигурации. Параллельно с первоначально возникшими исследованиями двумерных объектов МКЭ успешно используется и для решения трехмерных задач [6].

Прикладные аспекты метода описаны в литературе и раскрывают свои возможности при решении сложных нелинейных задач. Он позволяет учесть естественные поля напряжений и гидрогеологические особенности, наиболее полно реализовать решения сложных и уникальных задач по многообразию

механических свойств и условий нагружения горных пород. Фактически МКЭ не просто метод расчёта определённых параметров породного массива и материалов конструкций, а унифицированный аппарат математического моделирования большинства физических процессов, происходящих в массиве горных пород или грунте [7-15].

Процедура решения МКЭ предусматривает два основных принципа. При бесконечно малом перемещении узловых точек работа узловых сил равна работе внутренних напряжений, а дополнительная работа на контуре области равна дополнительной работе в пределах исследуемой области, то есть соблюдается принцип возможных перемещений. Второй принцип состоит в том, что для обеспечения условия сохранения сплошности системы силовые взаимодействия между элементами осуществляются только в узловых точках, а элементы при деформировании не теряют контакта друг с другом. Таким образом, полностью и однозначно определяются теоретические главные напряжения, которые будет иметь элемент среды при заданных деформациях. Из реально заданных сосредоточенных или распределённых нагрузок формируется вектор известных узловых сил, при этом вес каждого элемента распределяется между его тремя узлами. Вычисляется матрица жёсткости системы. По известным напряжениям рассчитывается сумма силовых вкладов, воспринимаемых связью, от всех элементов, примыкающих к рассматриваемому узлу с заданным перемещением. МКЭ обеспечивает сведение задачи интегрирования бигармонического дифференциального уравнения к решению системы линейных уравнений, в которой в качестве неизвестных участвуют значения неизвестных узловых перемещений. В результате решения определяются неизвестные узловые перемещения по известным узловым силам для каждого элемента геомеханической системы [1, 2].

Таким образом, можно привести следующую последовательность проведения исследований методом конечных элементов: 1) формирование расчетных узлов, в которых определяются величины разрешающей функции и расчленение исследуемого объекта на конечные элементы желаемой формы; 2) установление зависимостей между усилиями и перемещениями в «контактных» узлах элемента, то есть построение матрицы жесткости (задание закона перемещений по области конечного элемента и их выражение через систему независимых параметров в соответствии с принятым законом, выражение компонент деформаций и напряжений через неизвестные параметры, определение жесткостных характеристик элементов на основе вариационных принципов); 3) составление системы алгебраических уравнений, выражающих кинематическую (статическую) совместимость деформаций исследуемого объекта, их решение и вычисление значений разрешающей функции в расчетных узлах; 4) определение компонентов напряженно-деформированного состояния рассчитываемой системы на основе найденных значений разрешающей функции. Наиболее важными являются первые два пункта, определяющие количество и расположение расчетных узлов, форму

конечных элементов и гипотезы о распределении перемещений или напряжений в области каждого элемента. От рационального решения этих вопросов в первую очередь зависит успех решения задачи в целом, они же являются наиболее трудоемкими.

В методах граничных элементов (МГЭ) на элементы разбивается только граница области, а численное решение строится на основе полученных предварительно аналитических решений для простых сингулярных задач таким образом, чтобы приближенно удовлетворить заданным граничным условиям на каждом элементе контура [5, 16]. Методы по своей популярности соизмеримы с методами конечных элементов, чему способствуют следующие их преимущества: уменьшение объема вычислений, особенно в трехмерных задачах; упрощение разбивки на элементы и решения задач для бесконечных областей; сокращение времени на подготовку входной информации; естественность решения разнообразных контактных задач. В работе [5] приведены вычислительные программы для двумерного метода фиктивных нагрузок (TWOFS), двумерного метода разрывных смещений (TWODD) и двумерного прямого метода граничных интегралов (TWOBI). В 1982 г. по инициативе НАСА был разработан проект создания глобальной системы программ для решения линейных и нелинейных упругопластических задач статики и динамики, которая основана на методе граничных элементов и сопоставима по своим возможностям с конечно-элементной системой NASTRAN. Разработка данной системы (BEST-Boundary Element Solution Technique) потребовала затрат труда в 42 человеко-года и все еще продолжается. Поэтому ориентировка на постановку и решение все новых и новых задач в постоянно изменяющихся горно-геологических условиях, тем более в «режиме реального времени», для горняков – слишком расточительная задача, необходимы новые нетрадиционные подходы.

МКЭ в свою очередь имеют очень важные достоинства: разреженность и симметричность матрицы; естественный охват задач с непрерывными или частыми изменениями свойств среды; большой набор средств для учета нелинейных эффектов в элементах объема среды, что связано не только с возможностью использования метода последовательных приближений (такая возможность есть и при использовании МГЭ), но и с перестройкой локальных матриц жесткости. Основное преимущество МКЭ - легкость восприятия инженерами, их привычность, высокий уровень численного развития и относительно удовлетворительная оснащенность программами.

Отсюда следует, что разумным направлением в геомеханических расчетах численными методами должно быть не их противопоставление, а использование достоинств каждого из них. Это можно сделать, выбирая из арсенала имеющихся программ МКЭ и МГЭ ту или те, которые лучше соответствуют особенностям конкретной проблемы, или, применяя их в комбинациях, рассмотреть конкретную задачу с разных аспектов и в разных масштабах. Перспективный способ в объединении достоинств МКЭ и МГЭ заключается в создании специальных гибридных алгоритмов, совмещающих их

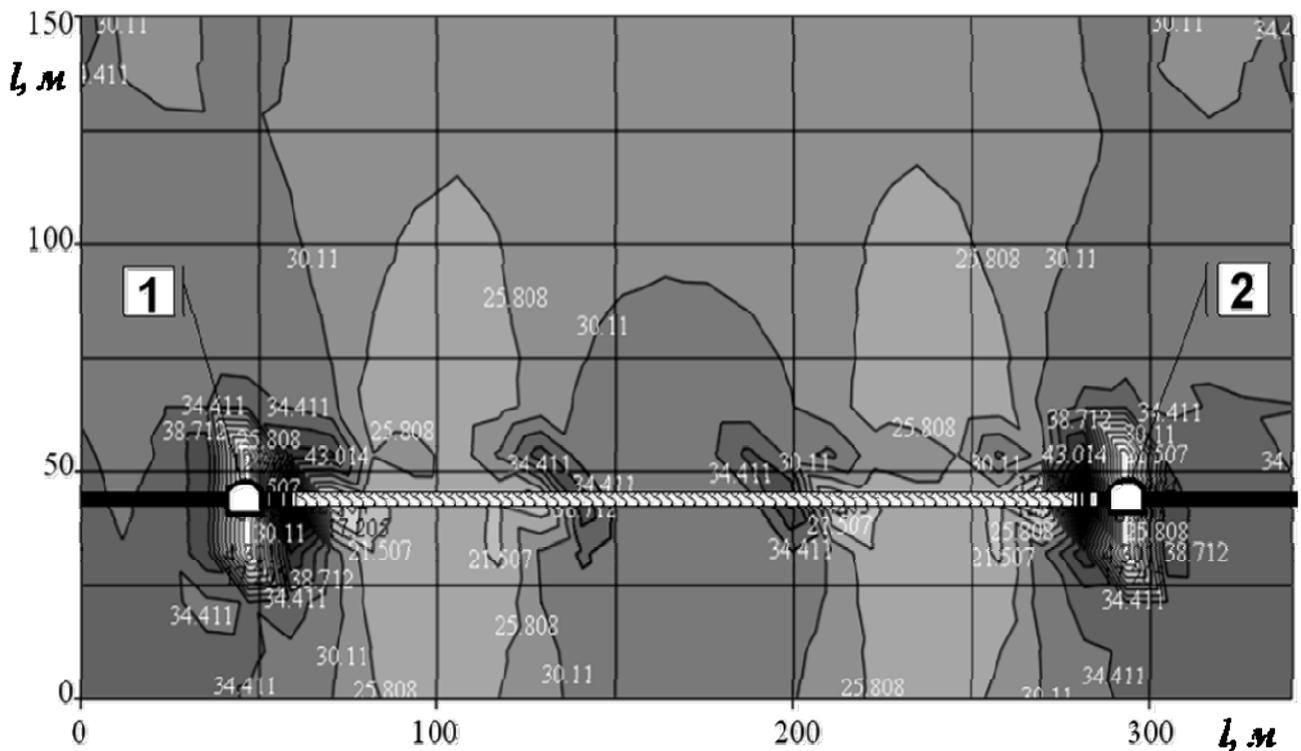
идеи. Так появились «суперэлементы», которые можно рассматривать как объединения граничных элементов или разновидности конечных элементов. На наш взгляд, для промышленного внедрения наиболее важным является унификация задач, доведение их сначала до простых схем с четкими инструкциями по их заполнению, а затем - до полной автоматизации, как процесса ввода информации, так и обработки полученных результатов.

Современные программы МКЭ позволяют сопоставить напряжения с прочностными свойствами пород, исследовать условия равновесия системы. Если ранее на вычисление методом конечных элементов достаточно простой геомеханической задачи уходило несколько часов машинного времени, то быстрдействие, память и другие сервисные возможности современных персональных ЭВМ позволяют решать их буквально за считанные секунды, поэтому, учитывая время протекания геомеханических процессов, такие расчеты можно условно принять за расчеты в «режиме реального времени». Пример использования экспресс-методики для исследования напряженного состояния породного массива в выработанном пространстве лавы после посадки основной кровли показан на рис. 1.

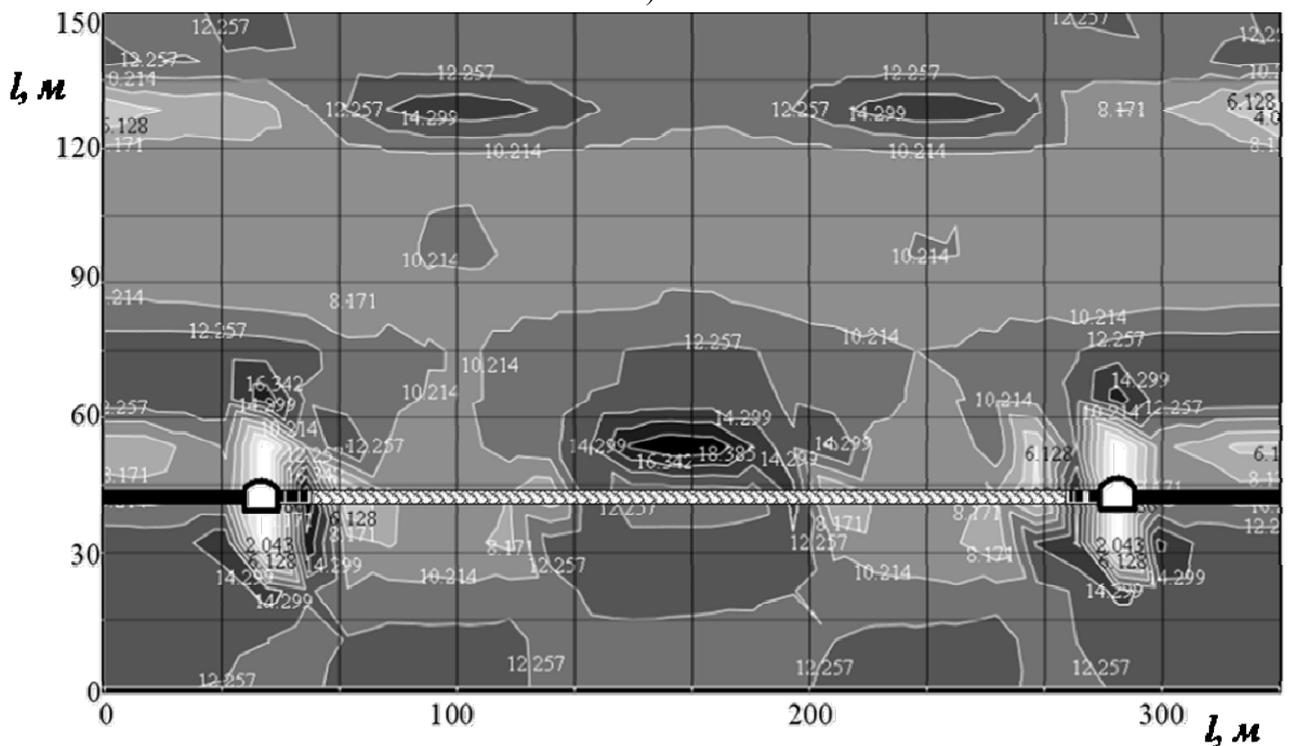
Подготовка исходной информации достаточно трудоемкий процесс, требующий проведения множества простых вычислений, построений и проверок. Каждая конкретная геомеханическая задача требует построения новой схемы (модели). Поэтому разработаны унифицированные конечно-элементные расчетные схемы, позволяющие решать широкий класс горных задач по оценке состояния массива и выработок с возможностью изменения их исходных горно-геологических условий и режимов нагружения. В связи с тем, что в построение математической модели для компьютерных исследований напряженно-деформированного состояния массивов при ее разбиении вносятся элементы субъективности и случайности, усовершенствованы средства ввода и обработки геофизической и геомеханической информации, позволяющие исключить ошибки оператора при вводе информации.

Исходные параметры прочностных свойств пород часто не отражают реально существующий объект, а зачастую просто отсутствуют, что, в конечном итоге, сказывается на результатах вычислений и их достоверности. Поэтому создан обширный банк данных для определения физико-механических свойств пород в аналогичных горно-геологических условиях, который дополнен программным обеспечением, позволяющим использовать методы математической статистики и компьютерной обработки результатов вычислений для повышения достоверности математического моделирования.

Апробация предложенного способа экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния породного массива проведена на примере подготовительных выработок (одиночных, сближенных), элементов камерно-столбовой системы разработки гипсовых пластов, очистных забоев угольных шахт (рис. 1), расположенных в слабых водонасыщенных горных породах, при разных величинах заданных напряжений и прочностных параметров, которые изменялись аналогично реальным условиям разработки месторождений.



а)



б)

1 - вентиляционный штрек; 2 - конвейерный штрек

Рис. 1 – Применение экспресс-методики для исследования состояния породного массива в выработанном пространстве лавы после посадки основной кровли:

- а) определение максимальных главных напряжений σ_1 , МПа;
- б) определение минимальных главных напряжений σ_2 , МПа

Сопоставление расчетных, сугубо аналитических и экспериментальных исследований проведено по результатам умышленного виртуального разрушения модели и по данным реальной геофизической оценки стадии разрушения массива горных пород и объекта в целом. За счет повышения нагрузок и снижения прочностных свойств математическая модель исследуемых конструкций доводилась до полного разрушения, что позволило выполнить прогноз развития зоны неупругих деформаций во времени, определить области фильтрации воды и учесть потерю прочности пород при водонасыщении.

Таким образом, на основе изученности научной задачи и в результате проведенного комплекса исследований выполнен анализ и обобщение результатов экспериментальных данных прочностных и деформационных свойств осадочных пород Донбасса, разработана и апробирована методика экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов с учетом изменения его электропроводящих свойств, а также под влиянием водонасыщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. - М.: Недра, 1975. - 144 с.
2. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987. - 221 с.
3. Булычев Н.С., Амусин Б.З., Оловянный А.Г. Расчет крепи капитальных горных выработок. - М.: Недра, 1974. - 320 с.
4. Шевцова Г.М. Способ повышения устойчивости обнажений и целиков при камерных системах разработки: Дис... канд. техн. наук: 05.15.11. - Кривой Рог, 1986. - 175 с.
5. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в геомеханике твердого тела: Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 328 с.
6. Сахаров А.С., Киричевский В.В., Завьялов Г.Г. Метод конечных элементов в пространственной задаче теории упругости.-Деп.: Гос. респ. научно-техническая библиотека УССР, 1982.-99 с.
7. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. - Л.: Недра, 1989. - 488 с.
8. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. - М.: Недра, 1982. - 189 с.
9. Булат А.Ф., Курносос С.А., Слащёв И.Н., Ефремов И.А., Бокий Б.В. Экспериментально-аналитический метод прогноза направлений и интенсивности газовых потоков // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2005. - № 59. –С. 10-21.
10. Усаченко Б.М., Слащева Е.А. Исследование и экспресс-оценка фильтрационных процессов в трещиноватых массивах // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2005. - № 59. –С. 34-44.
11. Садовенко И.А. Научные основы управления геофильтрационным состоянием породного массива вокруг горных выработок: Дис. ... докт. техн. наук: 05.15.04; 05.15.11. - Днепропетровск, 1993. - 455 с.
12. Ержанов Ж.С., Каримбаев Т.Д. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. - Алма-Ата: Наука, 1975. - 238 с.
13. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / Под ред. Б.Е. Победри. - М.: Мир, 1975. - 541 с.
14. Круковский А.П., Круковская В.В. Обзор существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива горных пород. // Геотехническая механика № 36. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2002. - С. 178-185.
15. Розин Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости. - Л.: ЛПИ, 1972. - 79 с.
16. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики / Л.В. Новикова, П.И. Пономаренко, В.В. Приходько, И.Т. Морозов. - Днепропетровск: Наука и образование, 1997. - 180 с.