

- 2) "Аналіз заходів";
- 3) "Аналіз маршрутів евакуації";
- 4) "Аналіз маршрутів руху ГВГСС".

Охарактеризована структура є рекомендаційною. Проте включення її в технологічну схему інформаційної технології вибору заходів щодо ліквідації аварійних ситуацій на вугільних шахтах може служити основою для організації її впровадження на підприємствах Мінвуглепрому України.

#### ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила безопасности в угольных шахтах. НПАОП 10.0-1.01-10. Утверждены приказом Государственного комитета Украины по промышленной безопасности, охране труда и горному надзору от 22.03.2010 № 62; Зарегистрированы в Министерстве юстиции Украины 17 июня 2010 за N 398/17693.- Режим доступа : <http://ohranatruda.in.ua/pages/4955/>

**УДК 622.831.312**

Академик НАН Украины А.Ф. Булат,  
канд. техн. наук И.Н. Слащев  
(ИГТМ НАН Украины)

### **РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Розглянуті можливості та особливості застосування обчислювальних комплексів імітаційного моделювання ІГТМ НАН України, які динамічно розвиваються і успішно використовуються для вирішення складних геомеханічних і гірничотехнічних задач.

### **DEVELOPMENT OF COMPUTER SYSTEMS MATHEMATICAL MODELING GEOMECHANICAL PROCESSES**

The possibilities and features of computer systems simulation IGTM NAS of Ukraine, which rapidly developed and successfully used to solve complex geomechanical and mining problems.

Одной из основополагающих задач горной науки является прогнозирование геомеханических условий отработки угольных пластов, которое служит фундаментом для разработки эффективных технологий горных работ, обеспечивающих высокую производительность и безопасные условия труда горняков.

Моделирование сложных физических процессов невозможно без современной вычислительной техники и новых методов расчетов, обработки, анализа и визуализации больших массивов данных. Значительные достижения в этом направлении были получены в США (НАСА, Ливерморская национальная лаборатория, Национальные суперкомпьютерные центры), Великобритании (Резерфордская лаборатория, Университет Манчестера), Германии (Фраунгоферовский институт машинной графики), Швейцарии (Женевский университет, Лозаннская высшая политехническая школа) и др. Технологии компьютерного анализа, чаще всего, основаны на показавших себя с наилучшей стороны в инженерных расчетах методах конечных и граничных элементов [1, 2], конечных разностей [3], начальных напряжений [4], которые являются универсальными, в том числе для моделирования процессов, происходящих в породном массиве.

Широко известные программные продукты, – вычислители метода конечных элементов (МКЭ), графические пре- и постпроцессоры, – разрабатываются в университетах и ведущих компьютерных корпорациях Германии (Siemens PLM Software, «Solid Edge»<sup>©</sup> и «Femap»<sup>©</sup> для «NX Nastran»<sup>©</sup>), США (Structural Research и SolidWorks Corporation, «Cosmos»<sup>©</sup> и «SolidWorks»<sup>©</sup>), Великобритании (Sunrise Systems, «Pipenet»<sup>©</sup>), России (SCAD Soft, «SCAD»<sup>©</sup>), Украины (Лира САПР, «Лира»<sup>©</sup>) и др. Вместе с тем, коммерческие программные продукты предлагаются пользователям с закрытым исходным кодом, ограниченным, а зачастую невозможным потенциалом расширения или изменения приложений. Поэтому их весьма сложно использовать для решения горнотехнических задач, так как породный массив имеет специфические особенности: сложную структуру, слоистость, флюидонасыщенность, изменяющиеся характеристики физико-механических свойств, в том числе пористости, трещиноватости и др. Эти факторы можно адекватно смоделировать только в том случае, если установлены закономерности протекания физических процессов в породном массиве, а вычислительный комплекс специализирован для решения геомеханических задач и имеет открытый исходный программный код, с помощью которого горный инженер может корректно выбрать деформационную модель среды и интегральные характеристики вычисляемых параметров.

Следует отметить, что имеющиеся коммерческие программы достаточно дорогие и узкоспециализированы для оценки состояния материала деталей машин, механизмов, корпусов самолетов, элементов ракетной техники и др., поэтому в основном предназначены для расчетов исключительно упругих сред. В частности, это является большой проблемой при расчетах геомеханических процессов в осадочных горных породах, так как для фактических условий разработки угольных шахт упругие модели дают крайне приближенную картину распределения напряжений только на момент времени, когда происходит упругая деформация. При этом отсутствует возможность корректного расчета неупругих деформаций, реологических процессов, эволюции напряженно-деформированного состояния (НДС) во времени, процессов движения газонасыщенных флюидов и др. Применение этих программ для прогноза НДС породного массива почти всегда приводит к некорректным результатам, которые не подтверждаются реальными измерениями в горных выработках.

В области моделирования НДС породного массива ИГТМ НАН Украины находится на передовых рубежах и имеет значительный научный потенциал, всю необходимую экспериментальную базу, современные вычислительные комплексы с возможностью их настройки под любую горнотехническую ситуацию. На сегодняшний день эффективно решаются задачи прогноза геомеханического состояния породного массива и обработки элементов наиболее эффективных технологий горного производства с учетом максимально возможного количества факторов, влияющих на процессы деформирования и разрушения пород под влиянием горных работ. Решения выполняются с применением методов численного анализа, основанных на новых достижениях в области геоме-

ханики сложноструктурных флюидонасыщенных сред и оптимизации объектно-ориентированных технологий программирования.

Современные компьютеры, которые сейчас имеются практически на всех шахтах и в научно-исследовательских институтах, дают возможность предъявлять новые требования к программам, созданным для имитационного моделирования процессов, происходящих в обрабатываемом массиве горных пород. На данный момент, если программное обеспечение реализует упругую модель, это является только базовой минимальной функцией. Новые программные комплексы должны адекватно и с достаточной точностью описывать реальную неупруго деформируемую систему, иметь высокую производительность вычислений, автоматизацию ввода и вывода информации, интерактивность и удобную для восприятия визуализацию данных.

В отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах разработан вычислительный комплекс «ГЕО-РС»<sup>©</sup> (геомеханика с разупрочнением и скольжением), который реализует технологию компьютерного анализа состояния породного массива совмещенными процедурами методов конечных элементов и начальных напряжений (МКЭ-МНН). Он состоит из специализированных компьютерных программ, включающих обширную базу данных физико-механических свойств горных пород для различных горно-геологических условий отработки угольных пластов и позволяющих значительно повысить качество решений широкого спектра геомеханических задач. Отличительными особенностями программного комплекса является обеспечение расчетов упругого, упругопластического и различных видов запредельных напряженно-деформированных состояний структурно-неоднородного породного массива, а также учет разупрочнения и скольжения слоев пород, особенностей и закономерностей протекания деформационных процессов в трещиноватом водо- и газонасыщенном породном массиве. Данное программное обеспечение соответствует, а в некоторых аспектах превосходит мировые аналоги.

В отделе вибропневмотранспортных систем и комплексов совместно с научно-инженерным центром «Экология-Геос» разработан программно-технологический комплекс «Технология стратегического планирования развития горных работ»<sup>©</sup>, посредством которого осуществляется выбор рациональных технологических параметров при решении конкретной горнотехнической задачи [5]. Методология базируется на общих положениях механики сплошной среды и механизма сдвижения слоистого разномодульного породного массива. В отделе горной термоаэродинамики и автоматизированных систем на основе метода конечных элементов создан компьютерный комплекс, позволяющий решать объемные задачи [6]. Апробация вычислительных комплексов на шахтах ГП «Селидовуголь», «Макеевуголь», «Свердловантрацит», «Донецкая угольная энергетическая компания», ОАО «Павлоградуголь» и др. показала их высокую производственную необходимость и экономическую эффективность.

Рассмотрим методы, возможности и особенности применения вычислительного комплекса имитационного моделирования «ГЕО-РС»<sup>©</sup>, который на сего-

днѣшний день динамично развивается и успешно используется для решения сложных геомеханических и горнотехнических задач.

Оценка работоспособности комплекса и достоверности метода математического моделирования была выполнена на примерах верификации параметров рассчитанной модели с точными теоретическими решениями, с областями сдвигов по радиальным поверхностям скольжения, а также с лабораторными и шахтными экспериментами [7]. Установлено, что погрешность расчета модели по сравнению с точным теоретическим упругим решением, даже при грубой разбивке схем, не превышает 2-3 %. Сравнения МКЭ-МНН с точным аналитическим решением Л.А. Галина по определению зоны неупругих деформаций в идеальной упругопластической среде Рейса-Прандтля в негидростатическом поле напряжений для выреза круговой формы показали, что величина относительной погрешности находится в пределах 1-9 %, рис. 1. Погрешности обусловлены крупной дискретизацией тестовых расчетных схем и использованием в задаче Л.А. Галина частного случая критерия Кулона-Мора (критерия Треска, угол внутреннего трения  $\varphi=0$ ). Точность повышается на порядок при больших значениях напряжений и когда расчетная схема дискретизирована на большее количество элементов.

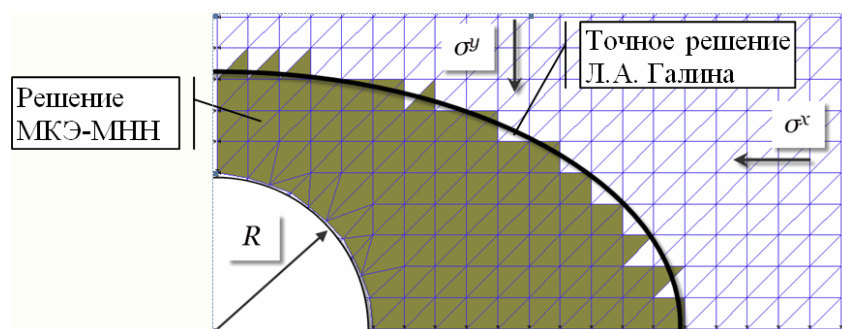


Рис. 1 – Сопоставление ЗНД модели и точного решения Л.А. Галина.

Исследования показали, что расхождение деформаций в моделях и лабораторных экспериментах связаны с идеализацией микроструктурного строения пород. Несмотря на то, что в отличие от лабораторных данных модельный эксперимент не показывает микроструктурных разрушений реальных образцов пород, тем не менее, он хорошо моделирует состояние участков массива, сопоставимых с размерами элементов расчетной схемы, при этом погрешность решений не превышает 10 %. При решении сложных горных задач и определении напряжений, зон неупругих деформаций, границ зон дезинтеграции слоистых пород и смещений контура выработок погрешность решений находится в пределах 15-25 %, что обусловлено разбросом физико-механических свойств реальных пород. Особенности расположения зон концентрации напряжений, их конфигурация, вид линий скольжения и граничных линий между участками различных по типу деформаций соответствуют теоретическим представлениям о напряженно-деформированном состоянии структурно-неоднородного пород-

ного массива и неоднократно верифицированы по данным шахтных экспериментов в горных выработках угольных шахт [8].

Вычислительный комплекс включает: базу свойств горных пород, предназначенную для оперативного анализа, корректировки и ввода в расчетный модуль МКЭ значений свойств пород; препроцессор, выполняющий функции подготовки данных; вычислитель базовой процедуры МКЭ; программу анализа предельных и запредельных состояний модели; постпроцессор, выполняющий функции контроля данных и визуализации результатов расчета.

Определение граничных условий задачи – это важная часть моделирования, поэтому база данных содержит физико-механические и деформационные свойства пород, их структурные и петрографические особенности. Выборка и отображение параметров производится посредством графического интерфейса, что позволяет значительно сократить затраты времени на подготовку и решение задач. Препроцессор выполняет автоматическую дискретизацию исследуемой области и задание условий нагружения модели, создает и конвертирует массивы исходных данных для расчета смещений узлов и других параметров поля напряжений, выводит в файл исходную информацию. Вычислитель базовой процедуры МКЭ необходим для соблюдения равновесия системы путем минимизации потенциальной энергии внутри расчетной области. Он включает функции формирования матриц жесткости элементов и системы, решения системы линейных уравнений, определения значений поля упругих перемещений, напряжений и деформаций. Блок анализа и контроля данных выполняет функции расчета предельных и запредельных состояний элементов модели, интегральных параметров НДС пород, избыточных газовых давлений и параметров систем магистральных трещин. Постпроцессор производит сохранение и графическую визуализацию рассчитанных данных, экспорт числовых значений в системы MS Excel и Mathcad для дополнительной обработки.

Программа анализа данных использует целый ряд программных функций для расчета интегральных характеристик НДС породного массива. Это позволяет анализировать состояние среды не только по критерию Кулона, который хорошо себя зарекомендовал и широко применяется для расчетов, но и по критериям Сен-Венана, Мизеса, Боткина, Треска, параметру Надаи-Лоде, проводить анализ состояния пород внутри зон неупругих деформаций, использовать инварианты составляющих тензора напряжений, рассчитывать интенсивность роста (понижения) информативных параметров, определять потенциальную энергию и другие интегральные характеристики поля напряжений, что на сегодняшний день является новым и перспективным. Перечень оценочных характеристик массива постоянно пополняется новыми апробированными на практике параметрами. В результате анализа комплекса информативных параметров мы получаем наиболее достоверную картину НДС массива пород.

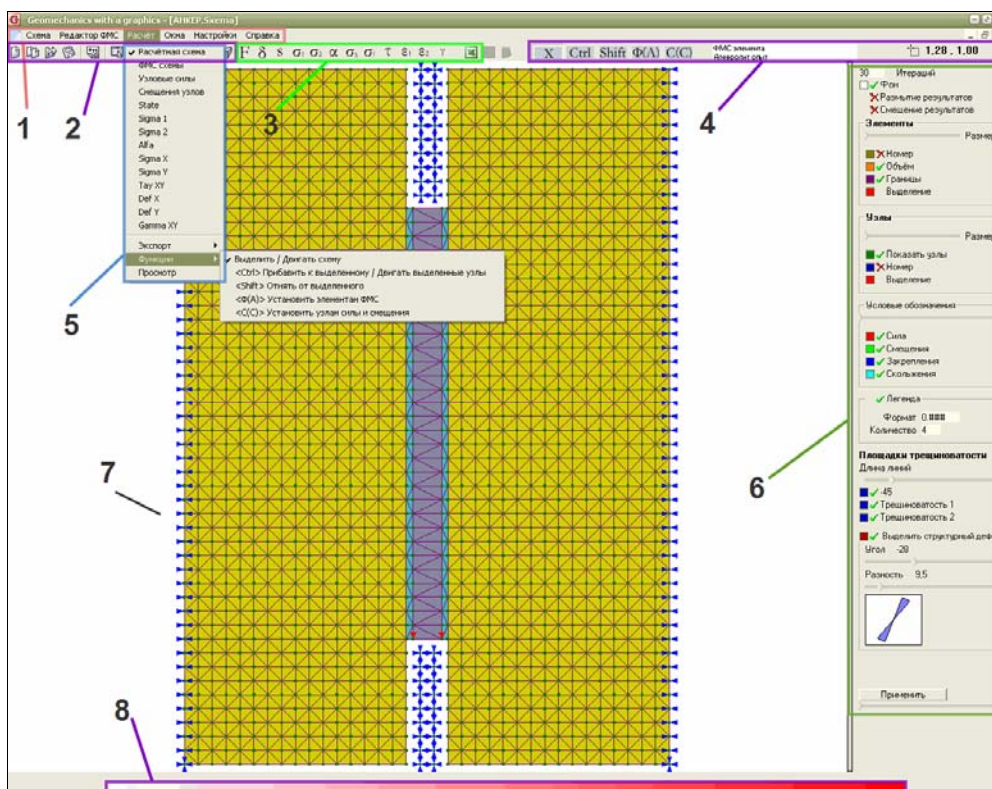
Отдельно остановимся на программе визуализации, которая обеспечивает наглядное представление данных в иллюстрациях и графиках, является необходимой для понимания научно-исследовательских разработок, обеспечивает непосредственную связь между учеными и производственниками, их взаимопо-

нимание, в том числе адекватность оценки выполненных работ. Следует отметить, что в отчете Национального научного фонда США «Визуализация в научных вычислениях» 1987 года, было обращено внимание на то, что целью вычислений являются не числа, а понимание, постижение, проникновение в суть изучаемого процесса, то есть привлечение к анализу способности человека видеть и понимать изображения [9]. Такой подход не только облегчает работу ученых и взаимодействие их с инженерно-техническим персоналом шахт, но и дает надежду на развитие научной популяризации, лучшего восприятия общественностью результатов научных работ. Поэтому в графическом постпроцессоре реализован режим интерактивной визуализации параметров НДС массива функциями прямого доступа библиотек DirectX Graphics или OpenGL, которые имеют уровень абстракции оборудования HAL (Hardware Abstraction Layer), позволяющий настроить работу системы на любом аппаратном обеспечении вне зависимости от изготовителя оборудования. Для повышения скорости и удобства работы пользователя в интерактивном режиме также выполняются создание, перемещение, копирование, удаление, изменение свойств узлов и элементов модели. Работа может быть организована в нескольких окнах одновременно, что позволяет сопоставить результаты расчета и внести корректировку в исходные данные, используя визуальное представление предыдущих решений. Для всех режимов работы системы автоматически создается дифференцированная цветовая шкала, позволяющая дискретно или плавно отображать уровни значений параметров, выделять диапазоны и поддиапазоны рассчитанных данных, отсекалть краевые эффекты, производить сглаживание и др.

Все функциональные части системы объединены в многооконный главный интерфейс, рис. 2. Графическая среда пользователя совместно с расчетным модулем МКЭ составляют единый интерактивный комплекс, позволяющий сформировать расчетную модель, выполнить ее расчет, провести числовой и графический анализ результатов в постпроцессоре или во внешнем приложении. Интерфейс, сценарии взаимодействия пользователя с системой, функции контроля исходных данных и анализа результатов полностью унифицированы, что обеспечивает логичную последовательность выполнения операций моделирования.

Кроме визуализации больших массивов данных, основная часть требований к компьютерным программам сводится к обеспечению скорости решения поставленных задач. Производственники не хотят и не могут ждать месяцами результатов решения, а конкуренция на научном рынке становится жестче с приходом в него зарубежных ученых после 90 годов. В этом направлении отделом проблем разработки месторождений на больших глубинах специально для производства разработана методология экспресс-определения НДС породного массива [10]. В отличие от сложных геомеханических задач, которые можно решать только мощными вычислительными комплексами, оперативный прогноз осуществляется в режиме реального времени синхронно с графической обработкой информации. То есть у инженера на производстве появилась возможность использовать современные научные достижения непосредственно на рабочем месте при оперативной оценке горнотехнических ситуаций. Несмотря на

то, что экспресс-метод идеализирует породный массив, он использует необходимое количество основных факторов и сложную технологию компьютерного анализа данных, которая достаточно близко соответствует реальному деформационному процессу и достоверна для оценочных расчетов.



1 – меню программы; 2 – панель управления файлами данных и редактором свойств пород; 3 – панель управления результатами расчетов, 4, 5 – основная и дублирующая панели корректировки схем; 6 – панель управления отображением и интегральными параметрами НДС модели; 7 – окно вывода результатов; 8 – дифференцированная цветовая панель

Рис. 2 – Многооконный графический интерфейс системы.

Как один из примеров практического использования расчетного комплекса можно привести реализацию концепции эффективного поддержания подготовительных выработок, которая заключается в снижении разрушающего действия горного давления на крепь путем использования эффекта поэтапного вовлечения породного массива в охранную конструкцию, несущая способность и режим работы которой, соответствуют ожидаемым смещениям и нагрузкам на различных временных этапах взаимодействия системы «крепь-породный массив». В результате исследований [11] обоснованы каждый из элементов и вся система комбинированного поддержания подготовительных выработок, включающая средства анкерного и равно-анкерного крепления, литые полосы из быстротвердеющих материалов, крепи усиления, охранные бутовые полосы с различными параметрами нагружения и деформирования, рис. 3.



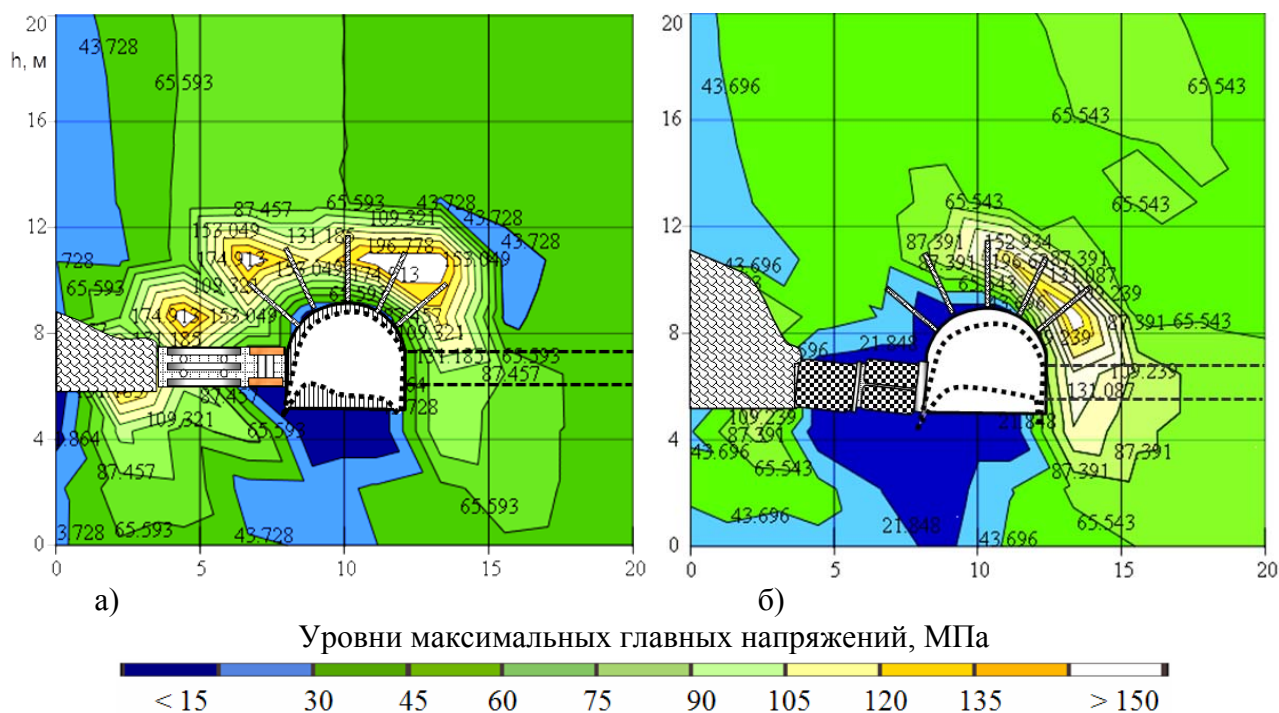


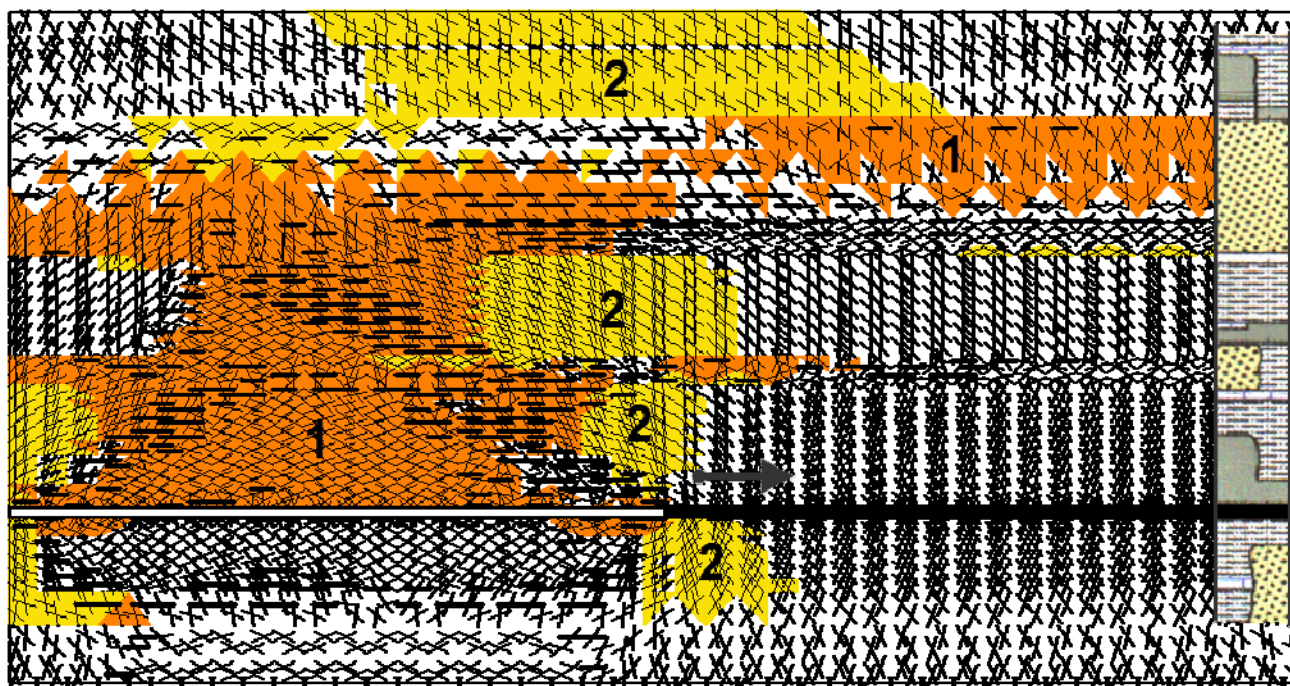
Рис. 3 – Оценка состояния шторка, закрепленного рамно-анкерной крепью: а – с жесткими охранными конструкциями; б – с литой полосой из быстротвердеющих материалов.

Программный комплекс «ГЕО-РС»<sup>©</sup> отличается от известных возможностью определения геометрических и энергетических параметров зон разрушения в массиве (длины, объема, потенциальной энергии, интенсивности деформирования, кинетики зон зарождения микро- и макроразрушений), систем техногенных магистральных трещин, высокой точностью результатов. Анализ состояния трещиноватого массива базируется на исследованиях [12], которыми установлено, что оценку параметров систем дополнительных трещин при решении неупругих задач рационально выполнять на основе определения ориентации и величины сдвигающих сил. Это связано с тем, что под действием изменяющихся во времени и пространстве нагрузок, обусловленных перераспределением полей напряжений и зон неупругих деформаций, в зонах с площадками сдвига равных направлений фиксируется активизация процесса распространения магистральных трещин, преимущественно по направлениям структурных дефектов, сопровождающаяся формированием блочных структур. Разработанная математическая модель позволяет на основе расчета процедурами имитационного моделирования МКЭ-МНН возможных направлений площадок скольжения и разрыва связей в элементах модели определять зоны зарождения и ориентацию в геопространстве магистральных трещин с учетом природных структурных дефектов в реальном массиве пород, рис. 4.

Несмотря на определенную идеализацию, которая свойственна любому процессу моделирования, предложенная технология компьютерного анализа обладает существенными преимуществами, так как открывает новые широкие возможности по определению зональности и интенсивности трещиноватости, границ зон дезинтеграции слоистых пород, прогнозированию наиболее вероятной ориентации и распространения магистральных трещин, а, следовательно, по-



звolyет детально и корректно выполнять расчет параметров сложных геомеханических и газодинамических процессов.



- разрыв сплошности в условиях растяжения (1);
- неупругие деформации в условиях неравнокомпонентного сжатия (2);
- зона упругого деформирования;
- × – ориентация площадок скольжения в элементах расчетной схемы;
- магистральные трещины;
- направление подвигания очистного забоя.

Рис. 4 – Анализ магистральных газопроводящих трещин вокруг очистного забоя (пласт  $m_3$ , ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько», горизонт 1300 м).

Преимущества вычислительного комплекса в полной мере проявляются при анализе НДС газонасыщенных сред. Метод основан на использовании закономерностей разрушения массива под совместным действием сил горного и газового давлений [13]. Реализация данного метода проводится имитационными процедурами МКЭ-МНН и включает автоматический расчет внутрипластовых газовых давлений в зависимости от степени разрушения пород на базе линейного, параболического и полиномиального видов функций снижения горного и газового давлений в зоне разупрочнения. Расчет более полно учитывает физическую сущность деформационных процессов в газонасыщенном массиве горных пород, и, вследствие этого, обеспечивает повышенную достоверность прогноза. Элементы разработанной технологии моделирования вошли в апробированный экспериментально-аналитический метод комплексного анализа состояния газонасыщенного породного массива [14], важными преимуществами которого являются определение серий расчетов идеализированных квазистационарных состояний насыщенной газом геосреды направлений распространения

систем газопроводящих магистральных трещин, их верификация по результатам мониторинга в горных выработках и сравнительный анализ полученных данных с решением серии обратных задач.

Метод прогноза состояния газонасыщенных сред использует методы неразрушающего геофизического контроля породного массива, такие как электрометрический, виброакустический, радиометрический и др., которые на сегодняшний день в полной мере апробированы ИГТМ НАН Украины и отражены в нормативно-технической документации [15]. По данным моделирования определены зоны наибольшего и наименьшего сжатия, которые использованы для оценки снижения или увеличения проницаемости массива, рис. 5. В результате практического применения метода был решен ряд актуальных научных и прикладных задач: установлены новые закономерности изменения геомеханического состояния и газовой проницаемости газонасыщенного породного массива под влиянием очистных работ и реакция на данные процессы пространственных и временных параметров различных по геологической структуре источников газовыделения; установлены параметры заложения дегазационных скважин, в том числе на конкретные источники газовыделения; разработан стандарт Минуглепрома Украины, который регламентирует условия и параметры применения новых схем дегазации в угледобывающей отрасли Украины [16].

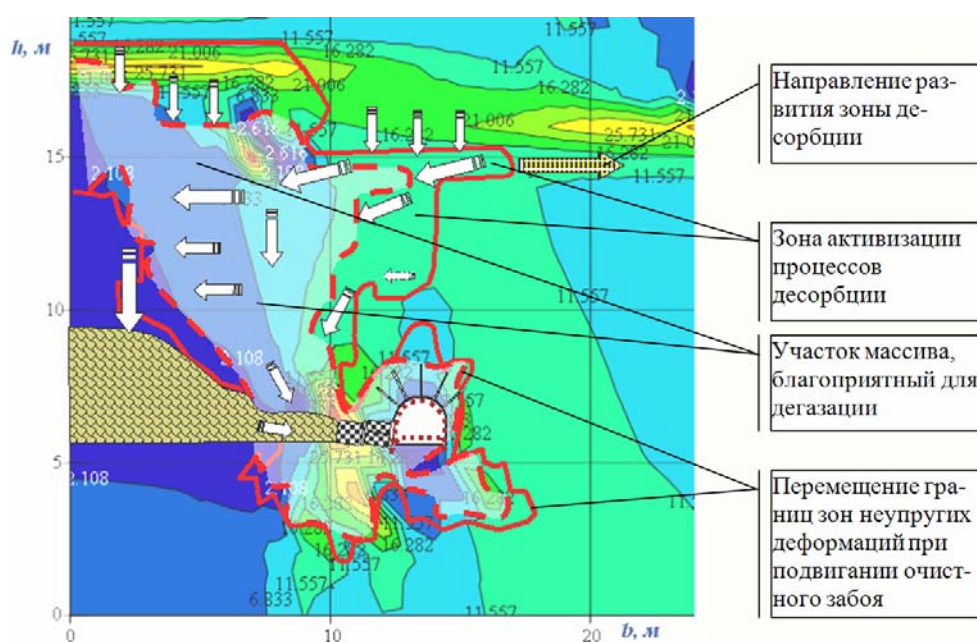


Рис. 5 – Прогноз изменения максимальных главных напряжений (МПа) и ЗНД за период установившихся сдвижений (стрелками показаны направления газовых потоков).

Не менее эффективно разработанный комплекс показал себя при анализе водонасыщенных сред [17]. Установлены закономерности изменения НДС массива в зависимости от характеристик обводненности подготовительных выработок для условий шахт ОАО «Павлоградуголь», оценена степень влияния водонасыщенности пород на проявления горного давления в выработках. На основе математического моделирования и шахтных наблюдений спрогнозировано

характер деформаций влагонасыщенных пород. Предложенные мероприятия обеспечивают снижение размеров зоны неупругих деформаций в боках выработок и уменьшение величины конвергенции пород, что подтверждает их эффективность в условиях влагонасыщенных пород. Эти результаты стали возможными благодаря использованию разработанных методов, приборов и программного обеспечения, которые длительное время применяются именно для решения горнотехнических задач.

Технология компьютерного анализа апробирована и показала высокую эффективность: на пластах  $m_3$  и  $l_4$  ПАТ «Шахта им. Н.С. Засядько» при обосновании способов обеспечения устойчивости выработок, оперативном прогнозе ориентации в пространстве потоков свободного метана, обосновании схем и способов подземной дегазации; на пластах  $c_4$  и  $c_5$  шахт «Самарская» и «Павлоградская» при оценке надежности систем комбинированного крепления; на пласте  $h_7$  шахты «Нестор» при оценке способов управления горным давлением; на шахтах им. К.А. Румянцева, им. А.И. Гаевого и др. при разработке новых типов крепей и средств охраны выработок с учетом специфики исходного напряженного состояния и деформационных процессов в трещиноватом породном массиве.

Таким образом, ИГТМ НАН Украины, имеет всю необходимую экспериментальную базу, современные вычислительные комплексы и возможность их развития и настройки под любую горнотехническую ситуацию. Отличительными особенностями программного обеспечения являются возможности расчетов: упругого, упругопластического и различных видов запредельных напряженно-деформированных состояний структурно-неоднородного породного массива; разупрочнения и скольжения слоев пород; параметров и особенностей протекания деформационных процессов в трещиноватом обводненном и газонасыщенном массиве пород; магистральных трещин; геометрических и энергетических параметров зон неупругих деформаций. Технологии компьютерного анализа НДС породного массива широко апробированы по данным натурных измерений и обеспечивают высокую точность результатов при решении сложных практических задач горного дела.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галагер, Р. Метод конечных элементов. Основы : пер. с англ. / Р. Галагер. – М. : Мир, 1984. – 428 с.
2. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 656 с.
3. Крауч, С. Методы граничных элементов в геомеханике твердого тела: Пер. с англ. / С. Крауч, А. Старфилд. - М.: Мир, 1987. - 328 с.
4. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич – М. : Мир, 1975. – 238 с.
5. Технология стратегического планирования развития горных работ / А.Ф. Булат, А.И. Волошин, О.В. Рябцев, А.И. Коваль // Уголь. – 2011. № 2. – С. 22-24.
6. Виноградов, В. В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К. : Наук. думка, 1989. – 192 с.
7. Слащев, И.Н. Моделирование трещиноватости как основа прогноза газового режима добычных участков глубоких шахт / И. Н. Слащев, М. Ю. Иконников // Сб. науч. трудов НГУ. – Днепропетровск : РВК НГУ, 2008. – № 31. – С. 236-245.
8. Слащев, И.Н. Практический опыт повышения эффективности угледобычи и безопасности труда в сложных горно-геологических условиях / И.Н. Слащев, С.А. Курносоев, Е.А. Слащева и др. // Научный вестник НГУ. – Днепропетровск : РИК НГУ, 2009. – № 11. – С. 20-25.

9. Visualization in Scientific Computing, Special Issue, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, V. 21, N 6, November 1987.
10. Слащева, Е.А. Экспресс-оценка напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов / Е.А. Слащева // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2007. – Вып. 68. – С. 269-277.
11. Слащев, И.Н. Прогноз устойчивости систем комбинированного поддержания подготовительных выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт / И.Н. Слащев // Сб. науч. трудов НГУ. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2010. – № 35, Том 1. – С. 67-77.
12. Слащев, И.Н. Оценка техногенной трещиноватости методами математического моделирования / И.Н. Слащев // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – Вып. 85. – С. 239-250.
13. Слащев, И.Н. Метод учета избыточных газовых давлений при решении геомеханических задач современными компьютерными технологиями / И. Н. Слащев // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – Вып. 88. – С. 112-118.
14. Экспериментально-аналитический метод прогноза направлений и интенсивности газовых потоков / А.Ф. Булат, С. А. Курносов, И. Н. Слащев [и др.] // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2005. – Вып. 59. – С. 10-21.
15. Руководство по геофизической диагностике состояния системы "крепь - породный массив" вертикальных стволов: Дополнение к «Пособию по восстановлению крепи и армировки вертикальных стволов. РД 12.18.073-88» / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, А.А. Яланский и др. – Донецк: ООО "Лебедь", 1999. - 42 с.
16. Дегазація вугільних пластів та вміщуючих порід з застосуванням газозбірної виробки. Схеми дегазації : СОУ 10.1.05411357.006:2007. – [Чинний від 2008-04-01] / А.Ф. Булат, А.Т. Курносов, С.А. Курносов, І.М. Слащов та ін. – Офіц. вид. – К. : Мінвуглепром України, 2007. – 31 с.
17. Слащева, Е.А. Оценка влияния водонасыщенности пород на их напряженно-деформированное состояние и проявления горного давления в выработках / Е.А. Слащева // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2009. – Вып. 83. – С. 111-122.

**УДК 622.24.537.528**

Д-р техн. наук Б.В. Бокий  
(ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

### **ДЕГАЗАЦИЯ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА ПРОБУРЕННЫМИ ИЗ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК СКВАЖИНАМИ**

На підставі аналізу результатів вимірів змісту метану в виробленому просторі, запропоноване алгоритм розрахунків параметрів дегазації

### **DEGASSING OF THE PRODUCED SPACE BY THE MINING HOLES BORED FROM MOUNTAIN MAKING**

Based on analysis of measurements of methane produced in the space offered by calculation algorithm parameters degassing

В Донецком бассейне более половины выемочных участков шахт III категории по метану (и выше) проветриваются по схемам, предусматривающим отвод исходящих вентиляционных струй на выработанное пространство. При больших нагрузках на очистные забои дегазация окружающего угленосного массива оказывается недостаточной для обеспечения допустимого по ПБ содержания метана в утечках воздуха через выработанное пространство. В результате выхода из него взрывоопасной смеси на границе выработанного пространства с вентиляционной выработкой образуются слоистые скопления. Наиболее часто такие ситуации возникают при схемах проветривания с подсвеживанием исходящей струи, которые позволяют увеличивать добычу угля без увеличения расхода воздуха через лаву. При таких схемах воспламенение метана и пожары в воздухоотводящих выработках происходили неоднократно. В связи с этим исключить подобную опасность возможно путем применения одновременно дегазации