

УДК 622.831.312

**Е.А.Слащева**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
**И.Н. Слащев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
**А.А. Яланский**, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ДЛЯ УСЛОВИЙ ОБВОДНЕННОГО ГАЗОНАСЫЩЕННОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД**

**О.А. Слещова**, канд. техн. наук, ст. науч. співр.  
**І.М. Слещов**, канд. техн. наук, ст. науч. співр.  
**А.О. Яланський**, д-р техн. наук, ст. науч. співр.  
(ІГТМ НАН України)

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИРІШЕННЯ ГЕОМЕХАНІЧНИХ ЗАДАЧ ДЛЯ УМОВ ОБВОДНЕНОГО ГАЗОНАСИЧЕНОГО МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**E.A. Slashcheva**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**I.N. Slashchev**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**A.A. Yalanskiy**, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **FEATURES SOLUTIONS FOR PROBLEMS OF GEOMECHANICAL WATERY GAS-SATURATED ROCK MASSIF**

**Аннотация.** Компьютерное моделирование – наиболее предпочтительный и эффективный способ отработки параметров технологии горных работ. Вместе с тем, достоверный прогноз напряженно-деформированного состояния обводненного газонасыщенного массива горных пород затруднителен по причине применения чрезмерно идеализированных моделей и обобщенных эмпирических зависимостей. Такие расчеты часто приводят к некорректным результатам, которые не подтверждаются измерениями в выработках шахт.

В статье установлены особенности методологии решения задач, касающиеся оценки геомеханического, гидрогеологического и газового состояний породного массива, прогноза путей миграции водных и газовых потоков. Предложено: применять упругопластическую модель породного массива с учетом его разрушения; определять ориентацию систем магистральных трещин на основе учета слоистости массива и природных структурных дефектов; проводить учет давления газа на основе определения начала разрушения породного массива силами горного давления и дополнительного пересчета новых разрывов связей в элементах модели под воздействием газовой составляющей, действующей в зоне разрушения во всех направлениях равномерно по закону Паскаля; проводить учет влияния водонасыщения заданием гидростатических сил, которые суммируются по каждому элементу расчетной схемы, а также снижением параметров прочности глинистых пород по установленным зависимостям.

Принципы математического моделирования процессов разрушения обводненного газонасыщенного породного массива реализованы в новых функциях программного комплекса "GEO-RS", который разработан в ИГТМ НАН Украины.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, методология решения, напряженно-деформированное состояние, водонасыщенность, газонасыщенность, породный массив.

При добыче полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях в породном массиве возникает новая совокупность геомеханических, гидрогеологических и газодинамических процессов, которые постоянно медленно или быстро изменяются, имеют определенную внезапность и, в то же время, тяжело поддаются локальному контролю и управлению. Поэтому в таких условиях для прогнозирования напряженно-деформированного состояния породного массива следует отдавать предпочтение расчетным методам механики горных пород, использующим исходные геологические данные, результаты визуального обследования и оперативного инструментального мониторинга состояния пород из горных выработок. Остановимся более подробно на элементах данной методологии.

Известно, что проведение подземных горных выработок приводит к разрушению горных пород, в результате чего происходит активизация деформационных процессов, растет трещиноватость, возникают структурные нарушения, что и служит первопричиной изменения проницаемости пород, как для воды, так и для газа. В связи с этим, в методике математического моделирования предусматривается первоочередное решение геомеханической задачи, а затем, после установления изменений полей напряжений и деформаций, локальных зон разрушения пород, – переход к оценке их проницаемости и анализу фильтрационных процессов в целом. Такой подход к решению смешанных задач обусловлен не только естественной природной последовательностью протекания явлений, но и значимостью влияния текущего разрушения массива пород на изменение его фильтрационных свойств.

Под влиянием горных работ в нарушенном массиве коэффициенты фильтрации для воды увеличиваются в 10-100 раз, гравитационная емкость – в 7-14 раз, инфильтрационное питание – в 2,8-3,5 раз [1], а коэффициент общей фильтрации для газа при переходе от нетронутого массива до зоны полных обрушений изменяется на много порядков [2]. Поэтому, используя идеализированные модели и обобщенные эмпирические зависимости, не учитывая всех влияющих факторов, присущих реальному объекту исследований, провести достоверный прогноз даже одного участка массива пород крайне сложно [3]. Учесть множество факторов, обеспечить условия подобия математической модели реальному объекту, быстро вносить изменения в параметры процессов и получать визуально корректные решения на адекватной, а значит весьма сложной математической модели возможно только при использовании компьютерного моделирования. Поэтому весьма актуальным становится вопрос выбора или разработки компьютерных программ для расчетов.

Чаще всего, программы, предлагаемые для геомеханических расчетов, создавались для других целей, например, для проектирования деталей, сборок и оболочек в машиностроении. Это такие программы как SolidWorks, Cosmos, программы для расчета грунтов – Pphase2, оснований зданий и строительных конструкций – «Лира», и этот список можно продолжить. Такие программы узкоспециализированы для оценки состояния материала деталей машин, механизмов, корпусов самолетов, элементов ракетной техники и др., поэтому в ос-

новном предназначены для расчетов исключительно упругих сред, в лучшем случае упругопластических, что не соответствует реальной модели деформирования горных пород. Это является большой проблемой при расчетах геомеханических процессов в осадочных горных породах, так как для фактических условий разработки угольных шахт упругие модели дают только приближенную картину распределения напряжений и то на момент времени, пока происходит упругая деформация. Даже если правильно решается тестовая задача, сложно адекватно задать граничные условия без точного понимания их основы. Поэтому расчеты зачастую приводят к некорректным результатам, которые не подтверждаются реальными измерениями в горных выработках. Кроме того, коммерческие программные комплексы предлагаются только с компилированными кодами, поэтому их невозможно расширить под новые условия без исходного программного кода, а также оценить адекватность математической модели, заложенной в расчетные модули.

Нашими специалистами был разработан, верифицирован и апробирован программный комплекс "GEO-RS" (разработка ИГТМ НАН Украины на основе концепций [4, 5]), который на сегодняшний день успешно используется для решения сложных геомеханических и горнотехнических задач. Он позволяет исследовать многовариантные решения в сложных горно-геологических условиях пологих, наклонных и крутых пластов (слоистые структуры; слоистые, произвольные и поэлементно ослабленные зоны; имеет собственный каталог физико-механических свойств пород с возможностью их изменений и дополнений; автоматизированное изменение граничных условий с глубиной; возможность поузлового изменения нагрузок и перемещений для имитации нагрузок и отпора крепи и др.). В системе реализованы следующие принципы математического моделирования процессов разрушения обводненного газонасыщенного породного массива:

- решение проводится на базе упругопластической модели породного массива с учетом его разрушения, в которой свойства симплекс элементов модели при выполнении последовательных итераций и разрыве связей автоматически замещаются свойствами, соответствующими определенной остаточной прочности;

- ориентация систем техногенных трещин определяется на основе учета слоистости породного массива и природных структурных дефектов, поскольку, во-первых, трещиноватость пород оказывает доминирующее влияние на фильтрационные процессы, во-вторых, обводнение пород приводит к повышению пластической составляющей тензора деформаций;

- учет давления газа проводится на основе первичного определения разрушения породного массива силами горного давления и дополнительного пересчета новых разрывов связей в элементах модели под воздействием газовой составляющей, отличием которой является то, что она действует в зоне разрушения во всех направлениях равномерно по закону Паскаля;

- учет влияния водонасыщения проводится заданием гидростатических сил, которые суммируются по каждому отдельному элементу расчетной схемы, а также снижением параметров прочности глинистых пород по установленным

зависимостям.

Следует отметить, что при решении геомеханических задач физико-механические свойства пород являются доминантным фактором, так как устойчивость подземной выработки определяется соотношением прочности горных пород (их способности противодействовать силовым нагрузкам) к напряжениям, возникающим в породном массиве вокруг выработки.

С ростом глубины залегания пород от 200 до 1200 м прочность пород увеличивается в 1,5 раза для газовой стадии метаморфизма и на 5-8 % для антрацитов. Граница прочности пород на одноосное сжатие меняется в широком диапазоне, например, по данным ПО «Артемгеология» прочность песчаников 18- 212 МПа, песчаных сланцев 15-182 МПа и глинистых сланцев 8-98 МПа, а по данным ПО «Луганскгеология» соответственно 34-110, 28-62 и 18-40 МПа. Отмечается большее упрочнение с глубиной песчаника по сравнению с глинистыми породами [6].

Для конкретных условий величину разброса прочностных свойств пород характеризует коэффициент вариации. При проведении испытаний на прочность разброс часто достигает 30 % и больше даже по одной выработке, при этом влияние трещиноватости или вообще не учитывается, поскольку образцы раскалываются по трещинам при их отборе, или учитывается усреднено, путем снижения прочности трещиноватой прослойки. При проведении математического моделирования нами предложено использовать средние показатели физико-механических свойств, но с учетом коэффициентов вариации, выполняя расчеты для минимальных и максимальных значений прочности. Таким образом, при расчетах необходимо принимать во внимание глубину, горно-геологические условия залегания пород, стадию их метаморфизма, а самое главное – коэффициенты вариации определения того или другого параметра. Коэффициент вариации можно учесть методикой расчетов, которая должна предусматривать расчеты нагрузки модели при средних и критических значениях параметров физико-механических свойств пород [6]. Такой подход обладает тем преимуществом, что позволяет произвести расчеты на основе учета коэффициента вариации с заведомо худшими условиями по максимальным или минимальным значениям параметров, не надеясь при этом на высокую представительность отобранных проб.

Ценные сведения для математического моделирования процесса нагружения породного массива можно получить на основе анализа работ Г.Т. Кирничанского [7], в которых представлены результаты испытаний более трех тысяч проб горных пород Западного Донбасса, отличающихся разнообразием их свойств. Средняя плотность пород с увеличением глубины залегания от 100 м до 1000 м увеличивается от 2020 до 2530 кг/м<sup>3</sup>, в разрезе и по площади слабых пород локально размещены отдельные слои весьма крепких пород (до 40-60 МПа). При нагрузках менее (0,7-0,9)  $\sigma_{сж}$  (предела прочности на одноосное сжатие) у 50 % всех испытанных проб песчаников, 30-35 % алевролитов Западного Донбасса наблюдается линейная зависимость между напряжениями и деформациями. У большинства образцов при нагружении фиксируются значительные остаточные деформации, достигающие 30 % и более от суммарных.

Угол наклона кривых для каждого последующего цикла нагружения образца прессом увеличивается по сравнению с предыдущим значением. Вместе с тем, угол наклона аппроксимирующих прямых, соединяющих начало и конец ветвей разгрузки, остается приблизительно постоянным, что свидетельствует о неизменной величине модулей упругости при последующих циклах нагружения, а степень выпуклости кривых разгрузки характеризует упругое последствие. Примерно 35-45 % песчаников, 50-60 % алевролитов и 55-65 % аргиллитов деформируются с мягким отклонением от линейности уже при напряжениях  $(0,3-0,4) \sigma_{сж}$ . Эти пробы характеризуются большими остаточными деформациями, которые убывают при нагружении в последующих циклах. Сравнительно редко встречаются пробы горных пород (2-4 % от всех испытанных), которые деформируются с незначительным упрочнением. Таким образом, при решении упругопластических задач для горных пород Донбасса возможно использование постоянного модуля Юнга, при этом остаточные деформации можно учесть за счет заранее заданных перемещений [6].

Статические и динамические модули упругости горных пород распределены с большими положительными асимметриями. Следует обратить внимание на большие значения и практическое равенство коэффициентов вариации для модулей Юнга [6], определенных динамическим и статическим методами (для  $E_d - 62\%$  и  $E_{cm} - 63\%$ ). Очевидно, что значительный разброс данных объясняется, прежде всего, большой неоднородностью пород и в меньшей степени неравной точностью методов испытаний, что с одной стороны является предпосылкой для взаимной замены методов, а с другой стороны – однозначным подтверждением необходимости учета коэффициентов вариации.

Все нагрузки, действующие на массив горных пород разделены на три категории. К первой категории отнесены нагрузки, действующие в массиве до проведения выработок (исходное поле напряжений); ко второй – нагрузки, возникающие при проведении и эксплуатации горных выработок; к третьей – нагрузки вызванные проявлением дополнительных факторов непосредственно при разрушении массива (табл. 1).

Силовые факторы задаются на внешних и внутренних границах расчетной области. Условие заданной нагрузки определяет в узле модели значение силы (например, при постоянном действии исходных силовых полей напряжений на заданной глубине или интенсивном технологическом воздействии). Условие заданного внешнего силового поля в узлах на внешних границах расчетной схемы определяется перерасчетом:

$$F_{node_i} = \pm \sigma_n \cdot \Delta l \cdot A, \text{ Н}, \quad (1)$$

где  $F_{node}$  – узловая сила, Н;  $\sigma_n$  – нормальная компонента напряженности силового поля, Па (индексы «+» и «-» означают «слева от границы» и «справа от границы» соответственно);  $\Delta l$  – участок линии внешней или внутренней границы, относящийся к  $i$ -му узлу, м;  $A$  – толщина весомой расчетной схемы, м (для плоских расчетных схем  $A=1$ ).

Таблица 1 – Характеристика действующих в массиве нагрузок и способы их учета в геомеханической модели

Категория нагрузок	Характеристика нагрузок на массив	Способ учета нагрузки в геомеханической модели
1	2	3
1. Нагрузки до проведения горных выработок	<p>1. Вес горных пород <math>\gamma H</math>, стационарная нагрузка, определяемая глубиной разработки</p> <p>2. Нестационарное поле тектонических напряжений, вызванное геодинамическими процессами в массиве</p> <p>3. Поверхностные стационарные нагрузки, вызванные рельефом поверхности</p>	<p>1. Приложение распределенных сил по верхней границе расчетной схемы, соответствующих весу вышележащих пород</p> <p>2. Добавление вертикальных сил к узлам, окружающим элемент</p> <p>1. Приложение равномерно распределенных сил, соответствующих уровню тектонической активности по боковым границам расчетной схемы</p> <p>1. Не учитываются, так как рассматривается большая глубина разработки и равнинный рельеф</p>
2. Нагрузки при проведении и эксплуатации горных выработок	<p>1. Локальные концентрации повышенных напряжений</p> <p>2. Локальные снижения нагрузок при разрушении массива, вызванные растягивающими напряжениями</p> <p>3. Локальные сдвиговые нагрузки, вызывающие пластическое деформирование массива</p>	<p>Определяются расчетами в результате численного анализа напряженно-деформированного состояния породного массива</p>
3. Дополнительные нагрузки, возникающие при разрушении массива	<p>1. Силовое действие избыточного газового давления</p> <p>2. Силовые характеристики средств крепления и охраны выработок</p>	<p>1. Приложение сил в зонах разрушения источников избыточного газовыделения</p> <p>1. Приложение сил в местах действия активных отпоров средств крепления</p> <p>2. Задание упругих и прочностных свойств элементам, моделирующим средства крепления и охраны выработок, соответствующих их режиму работы под нагрузкой</p>

Для внутренних границ сумма узловых приложенных сил означает поверхностную мощность приложенной нагрузки, для внешней – известное значение силового потока через границу. Вес симплекс элемента устанавливается добавлением вертикальных сил к каждому узлу, окружающему элемент, а всей расчетной схемы – к силовой матрице системы.

На стадии постановки задачи задаются гидростатические силы, которые суммируются по каждому отдельному элементу. Указанные силы заменяются эквивалентными контурными силами, приложенными вдоль границ выделенного фильтрационного потока. Замена объемных фильтрационных сил контурными приводит к удобным и простым техническим приемам учета силового воздействия подземных вод.

Кроме учета силового фактора в геомеханических расчетах при решении задач фильтрации необходимо учитывать то, что тектоника существенно влияет на проницаемость породного массива. В зонах сброса, то есть с обеих сторон от плоскости смещения на расстояниях 1-20 м по результатам геофизических исследований, проницаемость пород как минимум на два порядка больше или меньше, чем вне этой зоны. Висячие крылья в полосе от 10 до 200 м, как правило, имеют проницаемость на 2-3 порядка больше, а лежащие – являются экранами для газов и воды.

Для учета трещиноватости нагружение математической модели необходимо производить вплоть до разрушения элементов, этим приемом уже частично учитывается трещиноватость, поскольку будут установлены области зарождения первичных техногенных трещин. Второй путь учета трещиноватости - заложение в модель параметров остаточной прочности, определенной в режиме запредельного деформирования.

Кроме силового воздействия, подземные воды приводят к существенному снижению прочности глинистых пород. При насыщении водой у твердых сыпучих пород силы сцепления резко снижаются или исчезают, а у скальных, полускальных или осадочных цельных пород снижаются силы сцепления между блоками. Поэтому физико-механические характеристики водонасыщенных пород при решении задач геомеханики необходимо учитывать в отдельности. Нами установлены общие закономерности как в чисто физическом, так и в методическом направлениях, касающиеся задания граничных условий и алгоритмов решения геомеханических задач для водонасыщенных сред. Горные породы, которые сформированы на глинистом цементе, в воде размокают полностью за 20 суток и менее, песчаники снижают свою прочность примерно в 1,5 раза. Снижение прочности водонасыщенных пород в зависимости от изначальной прочности пород в их естественном состоянии для песчаников и известняков описывается по корреляционной зависимости  $\sigma_{сж\text{ вл}} = 1,924 + 0,67 \sigma_{сж}$  (МПа), при коэффициенте корреляции 0,61.

В плотных осадочных горных породах вода содержится в молекулярно связанном виде и явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает значение  $I_0$ , называемое начальным градиентом, поэтому решения фильтрационных задач методом конечных элементов, которые с достаточно высокой точностью реализованы для грунтов, для горных пород требуют новых подходов: сначала необходимо определить зоны разрушения элементов, а затем произвести расчет возможных водопритоков. Анализ зон разрушения (рис. 1) позволяет оценить пути фильтрации водных потоков и объемы возможных водопритоков, включая объемы водоносных пластов и зон накопления воды.

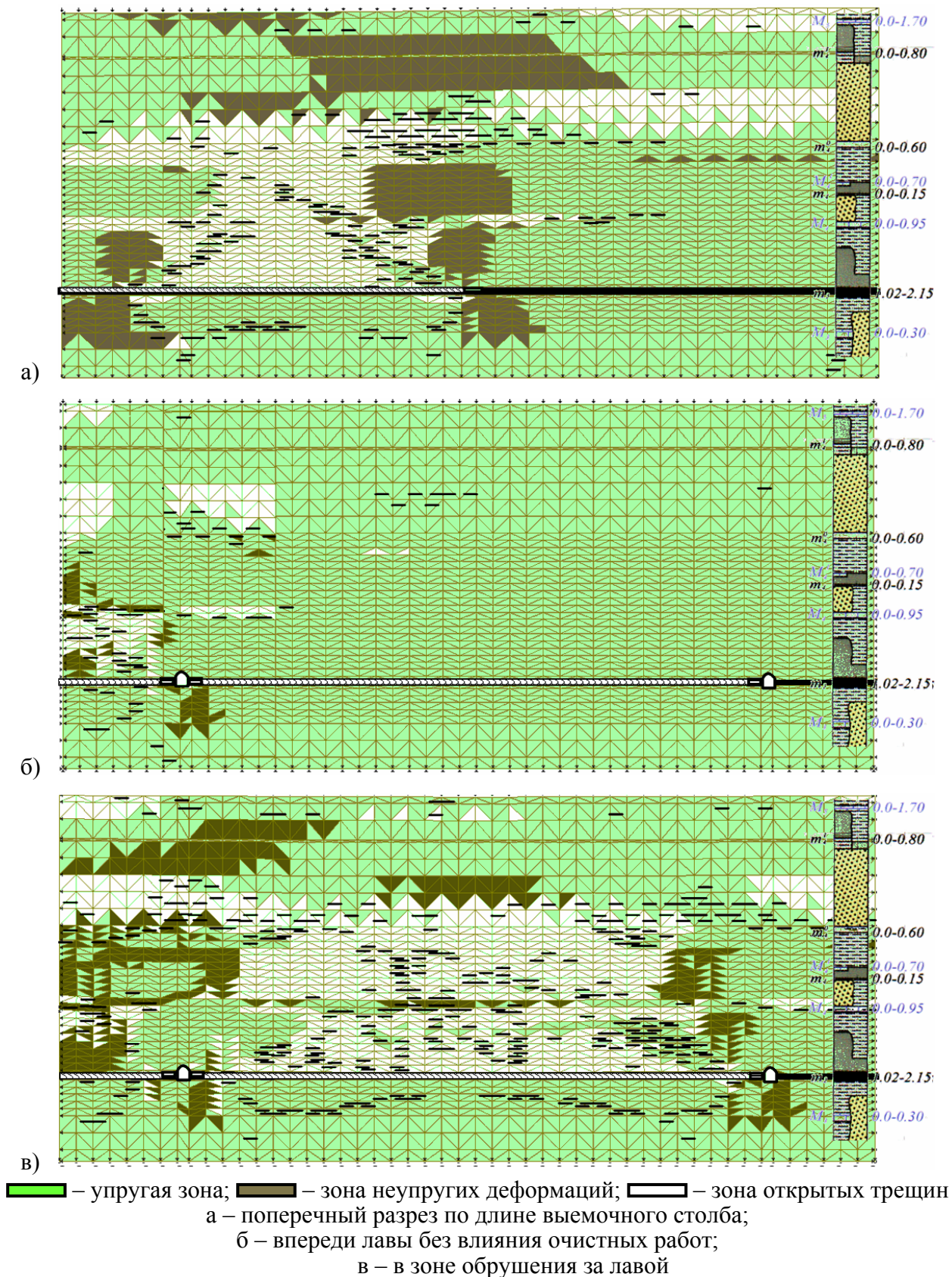


Рисунок 1 – Разрушение породного массива вокруг очистного забоя

Объемы воды вычисляются по суммарной площади разрушенных элементов модели и по среднему для зоны коэффициенту разрыхления или объемной пористости горных пород. Если считать, что зоны повышенной фильтрации со-



стоят из разрушенных элементов и провести расчеты разрушенных зон нескольких сечений, то прогнозируемый объем накопления воды будет определен произведением объема зоны фильтрации на коэффициент, характеризующий величину открытой пористости и трещиноватости:

$$V_w = V_z K_{op} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i| + 2 \sum_{i=1}^m |S_i| + \dots + \sum_{i=1}^k |S_i|}{2} \times L_z K_{op}, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где  $V_w$ ,  $V_z$  – объемы воды и водонасыщенной зоны;  $K_{op}$  – коэффициент открытой пористости;  $L_z$  – длина зоны,  $S_i$  – площадь зоны разрушенных треугольных симплекс элементов модели, которая определяется по координатам узлов.

В результате решения задач определяются: расположение и объем зон разрушения, возникших при проведении горных работ; расположение техногенных трещин и их распространение; возможные области обводнения и прорыва воды. В соответствии с полученными результатами расходы воды целесообразно рассчитывать по известным методикам и руководящим документам.

При решении гидродинамических задач в зависимости от исходных гидрогеологических параметров, необходимо учитывать не только работу шахтного водоотлива, фильтрацию между соседними водоносными горизонтами, но и связь между подземными и грунтовыми водами, особенно, связь с поверхностными водоемами [1]. Такая частная гидродинамическая задача решается с помощью программы геологической службы США «Modflow» (исходные коды в открытом доступе) на базе решений дифференциальных уравнений неустановившейся фильтрации методом конечных разностей, который учитывает затратную связь между водоносными пластами, водоотлив из шахт и др.

В условиях газонасыщенного массива горных пород, особенно при наличии зон остаточной прочности в более удаленных от контура выработок областях массива, необходимо учитывать избыточное давление газа. Предлагаемый метод основан на близкой по физической сущности воздействию на породный массив горного и газового давлений в процессе его разупрочнения. Горное давление в породах приводит к их неравнокомпонентному сжатию или растяжению. Газовое давление действует только в трещинно-поровом пространстве с одинаковой интенсивностью во всех направлениях. В активный период сдвижений (до 50-60 суток) происходит интенсивное развитие трещиноватости и разупрочнение пород. В этот период горное и газовое давление снижаются. Прочность пород снижается быстро в зависимости от их хрупкости (происходит развитие магистральных трещин), в то же время газовое давление сохраняется на достаточно высоком уровне в зависимости от фильтрационной способности массива. Поскольку развитие локальных трещин не влечет за собой полной потери несущей способности, то разрушенные породы имеют остаточную прочность и сохраняют остаточный уровень напряжений. Давление газа, напротив, имеет тенденцию только к снижению и стремится к минимальному значению по причине фильтрации газа в выработанные пространства и горные выработки.

Так как МКЭ использует принцип возможных перемещений, согласно которому работа внешних сил равна работе внутренних напряжений (дискретный аналог закона сохранения энергии), то геомеханическая модель строится на основе совместной работы сил горного и газового давлений. После окончания итерационного процесса в результате решения геомеханической задачи мы получаем значения минимальных и максимальных главных напряжений ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) и деформаций ( $\varepsilon_1$ ) без учета давления газа, после чего состояние элементов модели оценивается по критерию Кулона-Мора с учетом дополнительного давления газа:

$$(\sigma_1+p)-(\sigma_3+p)(1+\sin \varphi)/(1-\sin \varphi) - \sigma_{сж} = 0, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град;  $p$  – газовое давление, Па.

Для каждого элемента расчетной схемы вычисляется работа сил горного давления. Если деформация элемента попадает в зону разупрочнения, то дополнительная работа, реализованная силами давления газа  $W_G(\varepsilon)$  при текущем значении деформации  $\varepsilon_1$ , рассчитывается по соотношению [8]:

$$k_g W_G(\varepsilon) = k_\varepsilon (k_{in} - 1) (\varepsilon_1 (k_g a_0 - b_0) + 0,5 \varepsilon_1^2 (k_g a_1 - b_1) + 0,33 \varepsilon_1^2 (k_g a_2 - b_2) + 0,25 \varepsilon_1^2 (k_g a_3 - b_3)), \quad (4)$$

где  $a_0 \dots a_3$  и  $b_0 \dots b_3$  – регрессионные коэффициенты, задающие форму кривых разупрочнения падения газового и горного давлений, соответственно;  $k_g$  – коэффициент, характеризующий отношение величины горного давления к величине газового давления в нетронутом массиве на глубине  $H$ ;  $k_{in}$  – коэффициент, характеризующий степень пластичности породы (скорость падения напряжений в зоне разупрочнения).

Работы сил горного и газового давлений суммируются, вычисляется прирост напряжений и сил. Прирост сил автоматически распределяется между узлами расчетной схемы путем добавления к матрице сил системы, устанавливается признак продолжения итераций. На каждой последующей итерации расчет приводит к увеличению напряжений и деформаций. Затем добавленные напряжения отнимаются путем обратных вычислений. Повторение итераций производится до тех пор, пока каждый элемент изучаемой схемы при рассчитанном значении напряжений не будет иметь деформацию, соответствующую деформационной модели насыщенного газом породы.

Предложенный метод моделирования НДС массива пород, включающий учет внутрипластовых газовых давлений, более полно учитывает физическую сущность деформационных процессов в газонасыщенном массиве горных пород, и, вследствие этого, обладает повышенной достоверностью прогноза.

В целом, особенности методологии решения задач оценки геомеханического, гидрогеологического и газового состояний породного массива, прогноза путей миграции водных и газовых потоков состоят в следующем:

- учитываются основные физико-механические свойства горных пород, в том числе в фазе разупрочнения, при этом используются средние показатели того или другого параметра с учетом коэффициента вариации по методике, ко-

торая предусматривает нагрузку модели при критических параметрах;

- определяются параметры деформационных процессов, которые состоялись в массиве;

- модель адаптируется к текущей стадии деформирования реального массива по результатам оценки трещиноватости визуальными, геофизическими методами или другими инструментальными методами;

- определяются газопроницаемости и водопроницаемости участков породного массива с помощью шахтных исследований и использованием интегральных параметров напряженно-деформированного состояния пород в зонах разрывных нарушений и повышенной трещиноватости;

- определяются пути миграции водных и газовых потоков по результатам оценки магистральных трещин, зон неупругих деформаций, зон разгрузки и повышенного горного давления, исходных геологических и гидрогеологических данных;

- определяется интенсивность выделения газа в коллекторы с учетом их расположения относительно выработанных пространств, источников метановыделения, их газоотдачи и степени истощения в процессе фильтрации.

Результаты исследований использованы при оценке напряженно-деформированного состояния обводненных и газонасыщенных пород вокруг подготовительных выработок (одиночных, сближенных), очистных забоев угольных шахт, элементов камерно-столбовой системы разработки гипсовых пластов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особливості моделювання гідрогеологічних умов Донбасу // Н.А. Білокопитова, В.Ю. Синах, М.В. Токар, О.О. Подвігіна / Збірник наукових праць УкрДГРІ. – Київ, 2003. – №2. – С. 59-62.
2. Звягильский, Е.Л. Исследование процесса перераспределения метана в окрестности движущегося очистного забоя / Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, В.В. Назимко. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 195 с.
3. Бабиюк Г. В. Системное обоснование и разработка адаптивных способов надежности горных выработок: дис. ... докт. техн. наук : 05.15.04 / Бабиюк Геннадий Васильевич. – Алчевск, 2005. – 522 с.
4. Слащев, И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ / И.Н. Слащев // Уголь Украины. – 2013. – № 2. – С. 40-43.
5. Zienkiewicz, O.C. (1971) *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York.
6. Слащева, Е.А. Разработка методики экспресс-оценки напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг геотехнических объектов: дис.... канд. техн. наук: 05.15.11 / Е.А. Слащева. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2007. – 204 с.
7. Кирничанский, Г.Т. Исследование и разработка методов определения свойств горных пород и математического моделирования как основ прогнозирования устойчивости выработок: Дис... канд. техн. наук: 01.02.07.. - Днепропетровск, 1979. - 204 с.
8. Слащев, И.Н. Метод учета избыточных газовых давлений при решении геомеханических задач современными компьютерными технологиями / И.Н. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 88. – С. 112-118.

#### REFERENCES

1. Bilokopytova, N.A., Synakh, V.YU., Tokar, M.V. and Podvigina, O.O. (2003) "Osoblyvosti modelyuvannya hidroheolohichnykh umov Donbasu", *Zbirnyk naukovykh prats UkrDHRI*, no. 2, pp. 59-62, UA.
2. Zvyagilskiy, Ye.L, Bokiyy, B.V. and Nazimko, V.V. (2005) *Issledovaniye protsessa pereraspre-*

*deleniya metana v okrestnosti dvizhushchegosya ochistnogo zaboya* [Investigation of the process of redistribution of methane in the vicinity of moving longwall], Nord-Press, Donetsk, UA.

3. Babiyuk, G.V. (2005), *Sistemnoye obosnovaniye i razrabotka adaptivnykh sposobov nadezhnosti gornykh vyrabotok* [System justification and development of adaptive methods of mine workings reliability], Doctor of Technical Sciences dissertation, Mine and Underground Construction, National Mining University, Dnepropetrovsk, UA.

4. Slashev, I.N. (2013) "The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations", *Coal of Ukraine*, vol. 2, pp. 40-43, UA.

5. Zienkiewicz, O.C. (1971) *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York.

6. Slashcheva, Ye.A. (2007), The elaboration of the methodic for the express-estimation the stress-strained state of rock mass around the geotechnical installation, Ph.D. dissertation, Physical processes of mining, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UA.

7. Kirnichanskiy, G.T. (1979), *Issledovaniye i razrabotka metodov opredeleniya svoystv gornykh porod i matematicheskogo modelirovaniya kak osnov prognozirovaniya ustoychivosti vyrabotok* [Research and development of methods for determining the properties of rocks and mathematical modeling as foundations for predicting of workings stability], Ph.D. dissertation, Mechanics of Granular Bodies Grounds and Rocks, Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UA.

8. Slashchev, I.N. (2010), "Method of account the excess gas pressure when solving geomechanical problems using modern computer technologies", *Geo-Technical Mechanics*, no. 88, pp. 112-118, UA.

---

#### Об авторах

**Слащева Елена Анатольевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [slashchevayelena@gmail.com](mailto:slashchevayelena@gmail.com)

**Слащев Игорь Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [gtm.igtm@gmail.com](mailto:gtm.igtm@gmail.com)

**Яланский Анатолий Александрович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе Механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [YalanskiyA@rambler.ru](mailto:YalanskiyA@rambler.ru)

#### About the authors

**Slashcheva Yelena Anatolyevna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [slashchevayelena@gmail.com](mailto:slashchevayelena@gmail.com)

**Slashchev Igor Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [gtm.igtm@gmail.com](mailto:gtm.igtm@gmail.com)

**Yalanskiy Anatoliy Aleksandrovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [YalanskiyA@rambler.ru](mailto:YalanskiyA@rambler.ru)

---

**Анотація.** Комп'ютерне моделювання - найбільш прийнятний і ефективний спосіб відпрацювання параметрів технології гірничих робіт. Разом з тим, достовірний прогноз напружено-деформованого стану обводненого газонасиченого масиву гірських порід ускладнений через застосування надмірно ідеалізованих моделей і узагальнених емпіричних залежностей. Такі розрахунки часто призводять до некоректних результатів, які не підтверджуються вимірюваннями у виробках шахт.

У статті встановлено особливості методології вирішення задач, що стосуються оцінки геомеханічного, гідрогеологічного та газового станів породного масиву, прогнозування шля-

хів міграції водних і газових потоків. Запропоновано: застосовувати пружнопластичну модель породного масиву з урахуванням його руйнування; визначати орієнтацію систем магістральних тріщин на основі врахування шаруватості масиву та природних структурних дефектів; проводити облік тиску газу на основі визначення початку руйнування породного масиву силами гірського тиску і додаткового перерахунку нових розривів зв'язків в елементах моделі під впливом газової складової, що діє в зоні руйнування у всіх напрямках рівномірно за законом Паскаля; проводити урахування впливу водонасичення завданням гідростатичних сил, які підсумовуються по кожному елементу розрахункової схеми, а також зниженням параметрів міцності глинистих порід за встановленими залежностями.

Принципи математичного моделювання процесів руйнування обводненого газонасиченого породного масиву реалізовані в нових функціях програмного комплексу "GEO-RS", який розроблений в ІГТМ НАН України.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання, методологія методологія розв'язання, напружено-деформований стан, водонасиченість, газонасиченість, породний масив.

**Abstract.** Computer simulation is the most preferable and effective method for determining parameters of the mining technology. However, it is difficult to predict reliably a stress-strain state of the watered and gas-saturated rock massif due to usage of existing overly idealized models and generalized empirical dependences, which often lead to incorrect results and, as a rule, are not confirmed by measurements in the mine workings.

The article presents a specific methodology for solving the problems relating to the assessment of geomechanical, hydrogeological and gas states of the rock massif and predicting migration routes of the water and gas flows.

The authors propose: to use an elastoplastic model of the rock massif in view of its failure; to determine orientation of the main crack systems basing on identification of the massif layering and natural structural defects of the massif; to calculate gas pressure by taking into account a moment when the rock massif starts to failure under the action of the rock pressure and basing on additional new re-calculation of the bond breakage in the elements of the model under the impact of a gas component which acts uniformly in all directions in the failure zone in accordance with the Pascal's law; to determine impact of the water saturation by assigning the hydrostatic forces which are summed by each element of the design scheme, as well as by reduced strength parameters of the clay rocks by the established dependence.

The mathematical modeling principles of failure processes in the watered and gas-saturated rock massif were implemented in functions of the new software system "GEO-RS", which was designed by the M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, NAS of Ukraine.

**Keywords:** computer simulation, methodology for solving problems, stress-strain state, water saturation, gas-saturation, rock massif.

*Стаття постуила в редакцію 25.03.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук А.П. Круковским*