

Академик НАН Украины,
д-р техн. наук, проф. А.Ф. Булат,
канд. техн. наук С.А. Курносов,
н.с. И.Н. Слащёв (ИГТМ НАН Украины),
канд. техн. наук И.А. Ефремов,
канд. техн. наук Б.В. Бокий
(АП "Шахта им. А.Ф. Засядько")

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО – АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА НАПРАВЛЕНИЙ И ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

На основі інструментальних, геофізичних і чисельних досліджень запропоновано метод експлуатаційного прогнозу напрямків та інтенсивності газових потоків у вуглепородному масиві глибоких шахт для обґрунтування параметрів сучасних схем дегазації з метою їх ефективного використання.

EXPERIMENTALLY - ANALYTICAL METHOD THE PROGNOSIS OF DIRECTIONS AND INTENSITY GAS STREAMS

On the basis of experimental, geophysical and numerical studies the method of the operation prognosis of directions and intensity of gas streams in a rock mass of deep mines for calculation of arguments of the modern schemas of degasification is proposed with the purpose of their effective utilization.

Обеспечение энергетической безопасности Украины является приоритетной задачей современной горной науки, решение которой связано не только с эффективной и безопасной добычей угля, но и с переходом предприятий угольной отрасли на энергосберегающие технологии с добычей дополнительного энергоносителя – газа метана [1].

При повышении интенсивности горных работ и глубины разработки до 1000 м и более горнодобывающие предприятия столкнулись с дополнительными проблемами, сдерживающими темпы добычи угля. Первая проблема связана с увеличением проявлений горного давления, в особенности в условиях, когда пласты залегают в слабых боковых породах и частично переходят в пластичное или разрушенное состояния впереди очистных и подготовительных забоев. Вторая связана с увеличением подвигания очистных и подготовительных выработок, вследствие чего растёт скорость обнажения и разрушения пород кровли, что при высокой метаноносности углепородного массива приводит к интенсивному их загазированию и снижению темпов добычи угля по газовому фактору. Эти обстоятельства предопределили необходимость предварительной дегазации массива, а на ряде передовых шахт - трансформации её в добычу метана с применением эффективных, принципиально новых схем дегазации с использованием специальных технологических выработок, так называемого «газового горизонта» (предложен ИГТМ НАН Украины и апробирован на шахте им. А.Ф. Засядько).

Комплексными исследованиями установлено, что эффективность дегазации и безопасность ведения горных работ существенно зависят от своевременного и качественного прогноза геомеханического и фильтрационного состояния углепородного массива. Несмотря на то, что в угольной отрасли устойчивость сооружений прямо сказывается на рентабельности работы предприятий, их эксплуатационный прогноз практически отсутствует. При относительно удовлетворительной оснащённости шахт вычислительной техникой нет современных расчётных методик прогноза проявлений горного давления, выявления очагов скопления метана, а также их программного обеспечения, что не позволяет решать широкий круг задач горного профиля в пределах необходимого времени, достаточного для своевременного принятия решений в процессе эксплуатации. Поэтому разработка таких методик является актуальной задачей.

Анализ существующих методов прогноза направлений и интенсивности газовых потоков показал, что наиболее достоверным является экспериментально-аналитический подход, в котором точечные результаты комплексного инструментального мониторинга используются в качестве исходных данных и граничных условий для численного анализа с помощью компьютерных технологий на основе современных представлений о деформировании породного массива.

Известно, что активная миграция метана – это следствие деформационных процессов, происходящих в углепородном массиве при проведении выработок и ведении очистных работ. В связи с этим, основополагающей задачей является определение параметров геомеханического поля напряжений и деформаций в окрестности горных выработок, определение исходной и эксплуатационной трещиноватости и, как следствие, - направлений и интенсивности газовых потоков. Поэтому в основу метода прогноза должно быть положено решение двух взаимосвязанных задач – геомеханической и фильтрационной. В них определяются параметры деформирования горных пород под действием основных факторов нагружения и параметры фильтрации газа в выработки, исходными данными для которых являются результаты комплексного определения свойств и состояния массива. В этой связи предлагаемый метод прогноза должен учитывать как основные горно-геологические и горнотехнические факторы (тип и мощность слоёв кровли – почвы, отпоры крепи, движение лавы, элементы усиления и др.), так и конфигурацию, расположение зон неупругих деформаций и зон разрушения. Последним уделяется особое внимание, как участкам массива, где возникает и развивается эксплуатационная трещиноватость.

Метод включает четыре этапа последовательного решения задачи прогноза.

Первый этап заключается в анализе геологического строения и технологии ведения горных работ. Он включает сбор, обобщение и анализ данных о физико-механических свойствах каждого слоя горных пород и технологических параметрах ведения очистных работ. По данным геологической службы, исследованиям образцов горных пород, геофизического профилирования скважин, а при отсутствии экспериментальных исследований - по справочным данным, определяются: упругие и прочностные свойства пород (E – модуль упругости, ν - коэффициент Пуассона, γ - объёмный вес, τ_0 - сцепление, φ - угол внут-

ренного трения, $\sigma_{сж}$, σ_p - прочность на одноосное сжатие и растяжение); степень исходной трещиноватости массива; анизотропия прочностных и деформационных свойств; мощность и структура залегания пластов; структурная нарушенность пластов; геологические нарушения и степень ослабления пород; параметры исходного поля напряжений; водонасыщенность и размокаемость; технология крепления и способы поддержания выработок; силовые характеристики воздействия крепей на окружающий массив; шаг посадки непосредственной и основной кровли.

На втором этапе – выполняется формирование геомеханической расчётной схемы изучаемого участка углепородного массива с учётом реальных условий разработки и исследование деформационных процессов методом поэтапного нагружения модели.

Известно, что породный массив представляет собой сложноструктурную среду, процесс деформирования которой протекает с различной интенсивностью во времени со сложной и постоянно изменяющейся характеристикой зон разгрузки, повышенного горного давления и изменяющимися механическими свойствами. Применение обобщённых схем сдвижения для решения конкретных задач устойчивости углепородного массива и фильтрации газа имеет ограниченные возможности и не позволяет детально исследовать процессы, происходящие в непосредственной близости от подготовительных и очистных выработок в процессе их эксплуатации. Поэтому приняты следующие основные положения, на которых базируется геомеханическая модель.

Поскольку горные выработки являются микрообъектами для глобальной системы сдвижений и геодинамики пород, анализ деформационных процессов производится в призабойной части массива и зоне влияния выработок во временном интервале, необходимом для извлечения угля. При этом определяются зоны повышенных деформаций, поскольку именно в них происходит процесс первичного зарождения новых трещин, которые, локализуясь, формируют фронт разрушения.

Деформирование зарождается, в первую очередь, на плоскостях естественной трещиноватости, продолжаясь на плоскостях эксплуатационной трещиноватости по мере её возникновения, тогда как блоки, разделяемые этими трещинами, деформируются упруго [2].

Величины напряжений в предельно-напряжённых зонах рассчитываются с помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализующего упругопластическую модель среды с разупрочнением [3].

Параметры зон неупругих деформаций и зоны руинного разрушения (раскрытой трещиноватости) определяются управляемым итерационным процессом, который имитирует постадийное деформирование массива во времени. Адаптация стадии деформирования к реальному времени производится по результатам шахтных экспериментов [4].

В качестве граничных условий используются реальные физико-механические свойства горных пород и расчётные для данных глубин нагрузки, реальные геометрические параметры исследуемых выработок, экспериментально определённое

силовое влияние очистных работ и паспортный отпор средств крепления [4, 5].

Расчётная схема является ключевым звеном в определении напряжённо-деформированного состояния, так как в ней задаются все основные влияющие факторы и граничные условия. В процессе создания расчётной схемы выполняются следующие предварительные операции: выделяются литологические различия углевмещающих пород; производится дискретизация исследуемой области сетью треугольных элементов, при этом, в местах детальных исследований сеть сгущается до необходимых размеров; устанавливаются жёсткие связи и граничные условия; определяется силовое воздействие от веса вышележащих пород путём автоматического перерасчёта в заданные узловые силы; оконтуриваются обнажённые поверхности в масштабе геометрического подобия; для каждого элемента расчётной схемы задаются физико-механические свойства. МКЭ предусматривает применение многочисленных приёмов, позволяющих задать любые технологические и другие воздействия (в том числе и дополнительные поля напряжений от давления газа) на массив горных пород в процессе его нагружения от минимально до максимально возможных нагрузок, а также многообразие свойств деформирующейся среды. Применительно к решаемому типу задач учитываются следующие факторы:

- геометрическое подобие реальным исследуемым объектам определяется масштабным коэффициентом;

- мощность и порядок напластования углевмещающих пород уточняется по данным геофизического каротажа геологоразведочных скважин;

- упругие и прочностные свойства пород получают в лабораторных условиях для каждого слоя;

- степень структурной нарушенности и снижения прочности пород определяются по данным лабораторных испытаний трещиноватых образцов или путём использования данных испытаний образцов аналогичных пород, при этом в расчётную схему заносятся пониженные прочностные свойства на величину коэффициента структурного ослабления;

- на верхней границе расчётной схемы задают узловые силы, полученные путём перерасчёта распределённой нагрузки от веса вышележащей породной толщи;

- в пределах исследуемой области вес каждого элемента определяется путём автоматического добавления вертикальных сил к каждому узлу, окружающему элемент, а для всей расчётной схемы - к силовой матрице системы;

- в зависимости от характеристики применяемых крепей и средств усиления в узлах контактов либо прилагаются активные силовые воздействия, либо настраиваются элементы расчётной схемы под режим работы соответствующего устройства;

- прочностная анизотропия имитируется зависимостью сцепления по трещине к сцеплению в монолите, при этом учитывается, что с ростом отношения минимальной к максимальной компоненте тензора напряжений влияние структурных дефектов уменьшается и при достижении значения 0,4 практически равно нулю.

Влияние действующей лавы на проявления горного давления учитывается множителем [6, 7], который изменяется от 2,0 – 3,5 в зоне максимума опорного давления до единицы при выходе из зоны опорного давления, и определяется по результатам инструментальных измерений, а также литературным источникам [8]. Принимается, что преимущественное направление приложения дополнительной нагрузки – перпендикулярное к вынимаемому пласту. Распределённые дополнительные нагрузки пересчитываются в заданные узловые силы. При отсутствии экспериментальных данных выполняются предварительные расчёты напряжённо - деформированного состояния, результаты которых используются в постановке граничных условий для последующих решений.

Влияние избыточного газового давления учитывается по эмпирической зависимости, которая и аппроксимирована формулой [9] $P = 0,097H(am)$, где H - глубина залегания источника газовой выделения от поверхности, м. В редких случаях давление газа превышает гидростатическое в 1,02-1,22 раза, а в складчатых областях - в 1,5-1,8 раза [10]. В последнем случае, избыточное давление принимается на основании экспериментов.

Основным преимуществом МКЭ для решения поставленной задачи является возможность наложения различных по своему происхождению полей напряжений через приложение дополнительных нагрузок на соответствующие узлы и направления. Процедура МКЭ широко известна, поэтому остановимся только на основных моментах метода, используемых для решения поставленных задач. Для каждого дискретного элемента породного массива, после установки всех граничных условий, вычисляются теоретические напряжения и сравниваются с критериями прочности на сжатие и растяжение, в зависимости от того, каким нагрузкам подвергается элемент. На участке кривой нагружения породы до предела прочности на сжатие связь напряжений и деформаций упрощённо принята линейной. Предельные напряжения в области сжатия ограничены критерием Кулона. Прочность на растяжение - критерием $\tau_0/5$ (τ_0 - сцепление), которая автоматически устанавливается равной нулю для элемента, разрушенного в условиях растяжения на предыдущей итерации. Соответствие стадии деформирования при имитационном моделировании реальному времени определяется данными шахтных экспериментов [4, 5].

Ввиду значительного объёма вводимой информации для расчётов применяется автоматизированный ввод-вывод информации [5]. Реализация математической модели осуществляется комплексом программного обеспечения «ГЕОРС (v.5)» (разработан учёными ИГТМ НАНУ), который выполняет автоматизированный ввод исходной информации, логическое конвертирование исходных баз данных в матрицы для непосредственного расчёта напряжённо-деформированного состояния, анализ полученных результатов для различных геомеханических ситуаций. Система использует стандартную процедуру МКЭ, совмещённую с известным методом начальных напряжений. Это позволяет выполнять расчёты упругопластической модели среды с разупрочнением за пределом прочности в режиме «реального времени». В результате расчётов на печать выдаются значения и направления напряжений, деформаций, смещений и

сил для каждого элемента и узла расчётной схемы, а также признаки перехода элементов в неупругое (при сжатии) и "разорванное" (при растяжении) состояние. Экспорт числовых значений параметров напряжённо-деформированного состояния в системы Excel и Mathcad позволяет использовать для обработки любые графические модули Microsoft [11].

На третьем этапе - выполняется экспериментальная диагностика состояния массива, определение стадии деформирования и, в случае необходимости, корректировка расчётной схемы. Экспериментальную диагностику массива проводят геофизическими и инструментальными методами, при этом адаптацию численной модели к реальным условиям делают по нескольким направлениям.

Методами электрометрического профилирования и зондирования определяются границы зоны повышенной трещиноватости в горных породах вокруг выработок, а также в зонах ярко выраженных аномалий, в частности, вблизи и в зонах тектонических нарушений, а затем выполняется совмещение с расчётными параметрами зон неупругих деформаций и определяется текущая стадия деформирования. Выявляется зональность и расположение структурных ослаблений массива, что позволяет ввести дополнительные граничные условия в расчётную схему для уточнения полученных результатов.

По данным измерений смещений глубинными реперными станциями вычисляется коэффициент трещинной пустотности и определяется расстояние от контура выработки до качественного снижения его значения. Затем сопоставляется динамика изменения зоны предельного деформирования во времени с расчётными данными разрушения элементов при различных стадиях нагружения.

Наблюдения за контурными реперами в выработке, установленными через 50-100 м, засечками на арках крепи через 25-50 м, а также за глубинными реперами, установленными в кровлю и бока выработки на самых ответственных участках на глубину до 5-20 м, выполняются для выявления форм деформаций крепи и пучения почвы, адаптации расчётной схемы к измеренным смещениям контура выработок. Исследование нагруженности крепи виброакустическим методом по всей длине штреков с частотой измерений через каждые 2,5-10 м позволяет установить участки выработки, на которых крепь работает в режиме заданной нагрузки, взаимовлияющей деформации, либо полностью разгружена. Это, в свою очередь, позволяет выполнить корректировку исходных отпоров для средств крепления, установленных по паспортным данным.

На четвёртом этапе - выполняется анализ геомеханического состояния массива, прогноз направления и интенсивности газовых потоков.

В исследуемом массиве выделяются наиболее характерные зоны выемочного участка со сходными условиями деформирования, для которых создаётся отдельная расчётная схема: в окрестности конвейерного штрека (зона 1); вентиляционного штрека (зона 2); в очистном забое при различных скоростях продвижения лавы (зона 3); в отработанном пространстве (зона 4), рис. 1.

В предельно напряжённой зоне вблизи выработки при фильтрации газа в выработанное пространство происходит два противоположных процесса. Первый – уплотнение пород вследствие их сжатия горным давлением (правая часть

рис. 2), и второй – рост количества и размера трещин, а также разрыхление пород при запредельном деформировании в зоне обрушения от влияния предыдущей лавы (левая часть рис. 2). Первый процесс ведёт к снижению фильтрации и, соответственно, к росту давления газа и преобладает вблизи зон максимального горного давления. Второй – более характерен для участков, приближенных к обнажениям, и приводит к падению давления газа при увеличении его фильтрации.

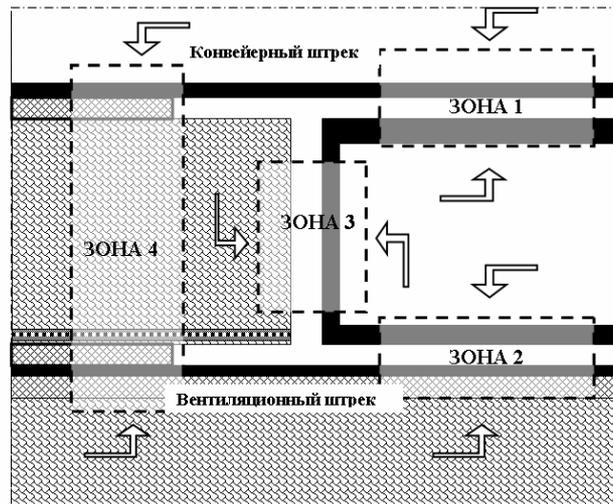


Рис. 1 – Участки со схожими условиями деформирования (стрелками показаны направления рассматриваемых сечений)

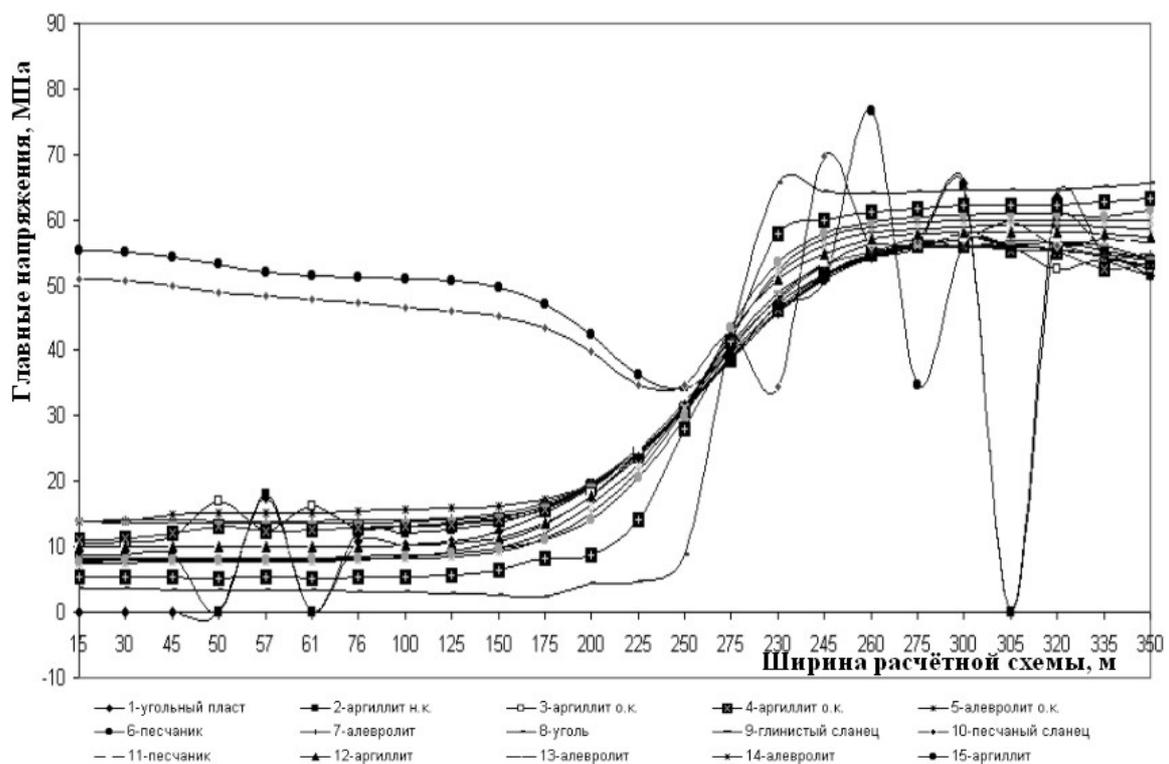


Рис. 2 – Главные напряжения по поперечным разрезам слоёв кровли

Анализ результатов расчётов напряжённо-деформированного состояния выполняется для всех характерных сечений, в том числе и в выработанном пространстве, рис. 3.

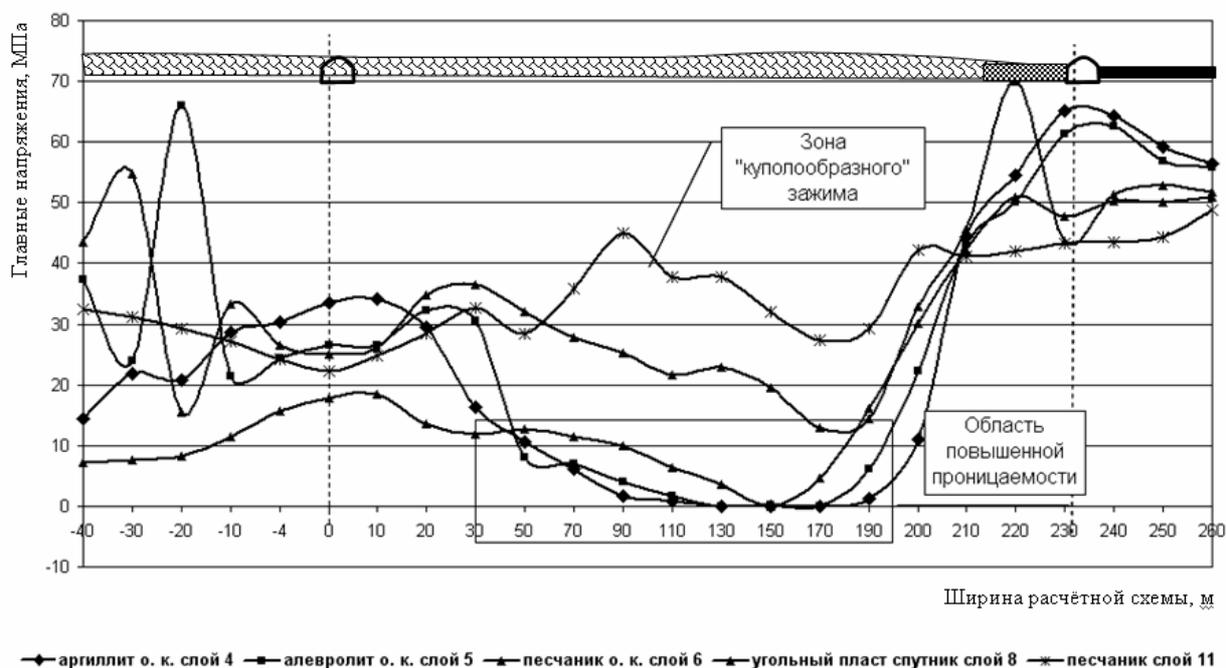


Рис. 3 – Главные напряжения по поперечным разрезам слоёв кровли в выработанном пространстве

То обстоятельство, что величина газовых потоков, в первую очередь, зависит от разности газовых давлений на смежных участках, вызванных закрытием трещин в зонах наибольшего сжатия, и раскрытием – в зонах разрыва сплошности, позволяет получить исходные данные для фильтрационного расчёта на базе МКЭ, основными из которых являются следующие.

Главные сжимающие напряжения σ_1 являются основными при определении направлений газопроводящих трещин [2, 12]. Механизм пластической деформации связан со сдвигами по площадкам скольжения в запредельном состоянии, поэтому реализация условия предельного состояния в зоне неупругих деформаций происходит на двух площадках, наклонённых к главному сжимающему напряжению под углами [8]:

$$\mu = \pm \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (1)$$

В результате анализа направлений главных и касательных (сдвиговых) напряжений τ для каждого элемента расчётной схемы, входящего в зону неупругих деформаций (ЗНД), определяется направление двух систем главенствующей техногенной трещиноватости. Строятся карты трещиноватости, которые корректируются по шахтным измерениям в подготовительных выработках, и

устанавливается предварительное направление газовых потоков от источников газовой выработки в сторону полостей разгрузки.

Зоны наибольшего и наименьшего сжатия используются для оценки снижения или увеличения проницаемости массива. Численные значения определяются по известным зависимостям [12].

ЗНД наиболее благоприятны для дегазации, так как в них массив приобретает дополнительную техногенную трещиноватость, а следовательно, повышенную (на несколько порядков) проницаемость. С другой стороны, эти зоны ещё не подверглись руинному разрушению, поэтому следует надеяться на то, что дегазационные скважины не будут разрушены. В ЗНД породы разупрочнены, разбиты трещинами, через которые дренирует освобождённый газ. Породы, подвергшиеся разупрочнению и разрыву (при растяжении), являются наиболее разрушенными и разгруженными в массиве и служат аккумуляторами метано-воздушной смеси. Очевидно, что дренаж газа из окружающих, менее разгруженных, пород, будет происходить в сторону этих зон. С технологической точки зрения ЗНД более предпочтительны для дегазации, однако свободнее всего газ перемещается в зонах разрывной нарушенности. Для определения интенсивности газовых потоков предложенный метод предусматривает использование зависимостей механики двухфазных сред, и основывается на наложении поля эффективных напряжений (в скелете) на поле порового давления. С учётом того, что сжимаемость частиц скелета мала по отношению к общей сжимаемости породы, можно считать, что деформация пористой среды равна изменению объёма порового пространства. Решение задачи фильтрационной консолидации производится путём совместного решения уравнений равновесия системы и уравнений фильтрации [13], при этом объёмная деформация элемента определяется выражением:

$$\frac{d\varepsilon_v}{dt} = \frac{n}{K} \frac{dp}{dt} - q, \quad (2)$$

где n – пористость; K – модуль объёмной сжимаемости; p – поровое давление; q – объём газа в поровом пространстве.

Процесс консолидации затухает во времени, поэтому используется логарифмический шаг во времени [14]:

$$p(t) = \Delta t(1 - \alpha)p_{n-1} + \Delta t\alpha p_n, \quad (3)$$

где p_{n-1} и p_n – давление в начале и конце интервала, α – коэффициент, зависящий от вида функции:

$$\alpha = 1 + \frac{t_{n-1}}{\Delta t} - \frac{1}{\ln(1 + \Delta t/t_{n-1})}. \quad (4)$$

После выполнения расчётов напряжённо-деформированного состояния стро-

ются графики функций давления газа в местах предполагаемой дегазации и рассчитывается дебит газоотводящих скважин, производится сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных. В связи с тем, что объект исследований при геомеханическом моделировании доводится до полного разрушения [5, 15], прогнозная оценка направлений и интенсивности газовых потоков выполняется для последующей стадии деформирования с учётом истощения источников газовыделения. Результаты расчётов фильтрации на каждом этапе корректируются в соответствии с реальным газовыделением в выработки. Эксплуатационный прогноз облегчает поиск участков скопления и дренирования метана.

Анализируя вышеизложенное, можно выделить следующие особенности методического подхода поэтапного решения задачи прогноза направлений и интенсивности газовых потоков: учитываются основные физико-механические свойства горных пород и технология ведения горных работ; определяются параметры деформационных процессов, происходящих в углепородном массиве с учётом его разупрочнения, при этом многовариантный поиск решения задачи выполняется методом конечных элементов; адаптация модели к текущей стадии деформирования производится по результатам шахтной экспериментальной диагностики, в том числе с привлечением геофизических методов; для определения газопроницаемости участков породного массива используются параметры зон разрывных нарушений и повышенной трещиноватости; применяется подход, при котором результаты решения геомеханической задачи с учётом силового действия избыточного газового давления, являются базовыми для решения фильтрационной задачи; направление газовых потоков устанавливается по главенствующей эксплуатационной трещиноватости с учётом зон неупругих деформаций, разгрузки и повышенного горного давления; учитывается расположение источников газовыделения; интенсивность газовых потоков определяется с учётом реальной газообильности и степени истощения источников метановыделения; используются экспериментальные данные как для корректировки модели деформирования, так и для сравнительного анализа полученных результатов.

Обоснованность и правильность выбранного направления методического подхода и основных его положений подтверждаются результатами натурных исследований, выполненных на шахтах А.Ф. Засядько и «Краснолиманская».

Экспериментально доказано, что эффективность дегазации существенно зависит от применяемой схемы дегазации и значительно повышается при использовании схем, предусматривающих наличие специальной выработки «газового горизонта», являющейся коллектором газа в процессе дегазации углепородного массива. При этом важную роль играют параметры заложения и охраны этой выработки, которые должны учитывать как геомеханические особенности очистных работ, так и процессы сдвижения массива в смежном выработанном пространстве, ориентацию выработок относительно действия вектора главных напряжений, и обеспечивать устойчивость на весь период эксплуатации.

Важное значение имеют также вопросы определения рациональных параметров бурения дегазационных скважин при дегазации угольных пластов и

вмещающих пород, которые должны включать: направление, длину, диаметр, углы наклона и разворота скважин, а также параметры их герметизации.

Исследованиями установлено, что наиболее рациональным направлением бурения дегазационных скважин является их ориентация вдоль оси выработок навстречу забою лавы с отклонением от оси в сторону отработанного пространства. При этом метан в скважины поступает, в основном, из области разгруженного массива, расположенного на границе между выработанным пространством двух смежных лав. Дебит метана из скважин, расположенных вне зоны влияния лавы (более 700 м до лавы) не превышает 1-2 м³/мин. и постепенно увеличивается при приближении очистных работ. Однако, когда скважины попадают в зону опорного давления лавы (40-250 м) дебит метана снижается до 1 м³/мин, а затем, после пересечения лавой местоположения забоев скважин, увеличивается до 10 м³/мин.. При этом, концентрация метана в газозадушной смеси достигает 70 % и более. Установлено, что период изменения концентрации и дебита метана зависит от шага посадки основной кровли и может колебаться в больших пределах.

Анализ дебита метана из дегазационных скважин показал, что экономически целесообразно бурить большое количество коротких скважин (длиной 80-100 м), чем длинных (250 м и более), так как длинные скважины в зоне обрушения пород кровли разрушаются и перекрываются. Основным источником метана являются газоносные песчаники и пласты-спутники в купольных структурах над лавой, поскольку они легко отдают свободный и десорбированный газ в зонах разгрузки.

Для условий пласта m₃ шахты им. А.Ф. Засядько выявлены аномальные зоны повышенной трещиноватости угленосного массива вокруг выработок «газового горизонта», вызванные влиянием отработки предыдущих лав, подработки и надработки массива подготовительными выработками, характеризующиеся смыканием трещин в результате периодической пригрузки, образованием новых трещин и закрытием старых. Повышенная трещиноватость сопровождается зональностью нагрузки на арочную крепь при расположении выработок в разгруженных породах или в породах с повышенной прочностью (алевролиты). Нагрузки от минимальных (при расположении выработок в подработанном массиве, сложенном аргиллитами) возрастают в 2-2,5 раза (в зонах влияния очистных работ). По периметру выработок максимальная нагрузка приходится на верхняк крепи и почву. Влияние очистных работ начинает сказываться: по простиранию обрабатываемого пласта впереди забоя лавы на расстоянии 350-300 м, активное влияние – на расстоянии 200-150 м, опорное давление лавы – 50-40 м; по восстанию пласта в результате взаимного влияния процессов сдвига в надугольной толще ранее отработанных лав и очистных работ в действующей лаве, активное опорное давление на выработки несколько снижено и проявляется на расстояниях 130-125 м и до 40 м, соответственно.

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования подтвердили достоверность экспериментально – аналитического метода прогноза направлений и интенсивности газовых потоков для сложных условий отработки

газоносных угольных пластов высоконагруженными лавами на глубоких горизонтах, что позволяют определить рациональные параметры прогрессивных схем дегазации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А.Ф. Концепция комплексной дегазации углепородного массива для условий шахты им. А.Ф. Засядько // Геотехническая механика, 2002.- Вып. 37. - С. 10-17.
2. Линьков А.М., Ледус Е.В., Петухов И.М. Влияние скорости внедрения в массив горных пород на характер его деформирования. – ФТРПИ, 1985, №1, - С. 34-48.
3. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987. - 221 с.
4. Яланский А.А., Курносое С.А., Слащёв И.Н., Сафонов А.И. Методические особенности экспресс-оценки напряжённо-деформированного состояния породного массива вокруг подготовительных выработок глубоких шахт // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XV Межд. научн. школы.- Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2005. - С. 266-268.
5. Слащёва Е.А. Разработка экспресс-методики прогноза устойчивости геоматериалов по изменению их электропроводящих свойств под воздействием гидрогеологических факторов // Геотехническая механика, 2003. - Вып. 42.- С. 143-148.
6. Фотиева Н.Н. Расчёт обделок тоннелей некругового поперечного сечения. –М.: Стройиздат, 1974.-240с.
7. Амосин Б.З. Учёт влияния торца при расчёте нагрузок на крепь протяжённых выработок и камер // Шахтное строительство, 1979. - №12. - С. 15-18.
8. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. Учебник для вузов. – М.: Недра, 1982. – 270 с.
9. Повышение безопасности труда в глубоких шахтах. Донецк: «Донбасс», 1973. - 245 с.
10. Аникиев К.А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях. М.: Недра, 1964. - 361с.
11. Слащёва Е.А., Яланский Алекс. А. Автоматизированная статистическая обработка промежуточной и выходной информации программы «Геомеханика» на основе персональной ЭВМ // Геотехническая механика, 2002. - Вып. 40. -С. 102-105.
12. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов, М.^ Недра, 1983. - 280 с.
13. Айруни А.Г. Основы предварительной дегазации угольных пластов на больших глубинах.. М.: Наука, 1970. – 80 с.
14. Hwang C. T., Morgenstern N.R., Murray D.W. On solution of plain strain consolidation problems by finite element methods. "Can. Geotech. J". #109, 1971. – P. 109-118.
15. Фадеев А.Б., Абдылдаев Э.К. Расчёт деформируемости горных выработок с учётом разрыхляемости горных пород. – В кн.: Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород. Илим, Фрунзе, 1979. 126-134 с.