

УДК 622.411.33

И.А. Павлов, И.В. Курта, М.А. Волков

**СИНЕРГЕТИКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ
ДИНАМИКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ
И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ
ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ОТРАБОТКЕ
УГОЛЬНОГО ПЛАСТА**

Приведена методика оценки взаимного влияния геомеханических и газодинамических процессов на примере отработки угольного пласта Воркутского месторождения.

Ключевые слова: метан, фильтрация, пласт, горный массив, деформации.

Из анализа достаточно пред- ставительного круга работ, посвящённых изучению и решению вопросов фильтрации газов в горных породах следует, что связь фильтрационных процессов и механического (напряжённо-деформированного) состояния (НДС) фильтрующих сред реально присуща и уплевмещающим толщам и угольным пластам, в частности. В такой постановке аналитические решения фильтрационных задач, даже в частных случаях редко допускают получение точных (тем более практически-значимых) результатов. В естественных («невозмущённых» технологически) состояниях в массиве существует термодинамическое равновесие между сорбированным и свободным метаном. Изменение НДС при наработке либо подработке, определяемое развитием фронта очистных работ (ФОР), обуславливает образование дополнительных систем трещин, нарушение отмеченного равновесия, возрастание количества десорбирующегося метана и усиление процесса его миграции (фильтрации)

в массиве в соответствии с имеющимся градиентом давления газа.

Анализ известных аналитических подходов к возможной оценке влияния вариантов развития ФОР на газодинамику массива показал достаточно полную ограниченность использования таких решений. В тоже время степень влияния фактора развития ФОР на изменение взаимосвязанных геомеханических и газодинамических параметров массива горных пород (МГП) может быть оценена при использовании экспериментально-аналитического подхода к решению данного вопроса. Разработанная методика решения подобных задач принципиально содержит следующие, поэтапно решаемые, положения:

- анализ и обобщение геологической и горно-технической информации по конкретному участку шахтопласта либо шахтного поля;

- оценку НДС массива и его изменчивости (в функции координат и времени), на базе формируемых горно-геомеханических моделей и расчётных схем;

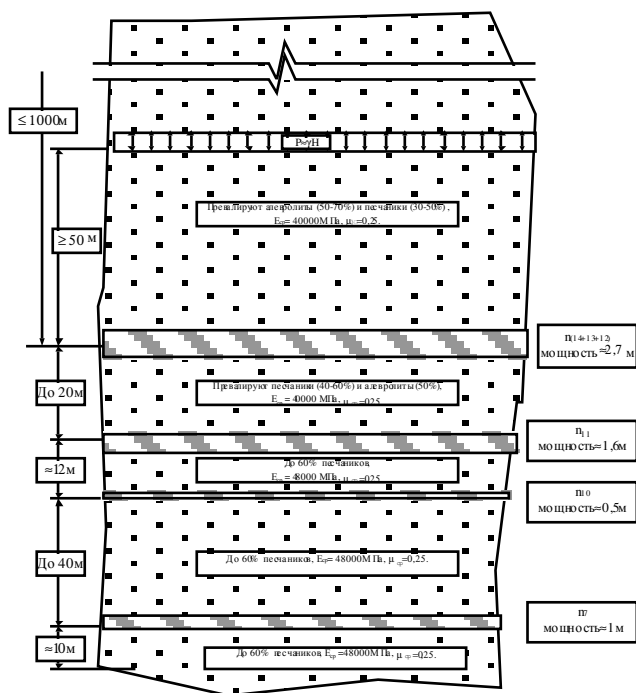


Рис. 1. Горно-геомеханическая модель (ГМ) всей исследуемой области МГП с заданными статическими граничными условиями ($P = \gamma H$), отвечающими действующим и перспективным глубинам (H) разработки месторождения (принято $P = 25$ МПа)

- оценку изменчивости параметров процесса фильтрации метана в массиве, в функции специфических параметров его НДС;

- расчет дебитов скважин в характерных зонах массива;

- разработку систем дегазации (и возможную корректировку параметров системы вентиляции).

На базе принятого к использованию экспериментально-аналитического метода граничных элементов (МГЭ) и модифицированного его варианта – метода разрывных смещений (МРС) были выполнены исследования взаимосвязанных (синергетических) горногеомеханических и газодинамических факторов, принципиально определяющих выбор рациональных па-

раметров конкретных схем комплексного извлечения энергетического сырья из недр.

Рассматривались условия обработки пластов угля Воркутского месторождения в «придонной» (перспективной) зоне мульды и, в частности, пластов $n_{14+13+12}$, n_{11} и др. Рассматриваемый метод (МРС) позволяет в решаемой задаче о НДС вмещающего пласт n_{11} и его выработанного пространства (ВП) массива получить необходимые данные о всех компонентах полей напряжений (σ_{ij}), деформаций (ϵ_{ij}), перемещений (δ) и, функционально связанных с ними величинами объемной деформации Θ , определяющих изменение газопроницаемости пород, а также, в частности, для достаточно значимых для решения проблемы аэрологии

выемочного участка вопросов, утечек воздуха через зону ВП₁. При этом решаемая проблема, как следует из предыдущего, синергетично рассматривается с технологией выемки угля, то есть с параметром нагрузки на очистной забой (A_i , т/сут) и, соответственно, со скоростью его продвижения (V_i , м/сут).

Реализация приведенной методики (МРС) требует разработки соответствующих горногеомеханических моделей (ГМ) исследуемых объектов и расчетных схем (РС), которые были сформированы на основе обобщенных геологических и горногеомеханических данных и примеры которых приведены на рис. 1 и 2.

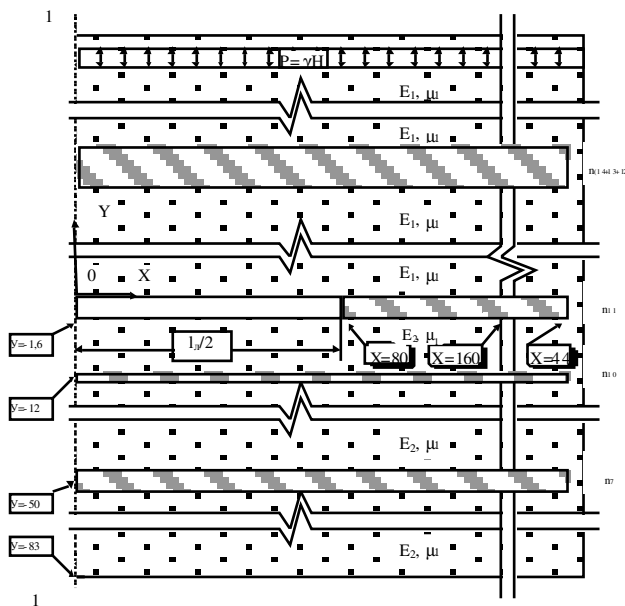


Рис. 2. Расчётная схема для исследования НДС надрабатываемого массива в “первой” зоне развития ВП (от монтажной камеры); “1-1” – ось симметрии ГГМ

Разработка расчётной схемы, приведённой в качестве примера на рис. 2 и отражающей НДС неоднородных, многосвязанных, квазиконтинуальных сред, базируется на результатах анализа состояния пород кровли и почвы пласта «Четвёртого», переменных в пространстве-времени в рамках ведения очистных работ на выемочных участках. В отмеченном аспекте в пределах ВП необходимо рассматривать, в основном, три характерные зоны (от монтажной камеры по направлению выемки столба): зона ВП, в которой породы кровли превалирующе зависят, не передавая нагрузки от пород налегающей толщи на почву; зона ВП, в которой нагрузка на надрабатываемый массив, передаётся по площади нестационарной в пространстве-времени. Эта зона, постепенно расширяясь по мере выемки пласта n_{11} и развития выработанного

пространства, переходит в зону, где нагрузка от деформируемых (разрушающихся и уплотняемых) пород кровли полностью (по всей ширине ВП за исключением околоштрековых участков) передаётся на надрабатываемый массив (очевидно, что в последнем случае ширина такой зоны – в пределе – отвечает длине лавы). Поскольку скорость отработки выемочного участка – достаточно чётко фиксируемый параметр, то пространственно-временные аргументы, определяющие НДС надрабатываемой толщи, допускают их простую инженерную оценку, что позволяет изучать нестационарный процесс в квазистационарной (пошаговой) постановке. Отмеченные методические особенности использованы при исследовании напряжённо-деформированного состояния под- и надрабатываемых углесодержащих толщ, залегающих в кровле и почве пласта n_{11} и реализовываны в соответствующих расчётных схемах.

Например, для первой из рассмотренных зон надработка имеет место по всей ширине ВП (лавы) и реализуется во времени, отвечающем продвижению очистного забоя на расстоянии, равное приближённо зоне зависания пород кровли (рис. 2). На границе исследуемой зоны массива приложена нагрузка $P = \gamma H$. В подстилающих пластах n_{11} породах изучается область: $0 \leq x \leq 160$ м и $-1,6 \leq y \leq -83$ м, что необходимо отвечает надрабатываемой толще вплоть до пласта «Пятого» (n_7).

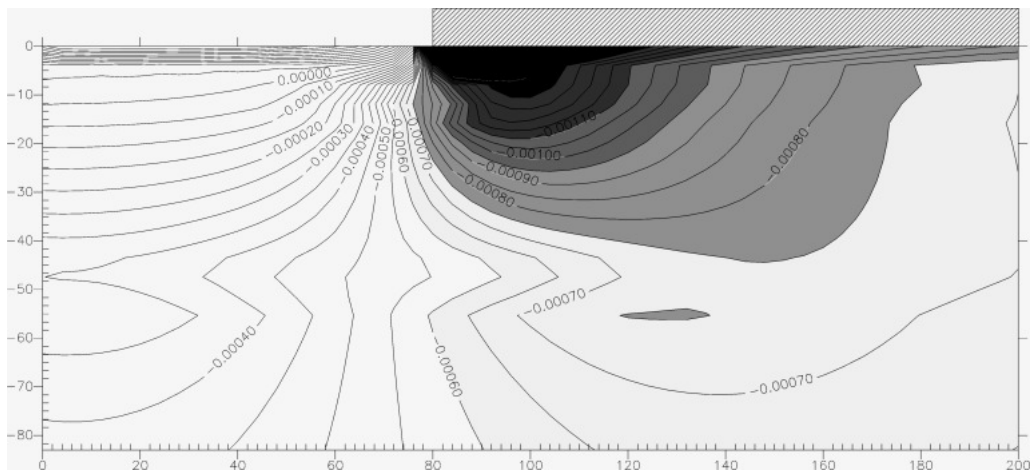


Рис. 3. Поле параметра $\theta = \varphi(x, y)$ в исследуемой области (для «первой зоны»; при времени продвижения забоя лавы ~ 15 суток и отходе её от монтажной камеры на ≈ 60 м)

Аналогично формируются параметры РС и для иных зон ВП.

В расчётных схемах ось Z – нормальна к плоскости рисунков. Для адекватного условиям природы плоскодеформированного состояния массива выполняются численные эксперименты, оценивающие численное значение полей σ_{ij} , ε_{ij} и θ_i . Деформационные характеристики, приведённые выше для обобщённых структурных элементов массива (рис. 1), пересчитаны для указанного вида НДС. Иррациональность рассмотрения числового материала результатов расчётов параметров σ_{ij} , ε_{ij} , θ_i – очевидна, поэтому анализ пространственно-временной изменчивости НДС пород наработываемой толщи удобно фрагментарно представлять в графической интерпретации (в виде построения полей компонентов σ_x , σ_y , ε_x , ε_y и др.). По данным о полях ε_{ij} для точек массива рассчитываются значения θ_i как функции $\theta_i = f(x, y)$. Поскольку общей задачей настоящих исследований является конкретное изучение синергетики геомеханических и

газодинамических факторов в наработываемой пластом «Четвёртым» толще пород, то ниже приводятся наиболее чувствительные в указанном аспекте данные о расчётах компонентов полей ε_{ij} и θ_i . Подчеркнём ещё раз, что рассчитанные параметры отвечают нестационарности процесса изменения полей ε_x и ε_y во времени. Количественно это учитывается за счёт выполнения пошагового изменения условий нагружения исследуемых областей массива в рассмотренных выше зонах.

Пример результатов выполненных исследований для первой зоны приведены на рис. 3.

Аналогично рассчитываются параметры ε_{ij} и θ_i и для всей зоны наработки (в пределах ВП по конкретным пластам – в данном примере по пласту n_{11}). Отметим, что показатель $\theta_i = \varphi(x, y)$ в наибольшей мере отражает возможность изменения газодинамических (коллекторских!) свойств массива, т.к. физически определяет соотношения $\Delta V/V$, где: ΔV – измене-

ния единичного объёма в массиве, V – первоначальный объём.

Методически, как следует из приведенного материала, анализ изменений НДС надработанной толщи необходимо выполнять параллельно с соответствующим изменением газодинамических параметров этого же объекта, т.е. в режиме оценки их взаимовлияния (синергетики). Базирующийся на использовании разрабатываемых расчётных схем, такой анализ позволяет оценить пространственно-временное развитие в надработанной толще превалирующих зон газоотдачи, пропорциональных соответствующим изменениям газопроницаемости пород.

Прогнозная оценка геомеханогазодинамического состояния пород надрабатываемого массива выполняется, как отмечалось, дифференцировано по рассмотренным выше зонам развития выработанного пространства того или иного пласта (в частности n_{11}) во времени. Отметим, что предварительная оценка НДС массива показывает достаточную значимость изменения компонентов σ_{ij} и ε_{ij} на глубинах вплоть до \sim пласта «Пятого» (n_7). Ниже по разрезу эффект надработки сказывается несущественно. Таким образом, взаимовлияние геомеханического и газодинамического факторов целесообразно исследовать в диапазоне междупластья $n_{11}n_7$.

На основании исследований можно рассмотреть синергетику указанных факторов. В первой зоне (отсутствие пригрузки на подстилающий пласт n_{11} массив) вплоть до расстояний от монтажной камеры ≤ 75 м (время ~ 20 суток) развивается область упругого восстановления объёмной пористости пород практически по всей ширине лавы. Активно изме-

няется пористость в зоне $n_{11} \div n_{10}$, достигая значимых величин и на глубинах залегания пласта «Пятого» (n_7). В указанных пространственно-временных диапазонах следует ожидать увеличения газовыделений в выработанное пространство пласта из надработанной угленосной толщи.

В процессе изменения площади пригрузки (т.е. в пределах второй зоны – зоны нестационарных пригрузок) начинают значимо изменяться как геомеханические параметры (ε_j и θ), так и потенциальная газоотдача угле-вмещающей пачки в пределах мощности $n_{11} \div n_7$. В центральной области ВП в связи с расширением здесь пригрузки пород почвы происходит снижение их пористости (соответственно – и газоотдачи!). Отмеченный процесс в этой зоне постепенно перемещается по направлению к околоштрековым участкам, непосредственно вдоль которых разгруженная область сохраняется на всём протяжении ВП. Таким образом, во второй зоне наибольшая разгрузка угле-вмещающей надрабатываемой толщи в пределах $n_{11} \div n_7$ имеет место в ВП на расстояниях от монтажной камеры около 300 м (ориентировочно, во времени через $\sim 80 \div 90$ суток). На расстояниях около 400 м, через $\sim 100 \div 110$ суток происходит снижение порового объёма в толще $n_{11} \div n_7$ вплоть до перехода выемочных работ в последнюю (третью) зону развития ВП. Здесь, как отмечалось, на породы почвы передаётся давление, приближённо соответствующее геостатическому (на глубине «придонной» части мульды), что характерно при развитии ВП в пространстве \sim на 650 м (во времени \sim на 180 сутки с момента отхода лавы от монтажной камеры). Можно констатировать, что надработанное междупластье в этой зоне восстанавлива-

ет характерное для него «невозмущённое» (до надработки) состояние с соответствующими для него геомеханическими параметрами и приближённо «фоновым» уровнем газоотдачи. Отметим, что в то же время в прилегающих непосредственно к очистному забою породах междупластья здесь имеет место существенное увеличение эффективной пористости пород (особенно в области $n_{11} \div n_7$ и далее, вплоть до больших глубин). В целом этот участок, за исключением $\sim 20^m$ метровых концевых частей лавы, сопоставим по прогнозным оценкам метановыделений в ВП с рассмотренной выше первой зоной.

При развитии выработанного пространства по направлению к демонтажной камере, указанное прогнозное соотношение геомехано-газодинамических характеристик надрабатываемой толщи сохраняется приблизительно неизменным (при отсутствии неизвестных изменений геологического строения этой части массива).

По мере приближения очистного забоя к демонтажной камере параметры НДС надрабатываемого массива изменяются зеркально рассмотренным выше для условий первой зоны.

Рассмотренные результаты взаимодействия факторов механического и газодинамического состояния пород надрабатываемой защитным пластом «Четвёртым» углевмещающей толщи являются базовыми при дифференцированной прогнозной оценке её метаноотдачи, а соответственно исходными данными для разработки схем дегазации междупластья $n_{11} \div n_7$ с высокой эффективностью метанозабора из него.

Эти же данные служат основой построения варианта типовой схемы комплексного извлечения энергоносителей «уголь-метан» при повышении уровня безогасного ведения горных работ на выемочных участках пластов за счёт «подавления» в выработках газового фактора.

Основополагающие принципы построения методики количественных оценок геомеханических и газодинамических состояний возмущенного подземными горными работами углевмещающего массива и ее численная реализация позволяет осуществлять выбор наиболее эффективных схем добычи комплексного (уголь-метан) сырья в условиях действующих шахт Печорского (и иных) бассейнов РФ. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Павлов Игорь Александрович – доцент, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный горный университет, lgAIPavlov@gmail.com

Курта Иван Валентинович – аспирант, Санкт-Петербургский государственный горный университет, IvanKurta@yandex.ru

Волков М.А. – СУЭК-Кузбасс, начальник отдела перспективного планирования.

