

Академик НАН Украины,
д-р техн. наук, проф. А.Ф. Булат,
д-р геол.-мин. наук, проф. В.В. Лукинов,
канд. техн. наук А.П. Клец, м.н.с. А.П. Круковский,
м.н.с. В.В. Круковская (ИГТМ НАН Украины)

ФИЛЬТРАЦИЯ МЕТАНА В СЛОИСТОМ МАССИВЕ ПОДРАБОТАННЫХ ПОРОД КРОВЛИ

З урахуванням впливу виду напруженого стану на коефіцієнт проникності, за допомогою методу кінцевих елементів розв'язана задача фільтрації метану в зоні впливу очисної виробки. Наведені розподіли тиску, поля швидкостей руху метану та зони його концентрації. Розглянуто внесок у загальний дебіт метану з газонасичених пісковиків та вугільних пропластків.

FILTRATION OF METHANE IN THE LAMINATED ROCK MASSIF OF THE UNDERMINING ROCK ROOF

Application of a method of final elements for the decision of methane filtration task in coal-rock massif in the zone of influence of mine coal face. Effect of stress aspect on a coefficient of transparency is taken into account. Distributions of pressure, field of methane driving speeds and zone of its concentration are resulted. The contribution to the common consumption of methane from the sandstones containing gas, and coal is considered.

Увеличение глубины разработки угольных месторождений приводит к качественному и количественному изменению напряженно-деформированного состояния горного массива в зоне влияния очистной выработки, интенсификации газовыделения из угольных пропластков и метаносодержащих пород кровли, обуславливает увеличение притока метана из подработанных пород кровли в очистной забой. В результате усложняется производственная обстановка на добычных участках, снижаются темпы добычи угля, не реализуются технические возможности современной высокопроизводительной добычной техники.

Дегазация подрабатываемого углепородного массива возможна скважинами, пробуренными как с поверхности, так и из подземных выработок. Но в обоих случаях выбор направления бурения и параметров дегазационных скважин не должен быть случайным. Одним из путей решения этой проблемы является исследование поведения горного массива и движения метана в нем на имитационных компьютерных моделях.

Однако реализация этого затруднена ввиду отсутствия достаточного объема исследований по проблеме зависимости фильтрации газов от геомеханических процессов, происходящих при подработке метаносодержащих горных пород. Уровень теоретических и экспериментальных исследований в этой области говорит о необходимости разработки методов расчета области фильтрации, коэффициентов проницаемости, давлений метана, скоростей его движения, расходов, а также мест его возможного скопления – техногенных коллекторов – в зависимости от значений компонент тензора напряжений в каждой точке исследуемой области.

В нетронутом углепородном массиве поле напряжений можно считать уста-

новившимся, с начальными значениями главных напряжений, равными (в случае плоского деформированного состояния):

$$\begin{cases} \sigma_1^0 = \lambda \gamma H, \text{ горизонтальная составляющая,} \\ \sigma_2^0 = \gamma H, \text{ вертикальная составляющая,} \\ \sigma_3^0 = (1 + \lambda) \nu \gamma H, \text{ горизонтальная составляющая,} \end{cases}$$

где γ – плотность вышележащих пород, Z – глубина расположения выработки, λ – коэффициент бокового распора, для условий шахты им. А.Ф. Засядько $\lambda=1,8$ [1], ν – коэффициент Пуассона.

Проведение очистной выработки значительно нарушает равновесие пород, вмещающих разрабатываемый угольный пласт, приводит к перераспределению поля напряжений. При подработке пород кровли разгружается вертикальная составляющая тензора напряжений. В результате происходит смещение пород кровли в направлении выработанного пространства, более слабые породы расслаиваются, их проницаемость значительно увеличивается. От величины и направления составляющих тензора напряжений зависит коэффициент проницаемости, характеризующий пропускную способность нарушенного горного массива. Поэтому для решения задачи о фильтрации метана сначала необходимо изучить напряженно-деформированное состояние горного массива в зоне влияния очистной выработки.

Напряженное состояние элемента горной породы характеризуется величинами главных нормальных напряжений:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (1)$$

Для прогноза и оценки возможности возникновения разрушения горных пород вблизи выработки и определения коэффициентов их проницаемости будем использовать следующие параметры: приведенную разность максимальной и минимальной компоненты главных напряжений Q и приведенную минимальную компоненту главных напряжений P , определяемые по формулам

$$Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\lambda \gamma H}, \quad (2)$$

$$P = \frac{\sigma_3}{\gamma H}. \quad (3)$$

Для оценки состояния, в котором находятся горные породы, в механике горных пород применяется также параметр Лоде-Надаи, вычисляемый по формуле:

$$\mu_{\sigma} = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (4)$$

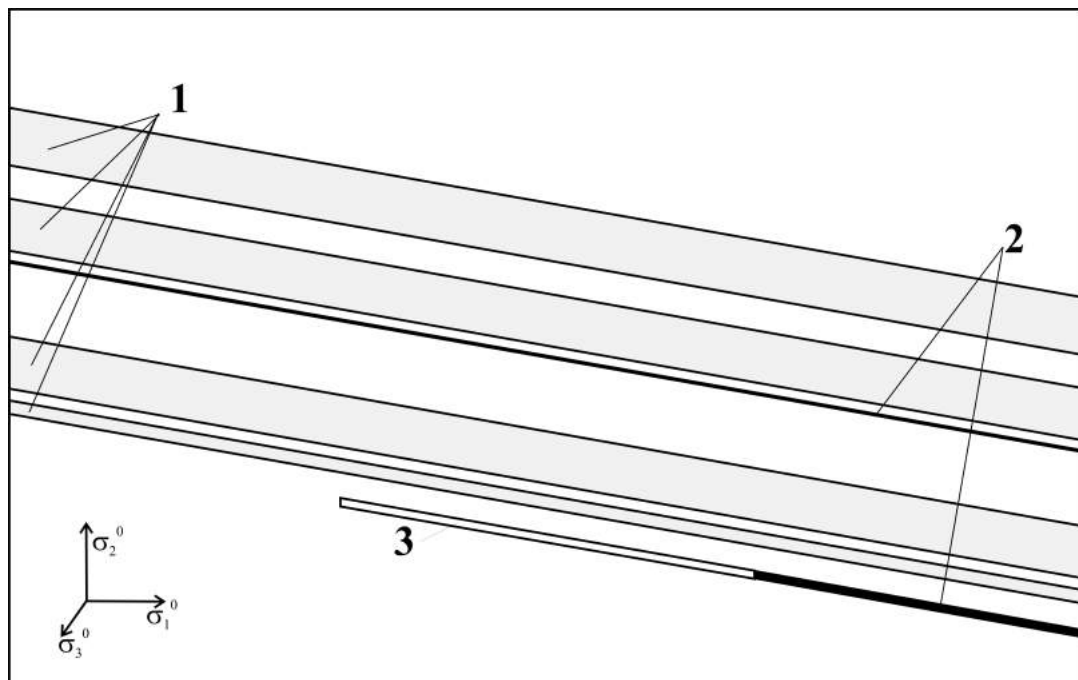
Параметр Лоде-Надаи μ_{σ} характеризует вид напряженного состояния (при $\mu_{\sigma} = -1$ реализуется обобщенное растяжение, при $\mu_{\sigma} = 0$ – обобщенный сдвиг, а при $\mu_{\sigma} = 1$ – обобщенное сжатие).

Решим задачу о напряженно-деформированном состоянии в упруго-пластической постановке и задачу о фильтрации метана в выработанное пространство лавы с начальными и граничными условиями, соответствующими 16-й западной лаве шахты им. А.Ф. Засядько.

Таблица 1 – Свойства пород

| Порода | модуль упругости, E, МПа | коэффициент Пуассона, ν | сцепление, C, МПа | угол внутреннего трения, φ , ° | прочность на растяж., σ_p , МПа |
|----------|--------------------------|-----------------------------|-------------------|--|--|
| Песчаник | $3 \cdot 10^4$ | 0,27 | 7 | 40 | -5 |
| Аргиллит | 10^4 | 0,27 | 3,5 | 30 | -2 |
| Уголь | $5 \cdot 10^3$ | 0,27 | 1,75 | 30 | -1 |

Длина лавы, расположенной в слоистом горном массиве, – 250 м (рис. 1). Мощность разрабатываемого угольного пласта – 1,7 м, глубина разработки – 1200 м. Исследуемая плоскость расположена за лавой на таком расстоянии, на котором не сказывается влияние забоя. Свойства основных пород, используемые при расчетах, приведены в таблице 1.



1 – газонасыщенные песчаники, 2 – уголь, 3 – 16-я зап. лава

Рис. 1 – Расчетная схема

После проведения расчетов, выполненных методом конечных элементов, получены следующие распределения параметров Q , P и μ_σ (рис. 2-4):

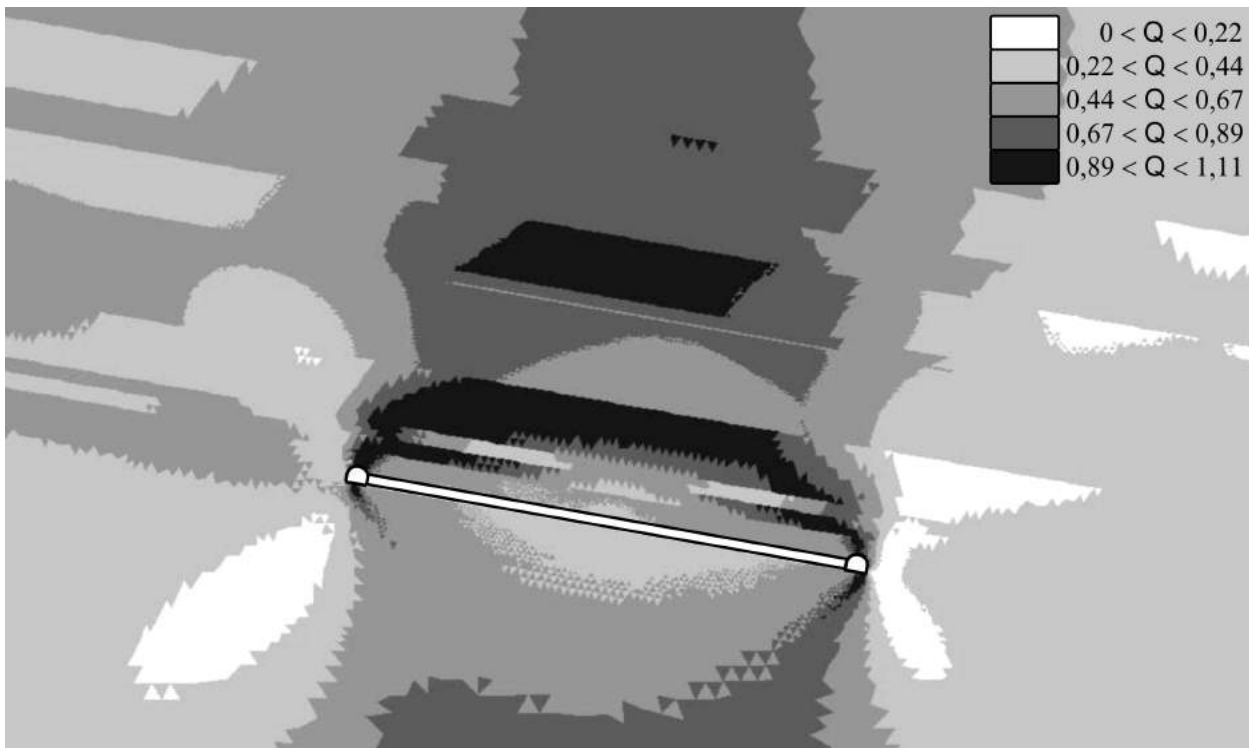


Рис. 2 – Распределение параметра Q

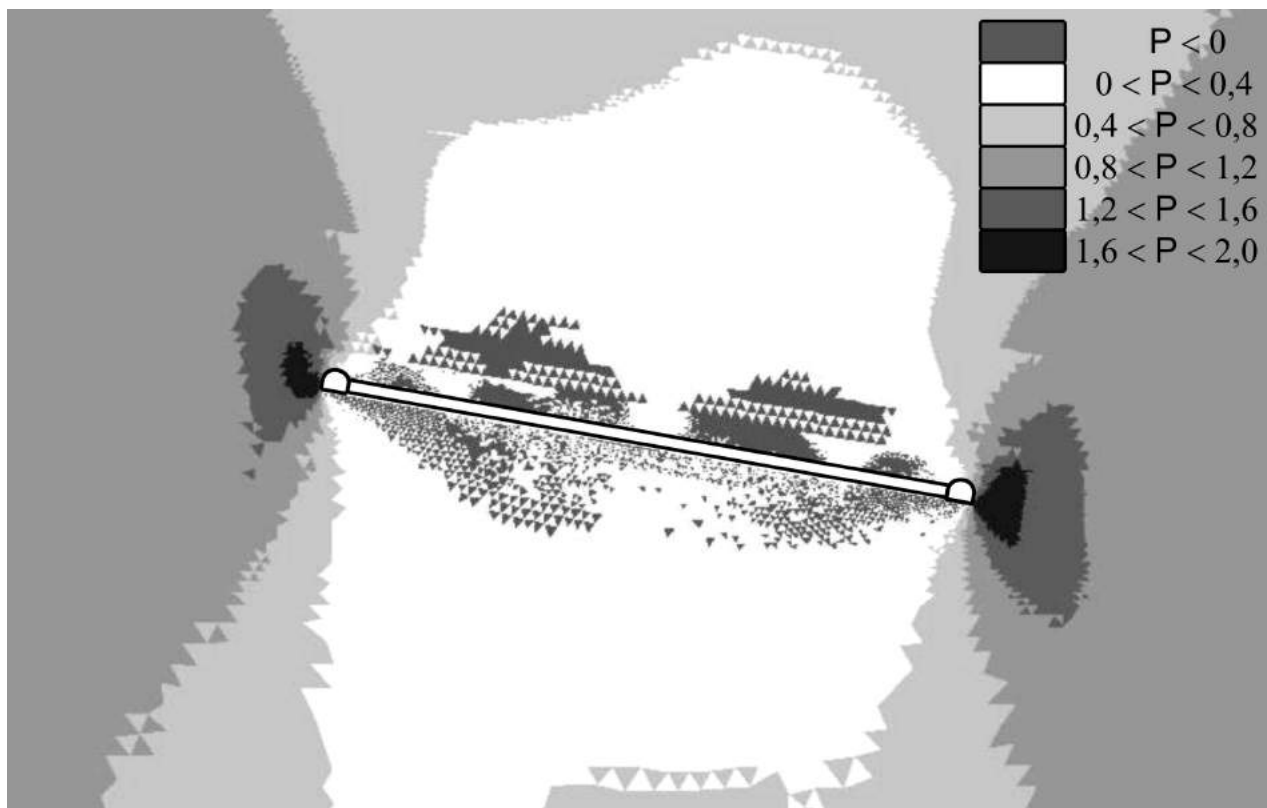


Рис. 3 – Распределение параметра P

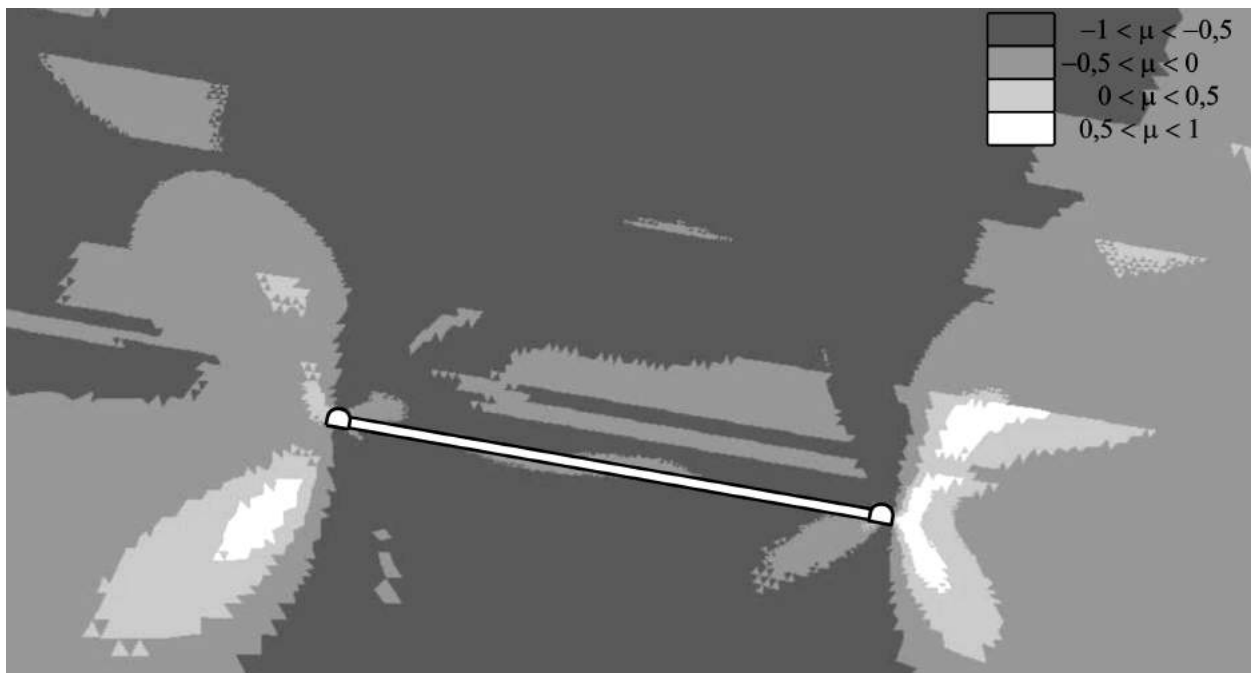


Рис. 4 – Распределение параметра μ_{σ}

В газоносных слоях углепородного массива, не нарушенного проведением горных выработок, параметр $0 < Q < 0,4$, а параметр μ_{σ} близок к единице (рис. 2, 4). Газ здесь содержится в изолированных порах [1, 2, 3], фильтрационная способность отсутствует, коэффициент проницаемости практически равен нулю (может доходить до $k_n = (0,45 - 16) * 10^{-6}$ мДа [4]), а давление свободного газа, содержащегося в изолированных порах, близко к гидростатическому давлению, равному $0,8-0,9 \gamma_{\text{воды}} H$.

В области упругих деформаций ($0,4 < Q < 0,5$; $-0,5 < \mu_{\sigma} < 0,5$) происходит закрытие микротрещин и пор [5], и фильтрационные свойства среды мало изменяются. Можно считать, что эта зона также не принадлежит области фильтрации.

Уплотнение породы и перекрытие трещинно-поровых каналов происходит и в области равнокомпонентного сжатия, где $\mu_{\sigma} \approx 1$ и $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Как показано в работах [4, 6], при изменении нагрузки от 0 до 60 МПа, коэффициент проницаемости исследуемых образцов снижался по экспоненциальной зависимости от 0,14-0,25 мДа до 0-0,01 мДа.

При разнокомпонентном нагружении ($0,5 < Q < 0,8$) в области начала микрорастрескивания рост коэффициента проницаемости очень незначителен.

За пределами упругости и до предела прочности, что соответствует области интенсивного трещинообразования ($0,8 < Q < 1$, рис. 2), происходит рост коэффициента проницаемости на 2-3 порядка в различных горных породах. Пропускная способность существующих и вновь образованных фильтрационных каналов в этой зоне возрастает с увеличением разнокомпонентности нагрузки [4-6]. Дальнейший рост коэффициента проницаемости за пределом прочности происходит только за счет расширения существующих трещин. В области обрушения, которая характеризуется параметром $P \approx 0$ (рис. 3) и в областях расслоения пород аргил-

лита, расположенных между более прочными слоями песчаника (рис. 5) коэффициент проницаемости достигает максимальных значений.

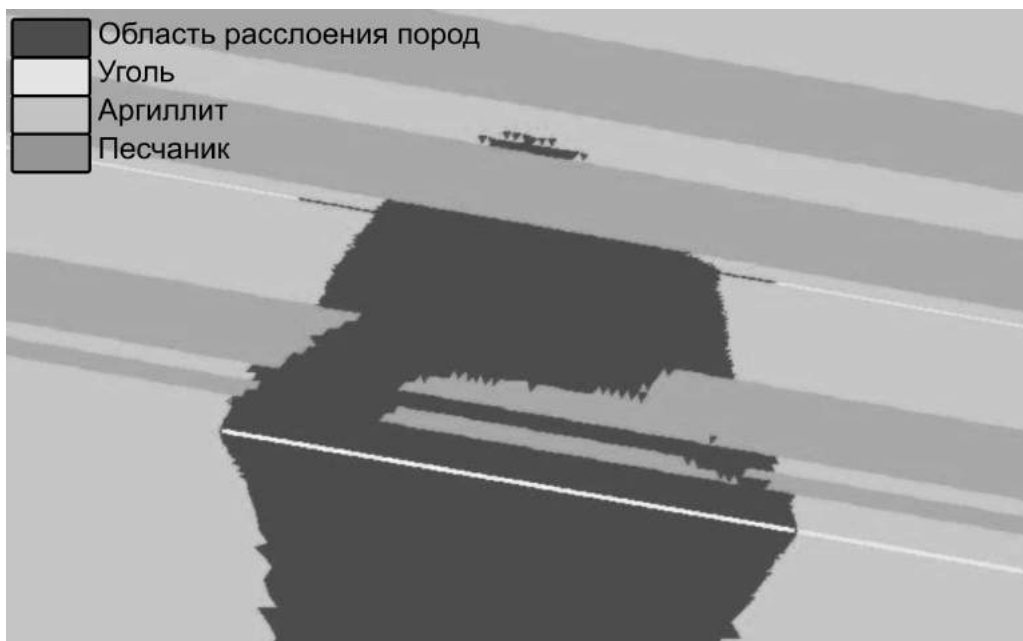


Рис. 5 – Область неупругих деформаций

Учитывая вышеизложенное, решим задачу о движении метана в исследуемой области методом конечных элементов. Будем считать газоносность песчаников равной $0,7-0,9 \text{ м}^3/\text{т}$, угольных пропластков и разрабатываемого пласта – $20 \text{ м}^3/\text{т}$.

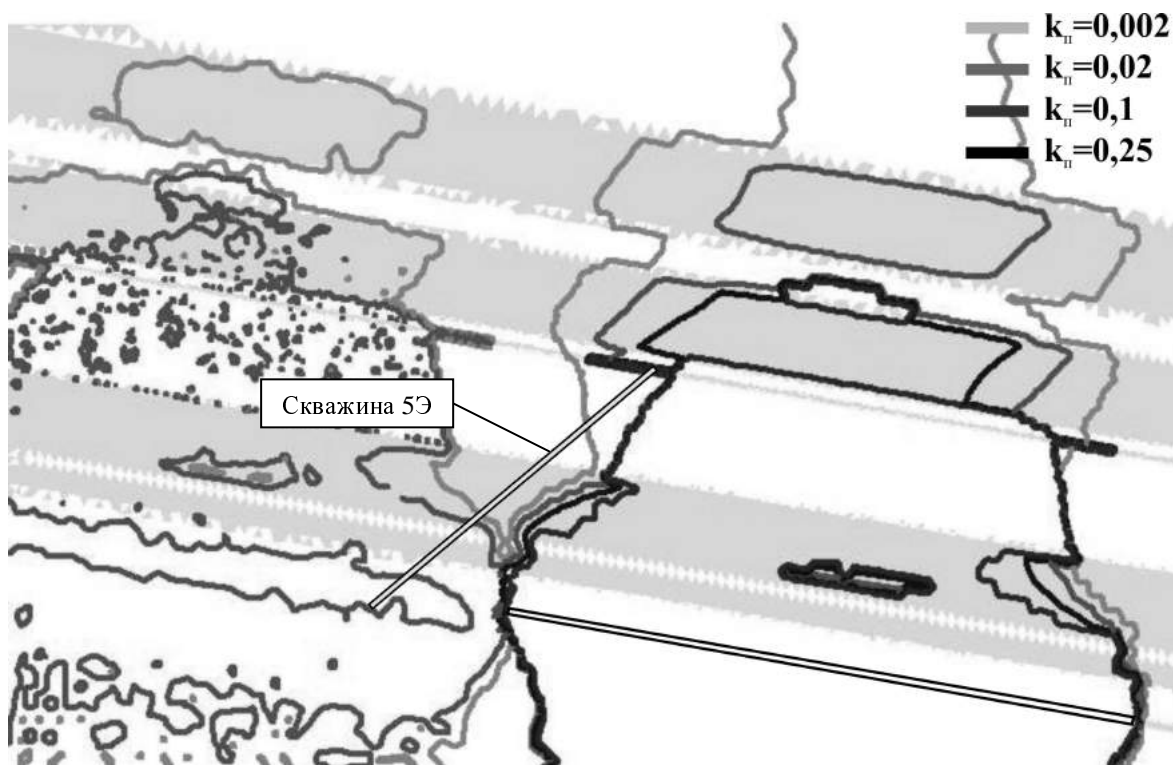


Рис. 6 – Поле коэффициентов проницаемости (в мДа)

В результате решения задачи об определении области фильтрации и движении метана с учетом влияния соседнего выработанного пространства методом конечных элементов [7] были получены поля коэффициентов проницаемости (рис. 6), распределения давления газа (рис. 7), скоростей его движения (рис. 8) и расходов метана (рис. 9).

Поле коэффициентов проницаемости массива (рис. 6) полностью определяется геомеханическими зонами, характеризуемыми параметрами Q , P и μ_{σ} .

Как видно из рис. 7, существуют области, в которых давление метана превышает начальное поровое давление. Это объясняется тем, что при приближении лавы в горном массиве возникает область так называемого опорного давления. В результате механического сжатия повышается и давление метана, содержащегося в порах и пустотах. Причем поровое давление метана в угольных пропластках несколько выше давления в газоносных песчаниках из-за разности в их прочностных характеристиках. После прохода лавы, при достижении критических значений концентрации напряжений в породном массиве, начинается процесс трещинообразования и движения метана из областей с повышенным пластовым давлением в области, где давление имеет более низкие значения. Во-первых, с большей скоростью, в очистной забой, атмосферное давление в котором составляет всего 0,1 МПа. Во-вторых, к границам области фильтрации, где постепенно, с малой скоростью, образуются так называемые техногенные газовые коллекторы (рис. 9). При этом давление метана постепенно выравнивается, образуя область (на рис. 7 она ограничена изолинией $P/P_0=0,9$), в которой $P < P_0$.

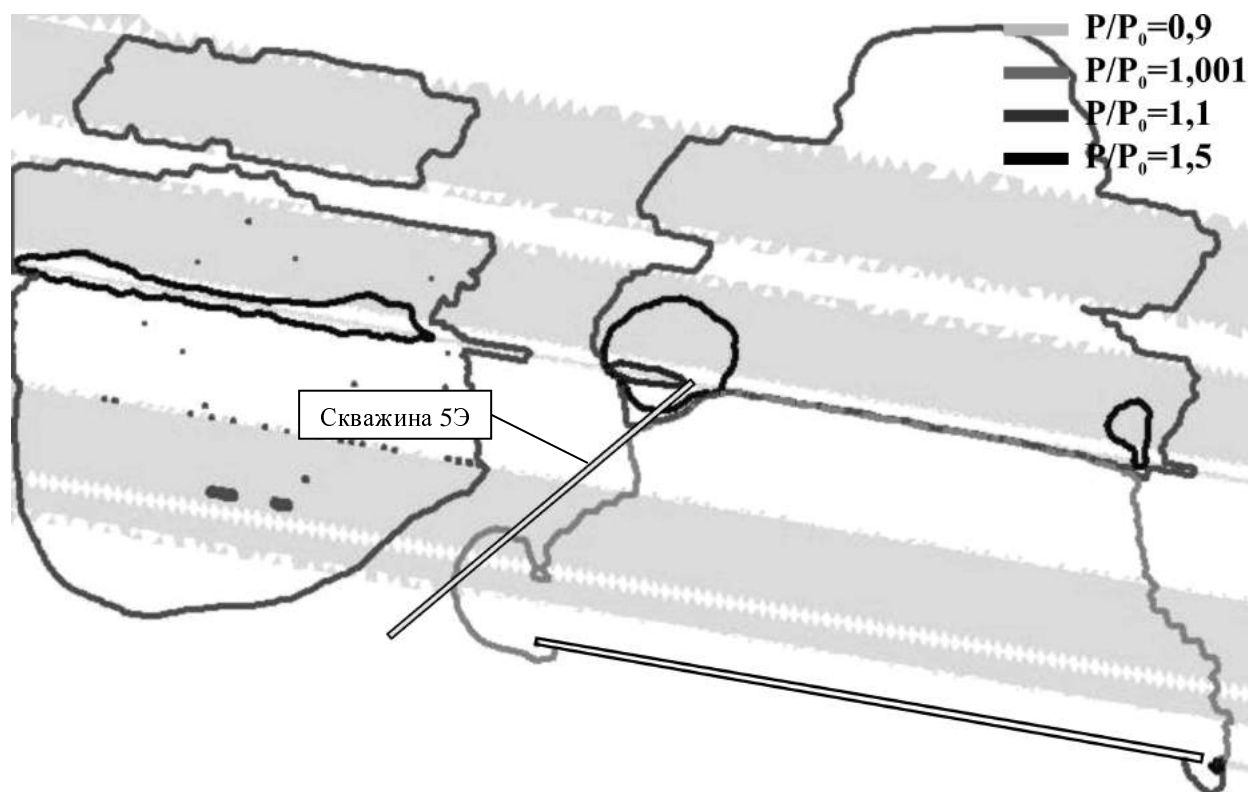


Рис. 7 – Давление метана

Скорость фильтрации определяется как расход метана через единичную площадку пористой среды, перпендикулярную направлению потока. Как видно из рис. 7 и 8, скорости фильтрации имеют самые высокие значения в области обрушения и разрыхления пород кровли. Кроме этого они высоки и в угольных пластах, что также обусловлено разностью в прочностных характеристиках угля и песчаников.

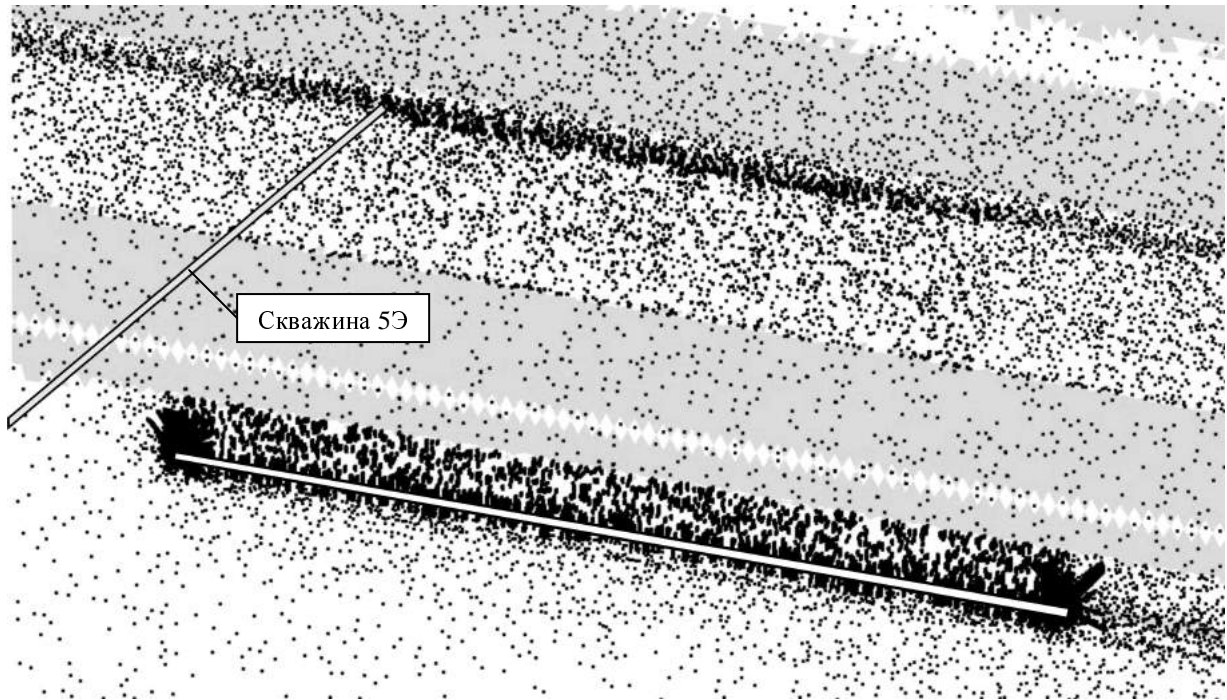


Рис. 8 – Поле скоростей движения метана

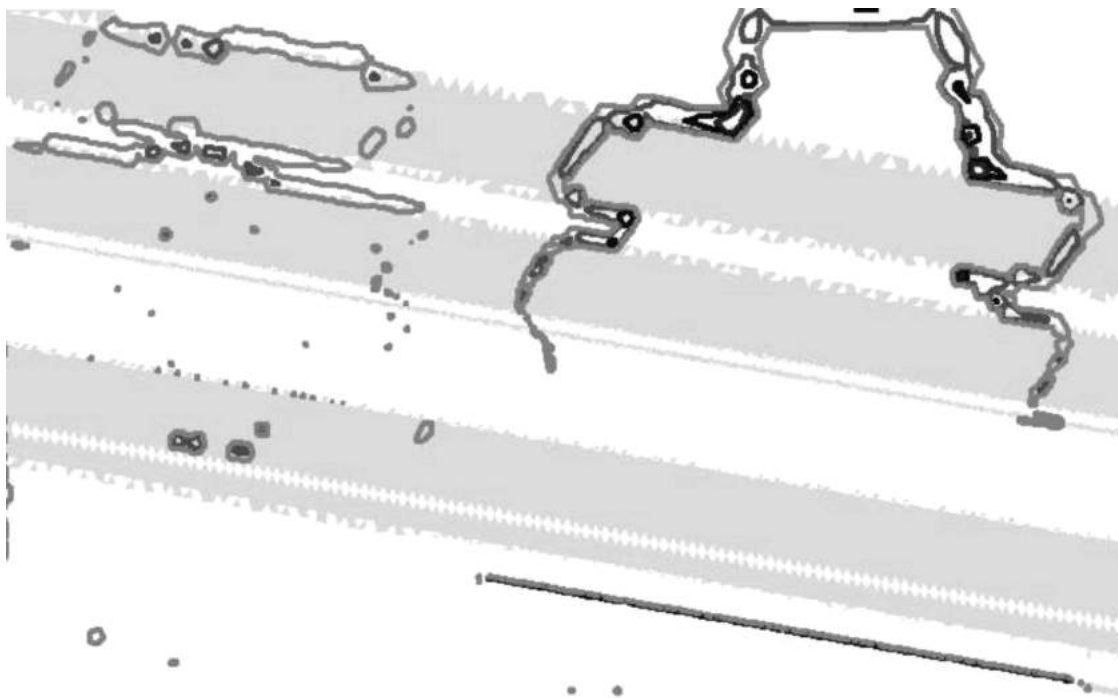


Рис. 9 – Расход метана (области его возможного скопления)

Для сравнения полученных расчетных данных с экспериментальными на рис. 6-8 показана скважина 5Э (ее проекция на исследуемую плоскость), которая была пробурена из людского ходка уклона № 7 в направлении пород кровли 16 западной лавы. Средний дебит метана (100 % CH₄) в процессе подработки этой скважины 16-й западной лавой пласта m₃ составил 6,85 м³/мин, в течение 133 суток из нее было получено 1320 тыс. м³ метана.

Как видно из рис. 3 и 5, скважина 5Э проходит, в стороне от зоны обрушения пород кровли через расслоившиеся аргиллиты, скорости фильтрации здесь высоки (рис. 8), перепад давлений обеспечивает достаточный приток метана. Все это обуславливает высокий дебит метана в этой скважине.

Проведем расчеты отдельно для каждого из газоносных объектов и проанализируем, доля какого метана в общем расходе больше – из угольных пропластков или из газоносных песчаников. Полученные результаты представлены на рис. 10.

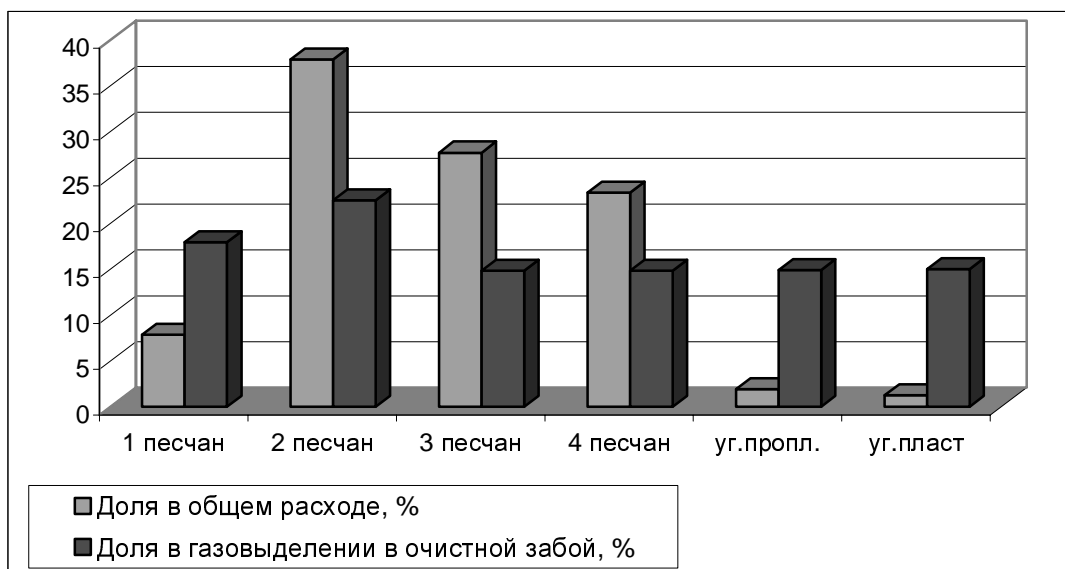


Рис. 10 – Расход метана, выделившегося из песчаников и угольных пропластков

Получается, что доля песчаников в газовыделении в очистной забой составляет 70%, а в общем расходе – 96% (для задачи, решенной в принятой постановке, без учета влияния газовыделения из разрабатываемого угольного пласта). Иными словами, для достижения приемлемых результатов по безопасности ведения горных работ первостепенное значение имеет дегазация газоносных песчаников кровли (почвы).

Кроме этого, зная места скопления метана, области повышенного пластового давления и наибольших скоростей движения метана, можно более эффективно определять параметры дегазационных скважин, пробуренных как с поверхности, так и из подземных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Кулинич В.С., Перепелица В.Г., Ефремов И.А., др. Результаты определения величины и направления главных напряжений в углепородном массиве пласта l₁ шахты им. А.Ф. Засядько методом локального гидравлического разрыва (ЛГР). – В сб.: Геотехническая механика, №44. – Днепропетровск, 2003. – с. 156-164.

2. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1999, №5. – с. 13-18.
3. Христианович С.А., Коваленко Ю.Ф. Об измерении давления газа в угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №3. – с. 3-23.
4. Кареев В.И., Коваленко Ю.Ф. Теоретическая модель фильтрации газа в газосодержащих угольных пластах. – ФТПРПИ, 1988, №6. – с. 47-55.
5. Кулинич В.С., Кулинич С.В. Влияние напряженно-деформированного состояния на газоотдачу метаносных горных пород. – В сб.: Геотехническая механика, №17. – Киев-Днепропетровск, 2000. – с. 152-156.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М. Недра, 1985. – 272 с.
7. Кулинич В.С., Перепелица В.Г., Курносоев С.А., Иванчишин С.Я и др. Газовая проницаемость горных пород в разнокомпонентном поле сжимающих напряжений. – В сб.: Геотехническая механика, № 42. – Днепропетровск, 2003. – с. 18-24.
8. Круковский А.П., Круковская В.В. Фильтрация газа в зоне влияния очистной выработки с учетом напряженно-деформированного состояния углепородного массива. – В сб.: Геотехническая механика, № 49. – Днепропетровск, 2004. – с. 23-29.

УДК 622.28.044:622.831

Канд. техн. наук Г.І. Ларіонов
(ИГТМ НАН Украины)

ПРО ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ГІРСЬКИХ ПОРІД У ЗАМКОВІЙ ЧАСТИНІ НАВАНТАЖЕНОГО ПО ОСІ АНКЕРА

В работе рассмотрено решение пространственной задачи теории упругости по определению деформированного состояния в окрестности части шпура с закрепленным в нем металлополимерным анкером. Характер нагрузки, который принят в задаче, отвечает условию работы предварительно нагруженного металлополимерного анкера. Полученные графики демонстрируют распределение перемещений в окрестности шпура для линейного закона распределения касательных напряжений.

ON STRAIN ROCK STATE CAUSED WITH AXIS BOLT LOADING

The paper presents the space elastostatic strain state task solving for near borehole part with resin-metal bolt caused with axes tensile loading. The proposed load features are adequate to pre-tensioning resin-metal bolt work. Obtained strain state task results are presented in graphic views for linear shear stress distribution.

Вступ. Практичний досвід, накопичений в Україні [1,6] за останні роки й у світі [2-4], підтвердив, що сучасне анкерне кріплення дозволяє суттєво зменшити або усунути негативні наслідки, пов'язані з невпинним збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин. Однак свої основні технологічні властивості сучасний металлополімерний анкер може проявити тільки при дотриманні достатньо жорстких вимог щодо технології його встановлення. **Актуальність проблеми** визначення величини попереднього натягу анкера витікає з аналізу стану справ і підтверджується відсутністю сталого погляду на цю проблему [2-4]. Думки на доцільність виконання цієї операції і на визначення їх величин розбігаються [2-4]. Таким чином, проблема визначення величини попереднього навантаження анкера та її впливу на напружено-деформований стан встановленого анкера є актуальною і підлягає ретельному дослідженню.

Попередній натяг анкера має за мету ущільнення порід поблизу контуру ви-