

УДК 622.267.5

Круковская В.В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины),
Круковский Д.А., студент
(ДНУ им. О. Гончара)

**МЕТОД РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА И
ФИЛЬТРАЦИИ МЕТАНА***

Круковська В.В., д-р техн. наук, ст. наук. співр.
(ИГТМ НАН України),
Круковський Д.О., студент
(ДНУ ім. О. Гончара)

**МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЗВ'ЯЗАНИХ ПРОЦЕСІВ
ДЕФОРМУВАННЯ ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ І
ФІЛЬТРАЦІЇ МЕТАНУ**

Krukovskaya V.V., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM of the NAS of Ukraine),
Krukovskiy D.A., student
(O. Honchar DNU)

**METHOD OF CALCULATION PARAMETERS OF COUPLED
PROCESSES OF COAL-ROCK MASSIF DEFORMATION AND
METHANE FILTRATION**

Аннотация. Разработан метод расчета параметров связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации метана с учетом их взаимного влияния и изменения во времени. Условием связи между геомеханическими и фильтрационными процессами служит зависимость коэффициентов проницаемости от компонент тензора напряжений. Обратная связь реализуется через учет сил, обусловленных давлением газа, в расчете суммарной силы, действующей на каждую точку твердого тела. Приведена блок-схема алгоритма расчёта. На каждой временной итерации рассчитываются: поля перемещений, напряжений, коэффициентов проницаемости, параметры фильтрации метана.

С помощью предложенного метода можно исследовать метановыделение в горные выработки, эффективность работы дегазационных скважин в различных горно-геологических и технологических условиях; выполнить расчёт геомеханических и фильтрационных параметров углепородного массива в тектонически нарушенной зоне угольного пласта, при газодинамических явлениях. В качестве примера рассмотрена задача о фильтрации метана в горную выработку. Приведены результаты расчёта геомеханических параметров, зон неупругих деформаций, коэффициентов проницаемости и давления метана в области фильтрации.

Ключевые слова: связанные процессы, деформирование углепородного массива, фильтрация метана, алгоритм расчёта

При подземной добыче угля нарушается природное равновесие углепородного массива. Горные работы инициируют процессы деформирования и фильтрации метана, который содержится в трещинно-поровом пространстве угля и газоносных песчаников. Повышенный приток метана из отрабатываемого пласта и выработанного пространства, суфлярные выделения и прорывы метана, газодинамические явления – это результат совместного протекания во времени двух

* © Круковская В.В., Круковский Д.А., 2017

Статья посвящена 50-летию со дня основания Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

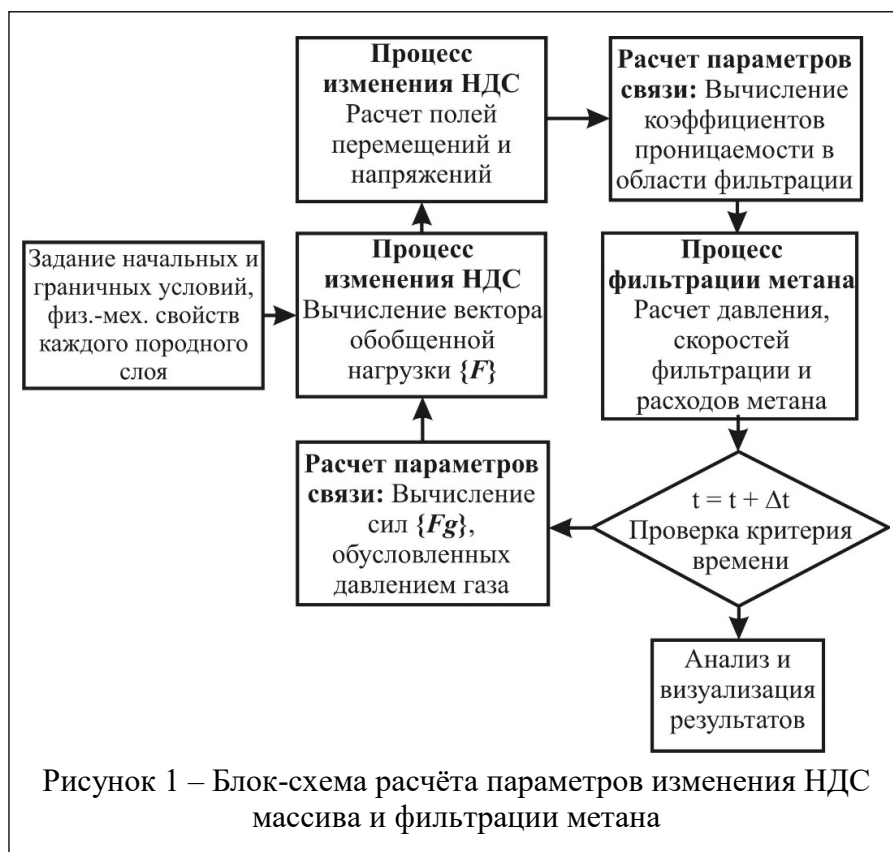
тесно связанных процессов: перераспределения поля напряжений и фильтрации газа. Во многих случаях выделяющийся в атмосферу горных выработок метан препятствует эффективной угледобыче и становится угрозой безопасности шахтного персонала. Поэтому разработка метода расчёта параметров этих связанных процессов с учётом их взаимного влияния и изучение закономерностей их совместного протекания во времени представляют научный и практический интерес.

В связи с этим **целью работы** является разработка метода расчёта параметров связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации метана с учётом их взаимного влияния и изменения во времени.

Алгоритм расчёта параметров связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации метана. Рассмотрим процессы, происходящие в газонасыщенном углепородном массиве при ведении горных работ. Проходческие и очистные работы в угольных шахтах нарушают установившееся равновесие системы «твёрдое тело – газ». На некотором расстоянии от забоя выработки в горном массиве начинает проявляться её влияние – увеличивается вертикальная составляющая тензора напряжений, образуется зона опорного давления. В результате сжатия пород в этой зоне происходит уменьшение объёма их порового пространства. Разгрузка приконтурных пород и призабойной части угольного пласта приводит к расслоению, возникновению фильтрационной проницаемости. По развивающейся системе трещин метан перемещается в направлении градиента давления, то есть из областей с большим давлением в области с меньшими значениями давления метана.

Таким образом, толчком к выводу системы «твёрдое тело – газ» из равновесия служит процесс деформирования массива. Фильтрация метана является его следствием, так как приобретает возможность осуществиться только при наличии области фильтрационной проницаемости, связывающей источник метана и область низкого давления (полость выработки, скважины).

Условием связи между геомеханическими и фильтрационными процессами служит зависимость коэффициентов проницаемости от компонент тензора напряже-



ний $k = f(\sigma_{ij})$. Существует множество моделей такой связи [5, 6, 7]. Обратная связь реализуется через учёт сил $\{F_g\}$, обусловленных давлением газа, в расчёте суммарной силы $\{F\}$, которая действует на каждую точку твёрдого тела

$$\{F\} = \{F_0\} + \{F_g\},$$

где $\{F_0\}$ – силы, обусловленные действием геостатического давления.

Блок-схема алгоритма расчёта параметров связанных процессов деформирования массива и фильтрации метана приведена на рис. 1.

На каждой временной итерации рассчитывается:

- поле перемещений u_i и напряжений σ_{ij} ;
- поле коэффициентов проницаемости $k(\sigma_{ij})$ в зависимости от параметров напряжённого состояния массива;
- параметры фильтрации метана;
- силы, обусловленные давлением газа.

Постановка задачи. При моделировании рассматриваемых процессов принимается гипотеза сплошности, горный массив считается однородным в пределах каждого породного слоя. Суммарная сила, действующая на каждую точку тела, равна сумме сил геостатического давления и давления газа. Фильтрационный поток будем считать изотермическим, непрерывным.

Связанные процессы деформирования углепородного массива и нестационарной фильтрации метана описываются системой уравнений [1].

$$c_g \frac{\partial}{\partial t} u_i = \sigma_{ij,j} + X_i(t) + P_i(t); \quad \frac{\partial p}{\partial t} + k \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t) = 0,$$

где c_g – коэффициент демпфирования, кг/с/м³; $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объёма твёрдого тела, Н/м³; $P_i(t)$ – проекции сил, обусловленных давлением газа в трещинно-поровом пространстве, Н/м³, $P_i = \partial p / \partial x_i$ [2]; p – давление газа, МПа; $q(t)$ – функция газовыделения.

Задача решается в упруго-пластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора, которое учитывает возможность возникновения разрушения в результате и сдвига, и отрыва [3, 4]. То есть принимается во внимание, что горные породы имеют различные пределы прочности на сжатие и на растяжение.

При малых скоростях фильтрации флюидов движение потока подчиняется закону Дарси

$$v_x = k_x \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v_y = k_y \frac{\partial p}{\partial y},$$

где v_x, v_y – компоненты вектора скорости фильтрации; k_x, k_y – коэффициенты проницаемости твёрдого тела, мДа.

Но при изучении некоторых динамических процессов скорость может и не удовлетворять этому условию. В этом случае необходимо учитывать зависимости между градиентом давления и более высокими степенями скоростей фильтрации. Если $k = k(\bar{v})$, их можно записать в виде [1]

$$v_x = k(\bar{v}) \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v_y = k(\bar{v}) \frac{\partial p}{\partial y}.$$

Начальные условия для поставленной задачи:

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H; \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; \quad p|_{t=0} = p_0,$$

где λ – коэффициент бокового распора; H – глубина разработки; p_0 – давление метана в нетронутом массиве.

Граничные условия:

$$u_x|_{\Omega_1} = 0; \quad u_y|_{\Omega_2} = 0; \quad p|_{\Omega_3(t)} = p_0; \quad p|_{\Omega_4} = 0,1 \text{ МПа},$$

где Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; $\Omega_3(t)$ – изменяющаяся во времени граница области фильтрации; Ω_4 – внутренний контур (выработка).

При решении поставленной задачи на каждой временной итерации получим поля напряжений, зоны неупругих деформаций, поля коэффициентов проницаемости, давления метана и скоростей его фильтрации.

Для анализа напряжённо-деформированного состояния породного массива в работе используется параметр $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$, характеризующий разнокомпонентность поля напряжений.

Применение расчётного метода. С помощью предложенного метода можно решать множество задач, имеющих важное значение для угле- и газодобычи, в частности:

- исследование метановыделения в очистные выработки при интенсивной отработке угольных пластов;
- исследование метановыделения в горные выработки в различных горно-геологических и горнотехнических условиях;
- расчёт параметров фильтрации метана в тектонически нарушенной зоне угольного пласта [8];
- расчёт геомеханических и фильтрационных параметров углепородного массива при газодинамических явлениях [9, 10];
- расчёт параметров фильтрации метана в углепородном массиве вокруг выемочных штреков при использовании различных охранных конструкций [11];
- исследование эффективности работы дегазационных скважин в различных горно-геологических и технологических условиях [12];
- расчёт параметров фильтрации метана во времени при остановке очистного забоя [13].

Результаты решения задачи о фильтрации метана в горную выработку с рамной и анкерной крепью. Для примера рассмотрим проведение капитальной выработки с сечением КШПУ-14,4 в условиях шахты им. Н.И. Сташкова, «ШУ Днепровское». Характеристики углей и вмещающих пород (по данным шахты) приведены в табл. 1.

Расчётная схема и стратиграфическая колонка показаны на рис. 2.

Выполним расчёт изменения геомеханических и фильтрационных параметров во времени для случаев рамного и анкерного крепления выработки, рис. 3.

Получим распределения значений геомеханических (рис. 4, рис. 5) и фильтрационных (рис. 6, рис. 7) параметров на различных временных итерациях $i \in [1; 100]$ для выработки с рамной и анкерной крепью.

Таблица 1 – Характеристика углей и вмещающих пород

№ слоя	Мощность, м	Описание	Удельный вес, т/м ³	Предел прочн. ср., $\sigma_{сж}$, МПа	Удельная трещиноватость	Природная газоносность, м ³ /т
1	2,0	Песчаник	2,6	26,5	8-10	3,6
2	5,8	Аргиллит	2,3	23,6	6-8	-
3	2,4	Песчаник	2,6	26,5	8-10	3,6
4	0,4	Аргиллит	2,3	23,6	6-8	-
5	0,4	Уголь пл. C ₅ ¹	1,26		15-20	7,5
6	11,0	Аргиллит	2,3	23,6	6-8	-
7	1,0	Уголь пл. C ₅ +C ₅ ^B	1,26		15-20	7,5

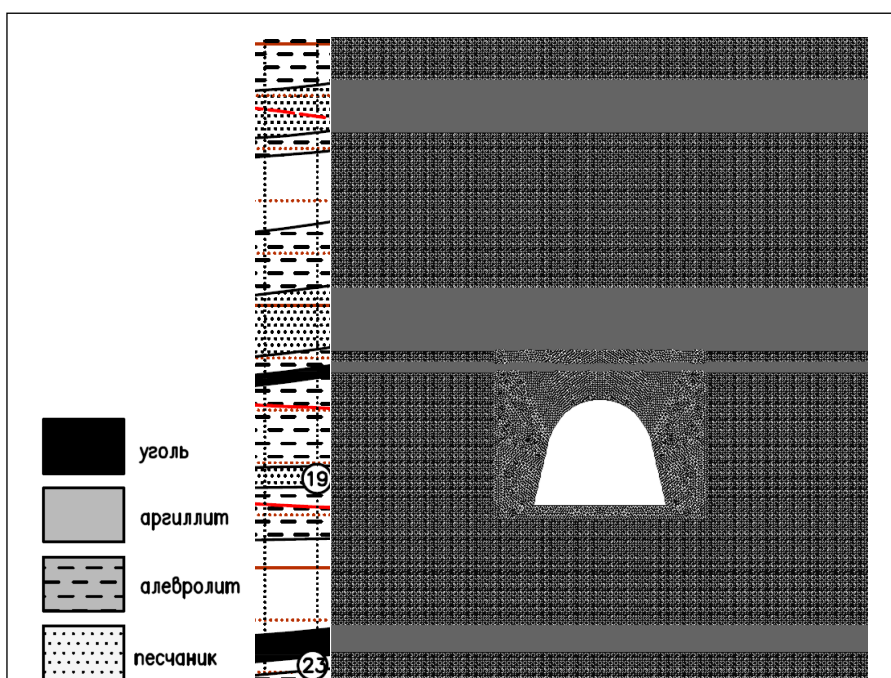


Рисунок 2 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

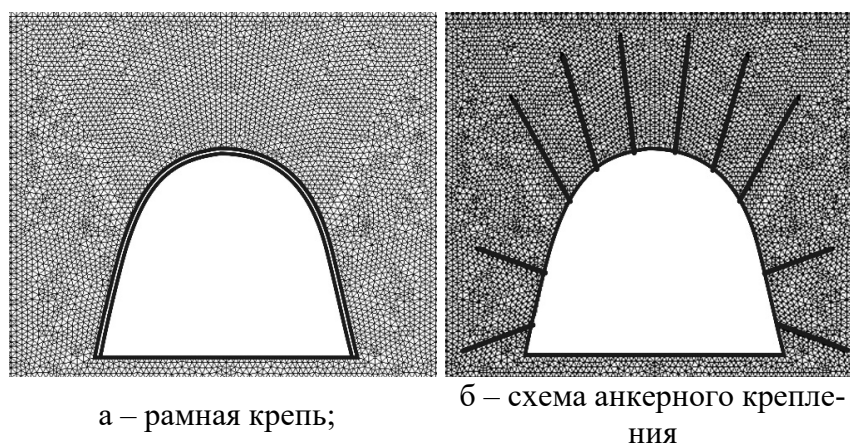


Рисунок 3 – Схема крепления выработки

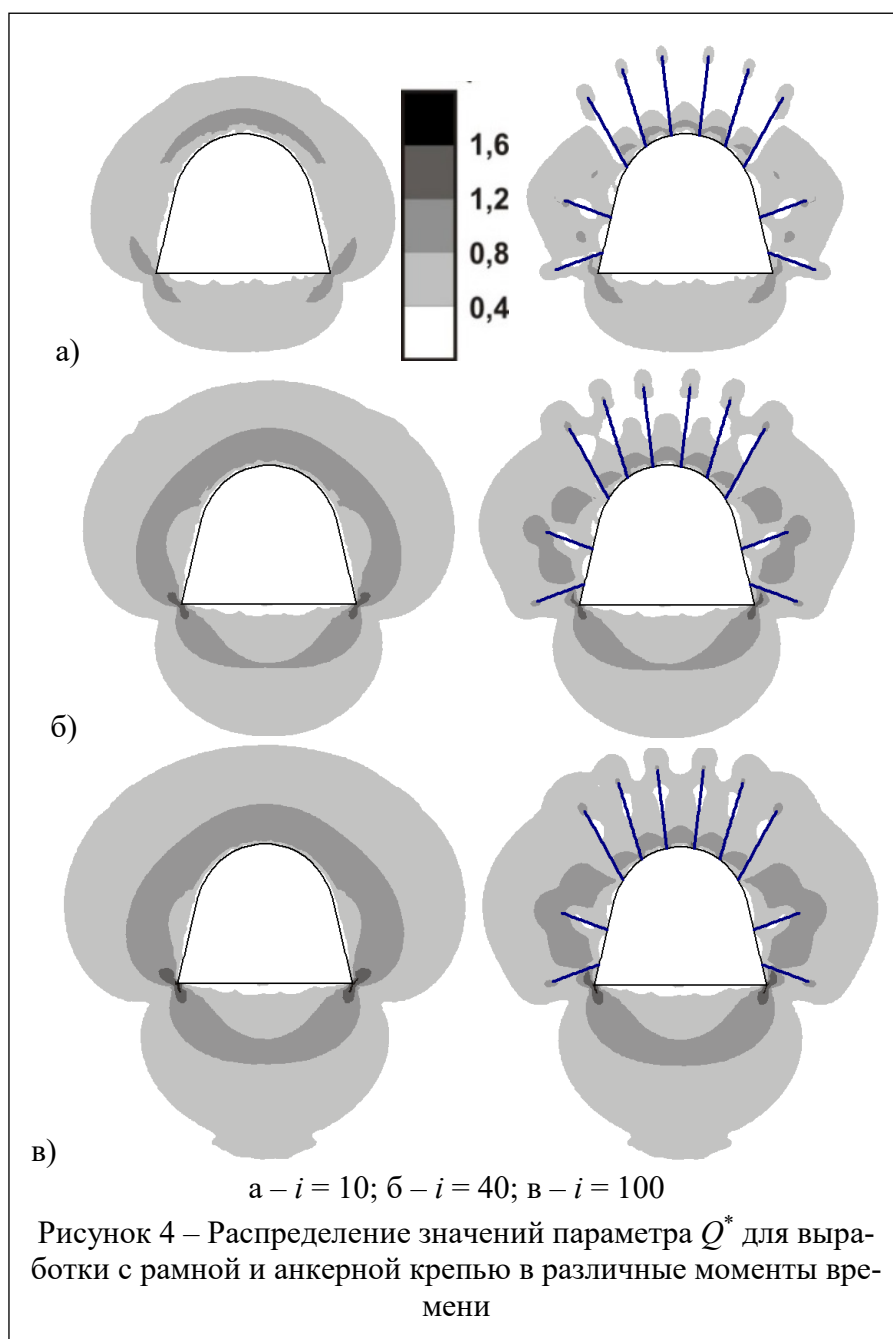
С течением времени в приконтурных породах увеличивается разнокомпонентность поля напряжений. За 100 итераций зона начала трещинообразования, в которой $0,4 < Q^* < 0,8$, распространяется вглубь массива на 2,5-3,5 м, зона интенсивной трещиноватости ($0,8 < Q^* < 1,2$) – на 1,0-1,7 м, рис. 4.

В выработке с анкерной крепью, рис. 4, справа, происходит такой же процесс, но при этом в кровле образуется породно-анкерное перекрытие, в котором параметр $Q^* < 0,4$. В этой зоне горные породы сохранены в природном, монолитном состоянии, породы кровли в целом менее нарушены, чем в кровле выработки с рамной крепью. Площадь зон интенсивной трещиноватости ($0,8 < Q^* < 1,2$) в боках выработки с анкерной крепью также уменьшилась, что говорит о более устойчивом их состоянии.

В горных породах в непосредственной близости от контура выработки минимальная компонента тензора напряжений становится близкой к нулевому значению. В этой области разрушение приконтурного массива происходит посредством разделения его на отдельные слабо взаимодействующие блоки.

Области неупругих деформаций представлены на рис. 5.

С течением времени область неупругих деформаций, где проницаемость массива максимальна, увеличивается. На рис. 5 справа, вокруг выработки с анкерной крепью, площадь области неупругих деформаций в кровле и боках выработки значительно меньше, чем на рисунках слева. Анкера сдерживают развитие



неупругих деформаций, приостанавливая развитие процесса трещинообразования.

Все описанные особенности деформирования приконтурного массива нашли своё отражение в образовании области фильтрации вокруг выработок с рамной и анкерной крепью, рис. 6.

На рис. 6,а-в видны области с начальной проницаемостью, соответствующие трещиноватым угольным пластам C_5^1 и $C_5+C_5^B$ и песчанику, табл. 1. Сравнивая значения проницаемости вокруг выработок с рамной и анкерной крепью, видим, насколько анкерная крепь уменьшает размеры области фильтрации.

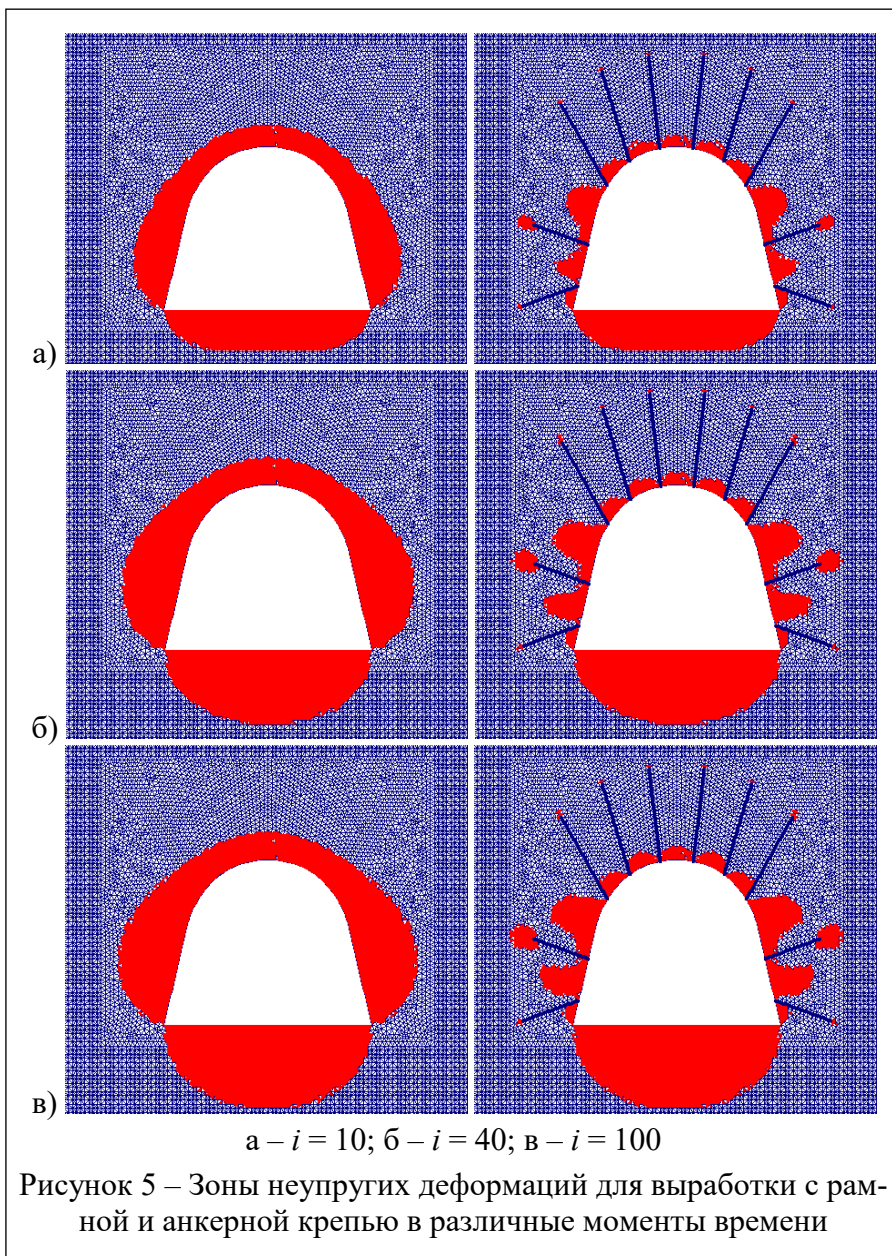
В случае рамного крепления область фильтрации с коэффициентами проницаемости

$k > 0,05$ МПа,

образует единую, связную область, в которую попадает угольный пропласток C_5^1 (рис. 6,а), пропласток C_5^1 и газоносный песчаник (рис. 6,б,в). Внутри этой области метан может легко перемещаться по направлению от источников газовой выделения – угольного пропластка и песчаника – в атмосферу выработки, давление газа в которой (0,1 МПа) намного ниже давления метана в ненарушенном массиве (до 8 МПа). Часть расположенного в почве выработки пласта $C_5+C_5^B$ (рис. 6,в) также имеет фильтрационную связь с выработкой, однако из-за малости значений проницаемости вблизи пласта $C_5+C_5^B$ количество фильтрующегося из него метана будет незначительным на рассмотренном временном промежутке.

На рис. 6 справа видно, как изменяются контуры области фильтрации, если в кровле и боках выработки установлены анкера. В этом случае область фильтрации с $k > 0,05$ МПа не достигает источников метановыделения (рис. 6,а,б) и едва касается пропластка C_5^1 на 100-й временной итерации, рис. 6,в.

Давление метана вокруг выработки с рамной крепью падает, рис. 7. Это говорит о том, что метан перемещается из областей с более высоким давлением



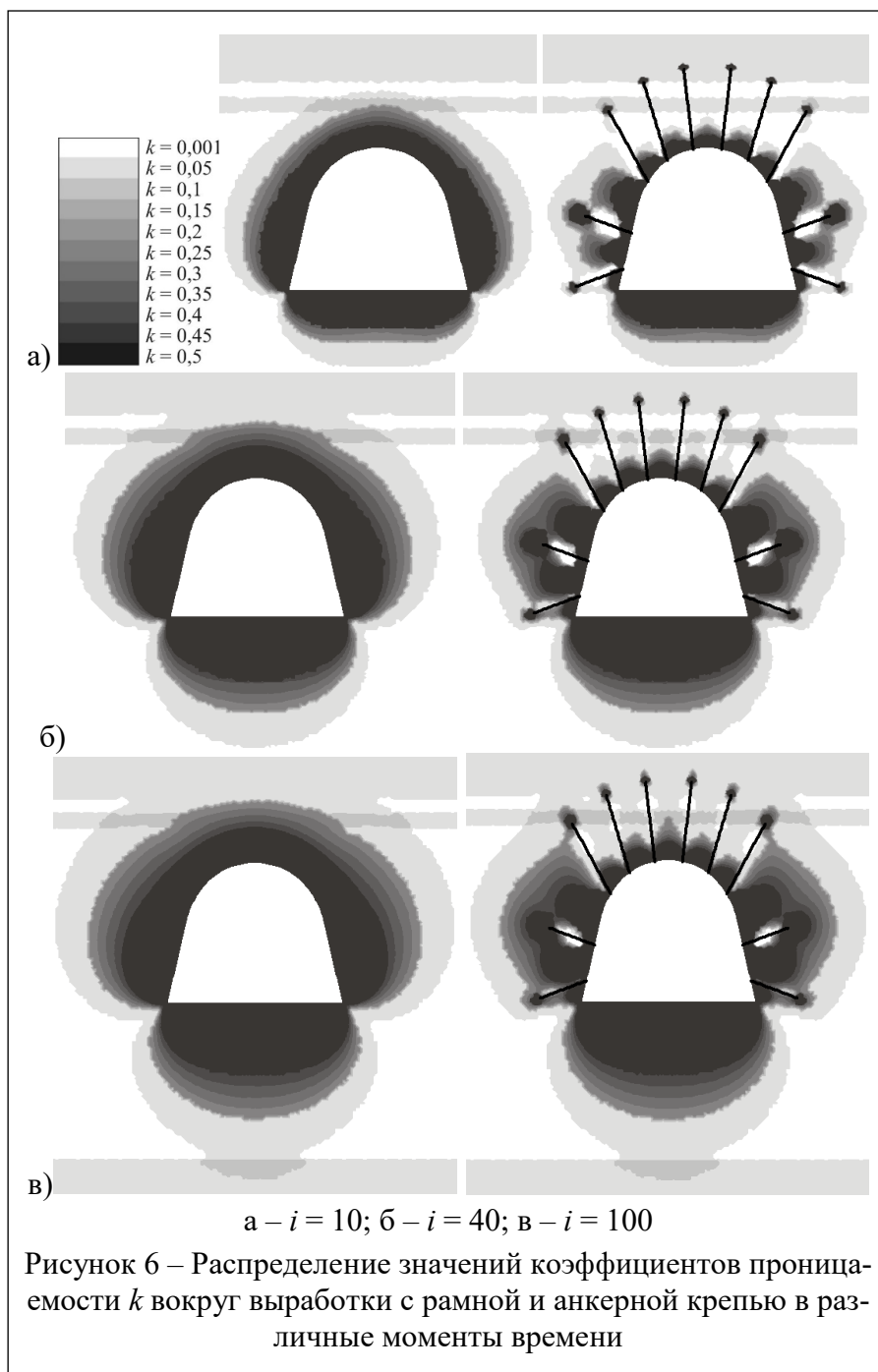
в область, где давление минимально – то есть в атмосферу выработки. Причём область пониженного давления захватывает сначала часть пропластка C_5^1 , рис. 7,б, затем – газоносный песчаник, рис. 7,в, которые активно дегазифицируются.

В тоже время в выработке, закреплённой анкерной крепью, рис. 7, зона пониженного давления имеет гораздо меньшие размеры в результате сокращения размеров области фильтрации. Только к 100-й итерации она достигает пропластка C_5^1 . Таким образом, на рассмотренном временном промежутке в атмосферу выработки с анкерной крепью попадёт меньшее количество метана.

На рис. 8 приведены графики изменения значений разнотенности поля напряжений (параметр Q^*) вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр выработки.

Видно, что $Q^* \rightarrow 0$ в глубине массива и принимает максимальные значения вблизи контура выработки.

На глубине 0,5-4,0 м в кровле выработки значения разнотенности поля напряжений в выработке с анкерной крепью, рис. 8,б, на 10-50 % ниже, чем при рамном креплении. Снижение значений параметра Q приводит к повышению устойчивости приконтурных пород и их фильтрационной непроницаемости, что позволит уменьшить метанообильность выработки, проводимой в газонасыщенном углепородном массиве.



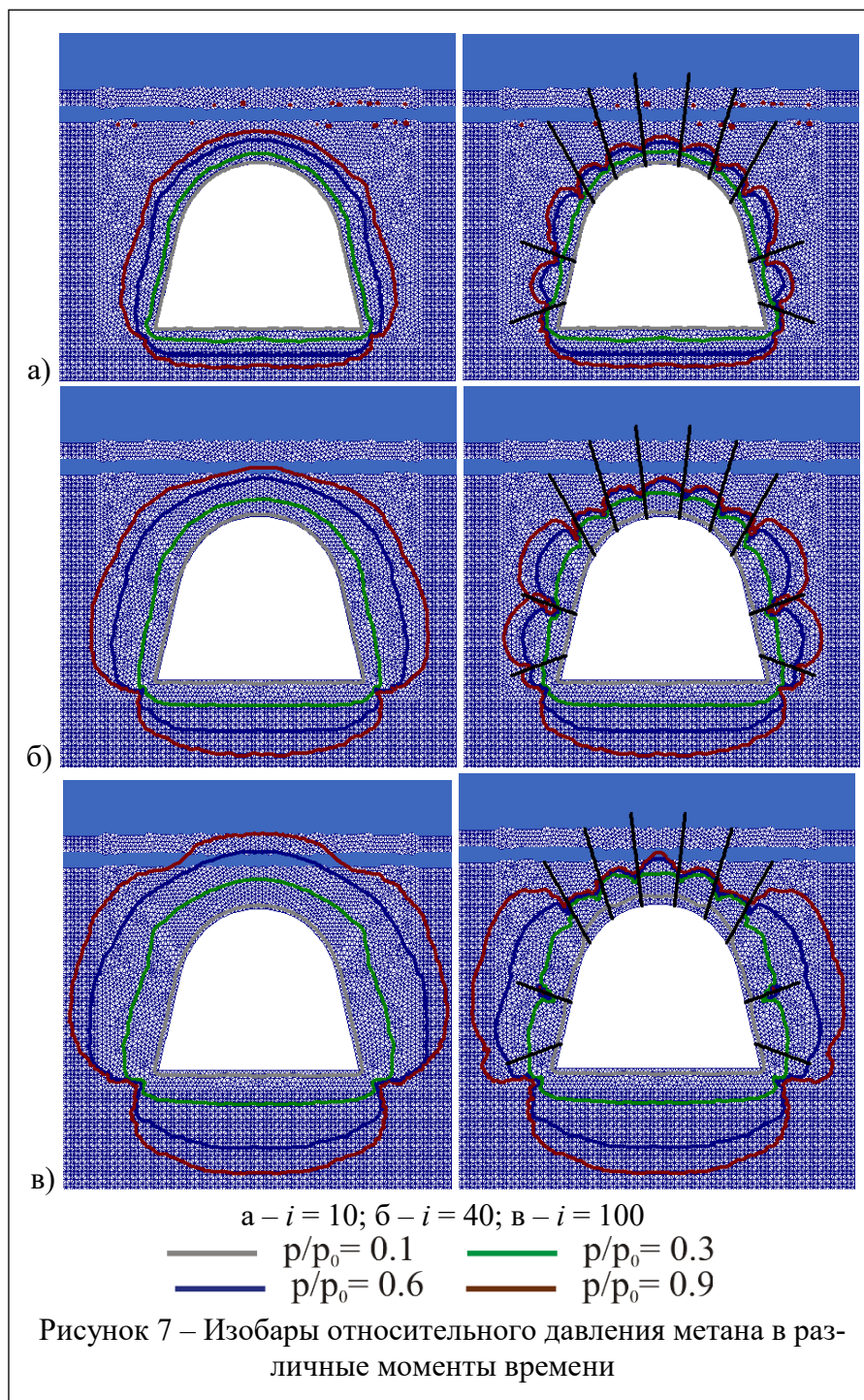
Графики изменения давления метана вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр выработки, при рамном и анкерном креплении показаны на рис. 9.

Видно, что в первом случае, рис. 9,а, падение давления, а, значит, и дегазация массива происходит на глубине до 2,0 м в кровле выработки. Применение анкерного крепления сокращает глубину области фильтрации в центральной части кровли до 1,2 м.

При этом процесс фильтрации становится менее интенсивным – скорости фильтрации метана, рис. 10, падают в 1,3-2 раза.

Применение анкерной крепи понижает значение разнотензорности поля напряжений в приконтурной области, сохраняет вмещающие породы в более устойчивом состоянии, сдерживает развитие области фильтрации вокруг выработки. Благодаря этому процесс фильтрации становится менее интенсивным, дебит метана в атмосферу выработки с анкерной крепью снижается.

Выводы. Разработан метод расчёта параметров связанных процессов деформирования углепородного массива и фильтрации метана с учётом их взаимного влияния и изменения во времени. Условием связи между геомеханическими и фильтрационными процессами служит зависимость коэффициентов проницаемости от компонент тензора напряжений, обратная связь реализуется через учёт сил, обусловленных давлением газа, в расчёте суммарной силы, действующей на каждую точку твёрдого тела. С помощью предложенного метода можно



исследовать метановыделение в горные выработки, эффективность работы дегазационных скважин в различных горно-геологических и технологических условиях; выполнить расчёт геомеханических и фильтрационных параметров угленосного массива в тектонически нарушенной зоне угольного пласта, при газодинамических явлениях.

В качестве примера рассмотрена задача о фильтрации метана в горную выработку. Показано, что с течением времени в приконтурных породах увеличивается разнокомпонентность поля напряжений, область неупругих деформаций, где проницаемость массива максимальна, увеличивается. В случае рамного крепления в область фильтрации попадают близлежащие источники метановыделения, метан из которых может легко перемещаться в атмосферу выработки.

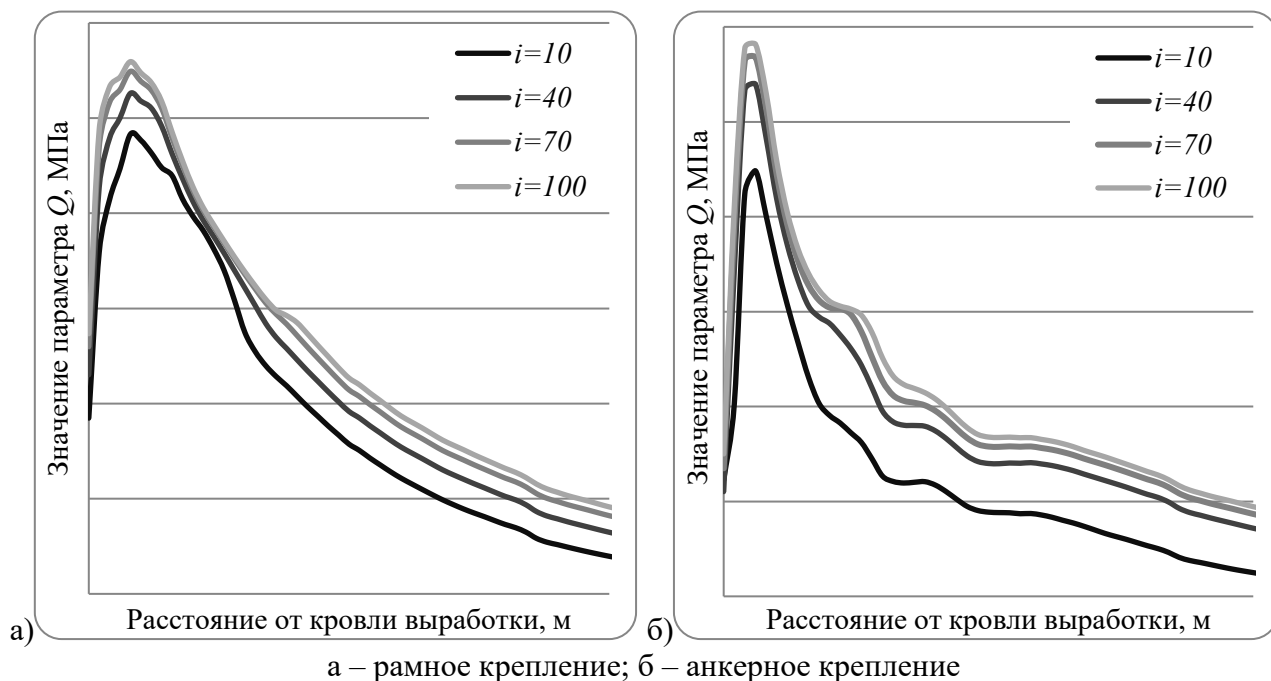


Рисунок 8 – Изменение значений параметра Q^* в кровле выработки

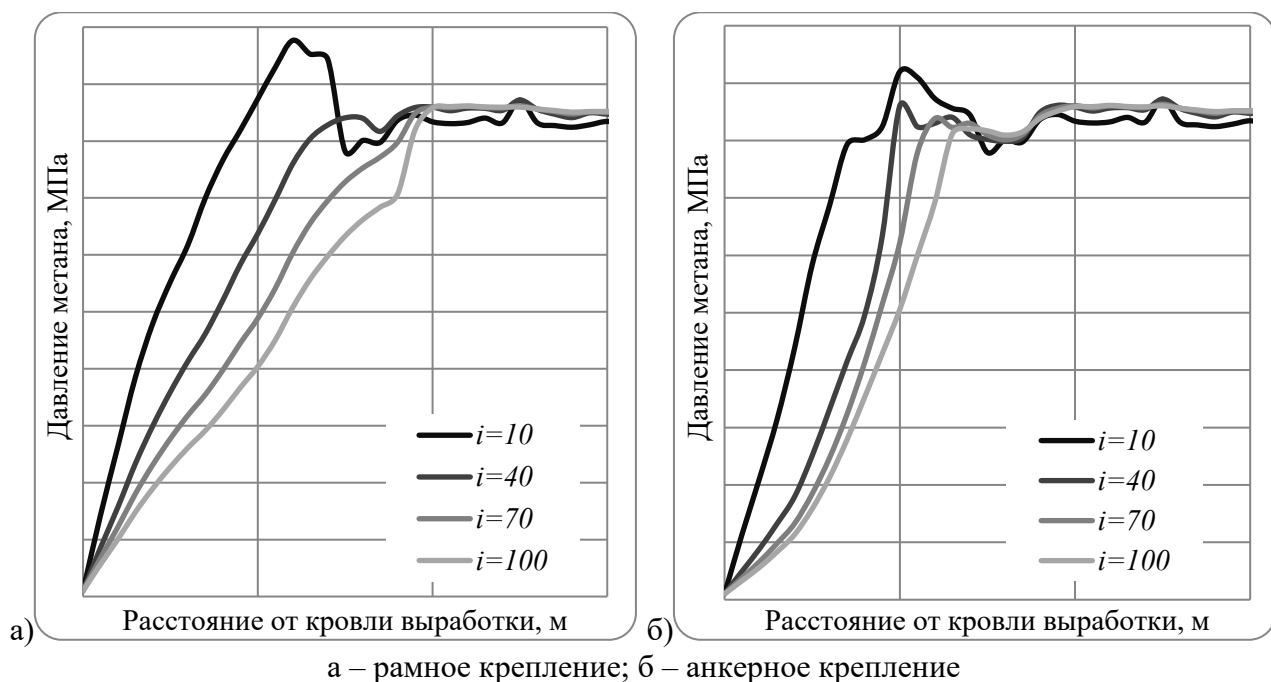


Рисунок 9 – Изменение давления метана в кровле выработки

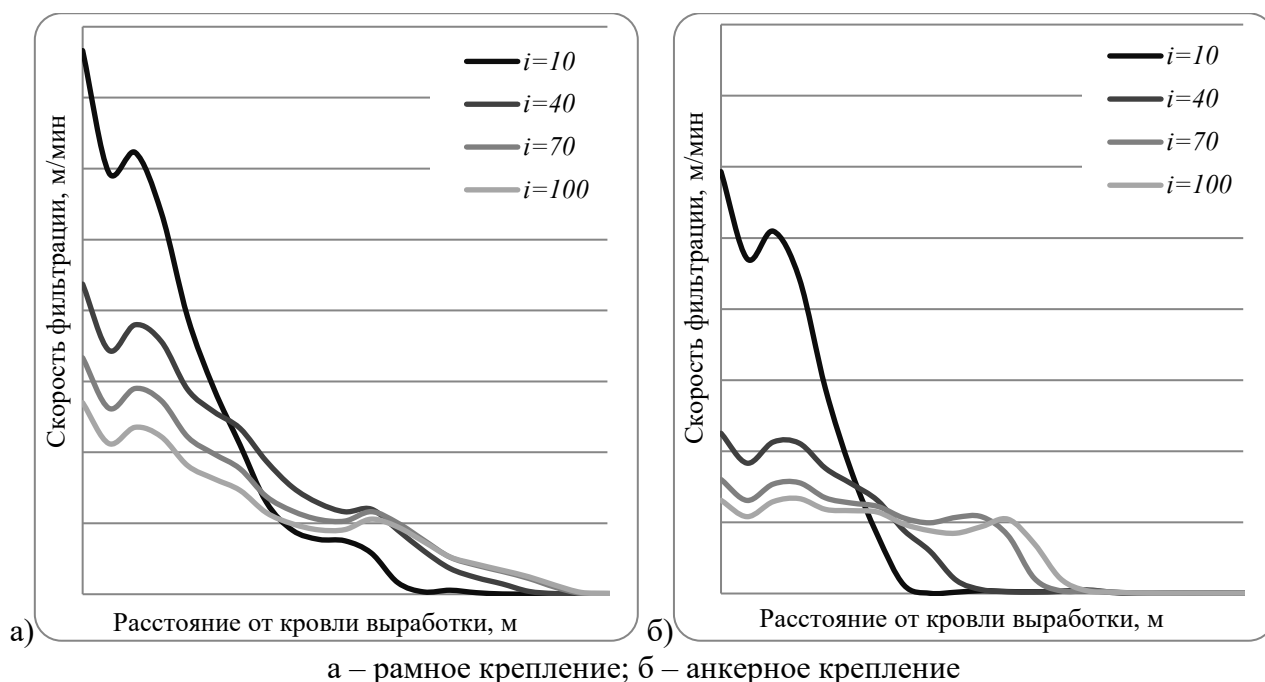


Рисунок 10 – Изменение модуля скорости фильтрации в кровле выработки

Применение анкерной крепи понижает значение разнокомпонентности поля напряжений в приконтурной области, сохраняет вмещающие породы в более устойчивом состоянии, сдерживает развитие области фильтрации вокруг выработки. Благодаря этому процесс фильтрации становится менее интенсивным, дебит метана в атмосферу выработки с анкерной крепью снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zienkiewicz, O.C. The finite element method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann, 2000. – Т. 1. – 690 p.
2. Serafim, J.L. Rock Mechanics and Eng. Practice / J.L. Serafim, K.G. Stagg, O.C. Zienkiewicz. – Wiley, 1988. – 388 p.
3. Баклашов, И.В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
4. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Мир, 1969. – Т. 1. – 648 с.
5. Numerical modeling of stress-dependent permeability / M. Bai, F. Meng, D. Elsworth et al.: ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium / International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997. – № 34:3-4. – P. 2.e1-2.e14.
6. Permeability characterization for modeling methane flow in coal seams. / S. Durucan, T.S. Daltaban, J.Q. Shi, L. Foley // Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium. – Tuscaloosa, Alabama. – 1993. – P. 453-460.
7. Булат, А.Ф. Компьютерное моделирование фильтрации метана в подработанном горном массиве в трехмерной постановке / А.Ф. Булат, В.В. Круковская // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 57. – С. 3-12.
8. Круковская, В.В. Закономерности протекания десорбционно-фильтрационных процессов в тектонически нарушенной зоне угольного пласта / В.В. Круковская, А.Н. Молчанов // Физико-технические проблемы горного производства: Сборник научных трудов ИФГП НАН Украины. – Днепр, 2016. – № 18. – С. 91-102.
9. Круковский, А.П. Изменение геомеханических параметров газонасыщенного углепородного массива при газодинамических явлениях / А.П. Круковский, В.В. Круковская // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 122. – С. 57-66.
10. Круковская, В.В. Изменение проницаемости угля и параметров течения метана на фронте выброса / В.В. Круковская // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 78. – С.34-42
11. Изменение параметров фильтрации метана в углепородном массиве вокруг выемочного штрека

при использовании различных способов его охраны / С.П. Минеев, В.В. Круковская, А.П. Круковский, В.Н. Кочерга / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 126. – С. 92-105.

12. Круковская, В.В. Эффективность работы дегазационных скважин при использовании различных способов охраны выемочного штрека / В.В. Круковская, А.П. Круковский, В.Н. Кочерга // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 4(99). – С. 36-41.

13. Круковская, В.В. Закономерности изменения параметров фильтрации метана во времени при остановке очистного забоя / В.В. Круковская // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 98. – С. 49-58.

REFERENCES

1. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2000), *The finite element method*, Butterworth-Heinemann, Oxford-Auckland-Boston-Johannesburg-Melbourne-New Delhi.

2. Serafim, J.L., Stagg, K.G. and Zienkiewicz, O.C. (1988), *Rock Mechanics and Eng. Practice*, Wiley.

3. Baklashov, I.V. and Kartoziya, B.A. (1984), *Mehanika podzemnykh sooruzheniy i konstruktivnykh krepey* [Mechanics of underground structures and structures of supports], Nedra, Moscow, USSR.

4. Nadai, A. (1969), *Plastichnost i razrushenie tverdykh tel* [Plasticity and fracture of solids], Mir, Moscow, USSR.

5. Bai, M., Meng, F., Elsworth, D. et al. (1997), "Numerical modeling of stress-dependent permeability", *ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, no. 34:3-4, pp. 2.e1-2.e14.

6. Durucan, S., Daltaban, T.S., Shi, J.Q. and Foley, L. (1993), "Permeability characterization for modeling methane flow in coal seams", *Proceedings of the International Coalbed Methane Symposium*, Tuscaloosa, Alabama, pp. 453-460, USA.

7. Bulat, A.F. and Krukovskaya, V.V. (2005), "Computer simulation of methane filtration in undermining massif in three-dimensional statement", *Geotechnical Mechanics*, no. 57, pp. 3-12, Ukraine.

8. Krukovskaya, V.V. and Molchanov, A.N. (2016), "Regularities of the desorption-filtration processes in the zone of tectonic dislocation of the coal seam", *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, IPMP of the NAS of Ukraine, no. 18, pp. 91-102.

9. Krukovskiy, A.P. and Krukovskaya, V.V. (2015), "Changing the geomechanical parameters of gas-saturated coal-rock massif at the gas-dynamic phenomena", *Geotechnical Mechanics*, no. 122, pp. 57-66, Ukraine.

10. Krukovskaya, V.V. (2008), "Change of coal permeability and parameters of the methane flow at the outburst front", *Geotechnical Mechanics*, no. 78, pp. 34-42, Ukraine.

11. Mineev, S.P., Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. and Kocherga, V.N. (2016), "Change methane filtration parameters in coal-rock massif around breakage heading by using different modes of fastening", *Geotechnical Mechanics*, no. 126, pp. 92-105, Ukraine.

12. Krukovskaya, V.V., Krukovskiy, A.P. and Kocherga, V.N. (2016), "The efficiency of the degasification wells using different ways to protect the gate road", *Transactions Of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 4(99), pp. 36-41, Ukraine.

13. Krukovskaya, V.V. (2012), "Behavior of methane filtering parameters in time at stopping long wall", *Geotechnical Mechanics*, no. 98, pp. 49-58, Ukraine.

Об авторах

Круковская Виктория Викторовна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, igtm@ukr.net.

Круковский Дмитрий Александрович, студент Днепропетровского Национального Университета им. Олеса Гончара (ДНУ им. О. Гончара), Днепр, Украина.

About the authors

Krukovskaya Victoriya Victorovna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, igtm@ukr.net

Krukovskiy Dmitriy Aleksandrovich, student of Oles Honchar Dnipropetrovsk National University (O. Honchar DNU), Dnipro, Ukraine

Анотація. Розроблено метод розрахунку параметрів зв'язаних процесів деформування вуглепородного масиву і фільтрації метану з урахуванням їх взаємного впливу і зміни в часі. Умовою зв'язку між геомеханічними і фільтраційними процесами служить залежність коефіцієнтів проникності від компонент тензора напружень. Зворотній зв'язок реалізовується через облік сил, обумовлених тиском газу, в розрахунку сумарної сили, що діє на кожну точку твердого тіла. Наведено блок-схему алгоритму розрахунку. На кожній часовій ітерації розраховуються: поля переміщень, напружень, коефіцієнтів проникності, параметри фільтрації метану.

За допомогою запропонованого методу можна дослідити метановиділення в гірничі виробки, ефективність роботи дегазаційних свердловин в різних гірничо-геологічних і технологічних умовах; виконати розрахунок геомеханічних і фільтраційних параметрів вуглепородного масиву в тектонічно порушеній зоні вугільного пласта, при газодинамічних явищах. Як приклад розглянуто задачу про фільтрацію метану в гірничу виробку. Наведено результати розрахунку геомеханічних параметрів, зон непружних деформацій, коефіцієнтів проникності та тиску метану в області фільтрації.

Ключові слова: зв'язані процеси, деформування вуглепородного масиву, фільтрація метану, алгоритм розрахунку

Abstract. Method for calculating parameters for the coupled processes of the coal-rock mass deformation and methane filtration was developed with taking into account process of mutual influence and in-time changes. The condition of interaction between the geomechanical and filtration processes is dependence between permeability coefficients and stress tensor components. Feedback is realized through the forces, which are caused by the gas pressure, and which are taken into account in the calculation of the total force acting in each point of the solid body. A block diagram of the calculation algorithm is shown. Displacement and stress fields, permeability coefficients, methane filtration parameters are calculated for each time iteration.

With the help of the method, it is possible: to study methane emission into the roadways and efficiency of degassing boreholes in different mining, geological and technological conditions; to calculate geomechanical and filtration parameters for the coal-rock mass in tectonically disturbed zone of the coal seam and at gas-dynamic phenomena. As an example, methane filtration into the roadway is considered. The calculated geomechanical parameters, zones of inelastic deformations, coefficients of permeability and methane pressure in filtration area are shown.

Keywords: coupled processes, deformation of coal-rock mass, methane filtration, calculation algorithm

Статья поступила в редакцию 26.05.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым