

М.А. Ильяшов, д-р техн. наук, проф.,  
А.В. Агафонов, д-р техн. наук  
А.А. Боднар, вед. инженер  
(ЗАО «Донецксталь» – металлургический завод)  
В.Н. Кочерга, зав. лаб.  
(МакНИИ)  
С.И. Скипочка, д-р техн. наук,  
В.В. Круковская, канд. техн. наук  
(ИГТМ НАН Украины)

## **МЕТАНООБИЛЬНОСТЬ ОЧИСТНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ РАЗРАБОТКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Наведено результати дослідження метановиділення до очисного вибою та на виїмкових ділянках шахти «Красноармійська-Західна №1» при швидкості посування очисного вибою близько 9 м/доб. За допомогою чисельних методів проведено розрахунки параметрів процесу фільтрації метану у вуглепородному масиві, що вміщує очисну виробку. Розрахунками підтверджується факт зниження метановиділення із газоносних порід та вугільних прошарків, що підробляються, при інтенсифікації видобутку.

## **METHANE OUTPUT IN THE BREAKAGE FACE BY INTENSIVE WORKING OF FLAT-LYING COAL SEAMS**

Results of researches of the gas emission in mining faces and on production units of mine "Pokrovskoe" at face advance about 9m/day are presented. The parameters of methane filtration process in a zone of a breakage face are calculated by numerical methods. The reduction of gas emission from a undermined gas rocks and coal layers at the intensification production of coal is confirmed by this calculations.

ОАО Угольная компания «Шахта «Красноармейская-Западная №1» ежегодно добывает около 6 млн. тонн высококачественного коксующегося угля. Программа технического перевооружения предприятия, направленная на концентрацию и интенсификацию горных работ предусматривает применение в очистных забоях оборудования, которое характеризуется максимальной производительностью и высокой надежностью. Так, в составе механизированных комплексов используются выемочные комбайны Joy, обеспечивающие добычу до 10 тыс. тонн угля в сутки. Однако основной проблемой, препятствующей достижению таких высоких результатов, является ожидаемый высокий уровень газовыделения на выемочном участке.

Горные работы на шахте ведутся по пласту  $d_4$ , который является опасным по внезапным выбросам угля и газа. Марка угля К. Пластовая промышленная зольность 16,2 - 21,1 %, выход летучих веществ 28,3 - 30,5 %. Мощность пласта на различных участках шахтного поля составляет 0,7 - 2,2 м. Выемочные участки подготавливаются по столбовой системе, обрабатываются обратным ходом. Подача воздуха производится с использованием как прямоточной схемы с подсвежением исходящей струи, так и возвратноточной. Для обеспечения газовой безопасности на выемочных участках применяется дегазация угольных пластов

и пород кровли через скважины, пробуренные из подготовительных выработок. При использовании возвратноточной схемы проветривания дополнительно проводится дегазация и изолированный отвод метана из выработанного пространства за пределы выемочного участка с помощью газоотсасывающих установок ВМЦГ-7М. При этом общая эффективность дегазации выработанного пространства достигает 80 - 95 %.

Для оценки параметров реального метановыделения проведены экспериментальные работы в 1 северной лаве блока № 3, рис. 1. Метанообильность участка и эффективность дегазации оценивались по результатам наблюдений, выполненных в рабочие смены при выемке угля комбайном. Измерениями определялись: средний расход газовой смеси, дебит и содержание метана в выработках и газопроводах. В очистной выработке поперечные газовые съемки производились при работе комбайна в соответствии с нормативной методикой [1].

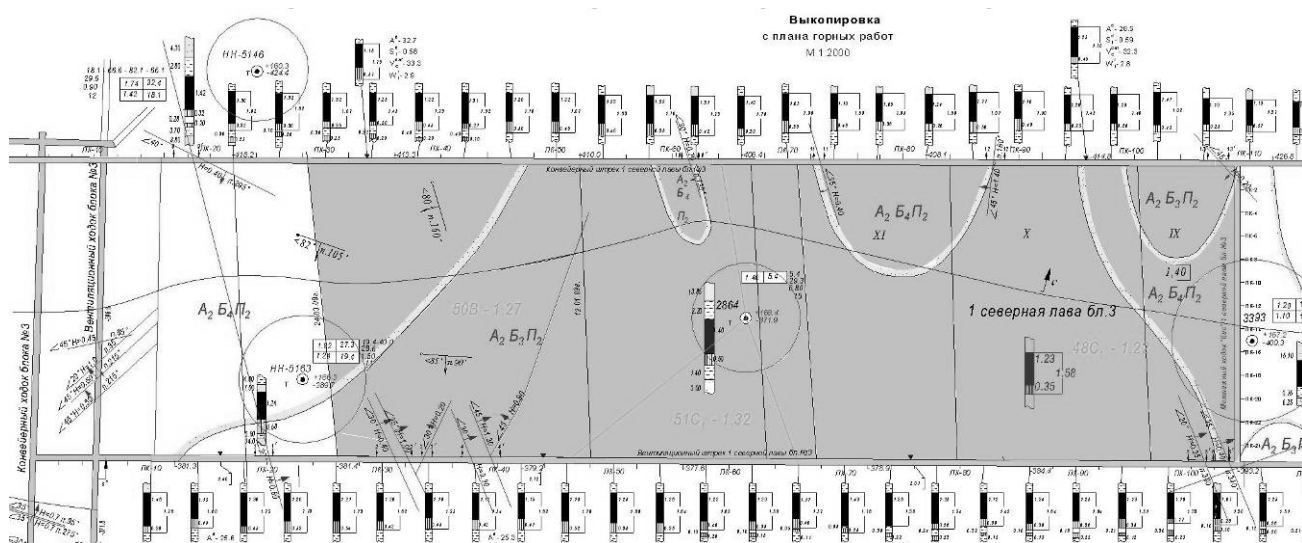


Рис. 1 – Выкопировка из плана горных работ. 1 северная лава блока № 3

Результаты наблюдений представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Дебит метана на участке 1 северной лавы блока №3

Расстояние лавы от монтажной камеры, м	Скорость подвигания забоя, м/сут	Дебит метана, м <sup>3</sup> /мин			Дебиты капируемого метана, м <sup>3</sup> /мин		
		в очистной выработке		общий на участке, $I_{уч.ф}$	скважины, $I_{скв}$	выработанное пространство, $I_{св}$	ВМЦГ, $I_{2.0}$
		фактический, $I_{оч.ф}$	расчетный, $I_{оч.р}$				
185	8,6	8,14	9,82	37,7	1,1	3,2	8,4
250	8,5	6,42	9,77	37,6	7,8	4,5	6,5
460	6,2	2,95	7,84	34,6	16,8	4,3	5,4
560	8,0	2,4	9,29	38,8	23,4	6,3	5Д

Результаты оценки фактического дебита метана показали существенное его отличие от расчетной величины, определяемой в соответствии с нормативной

методикой [2]. Разница возрастает с увеличением скорости подвигания лавы и эффективности дегазации кровли.

Для понимания физики данного явления напомним ряд известных положений.

Первое касается геомеханики поведения углепородного массива при высоких скоростях его обнажения. Согласно существующим представлениям, см., например, [3], с возрастанием скорости подвигания лавы увеличивается длина породной консоли, нависающей над выработанным пространством. При этом процесс трещинообразования в породах кровли замедляется, увеличивается размер блоков, на которые разрушаются газоносные песчаники кровли.

Второе – происходят изменения в электродинамике процесса. Уменьшается эмиссия электронов, обусловленная снижением площади поверхности свежесформированных трещин [4, 5]. Энергия этих электронов достаточна для активации связанных силами Ван-дер-Ваальса молекул метана. Следовательно, процесс десорбции метана при увеличении скорости подвигания фронта очистных работ также замедляется.

Для того чтобы представить, из каких источников метан попадает в очистной забой 1-й северной лавы и каковы пути его дренирования, построим математическую модель области горных пород, вмещающих саму лаву, примыкающие части 1-го северного конвейерного и вентиляционного штреков.

Геомеханические процессы и процессы фильтрации метана, протекающие в зонах ведения горных работ, имеют сложный пространственный характер. Параметры движения газа в этой области, напрямую зависящие от напряженного состояния горных пород, также изменяются по всем трем пространственным координатам. Основным уравнением, описывающим трехмерное движение газовой смеси, при условии наличия в области фильтрации газоносных пород, является уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \rho \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \rho \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \mu \frac{\partial q_i}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление газа;  $k$  – проницаемость породы;  $q_i$  – количество метана, находящегося в связанном состоянии в  $i$ -м метаноносном слое;  $\mu$  – вязкость газа;  $t$  – время.

При безинерционном движении и малых скоростях фильтрации справедлив закон Дарси:

$$\bar{u} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p; \quad (2)$$

где  $\bar{u}$  – вектор скорости фильтрации.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} p|_{\Omega_1} &= 0,8 * \gamma_{\text{воды}} h; \\ p|_{\Omega_2} &= 0,1 \text{ МПа,} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Omega_1$  – внешняя поверхность, ограничивающая область фильтрации;  $\Omega_2$  – внутренняя граница области фильтрации, контур выработки;  $\gamma_{\text{воды}}$  – плотность воды;  $h$  – высота вышележащей толщи горных пород.

Функцию газовыделения – третье слагаемое в выражении (1) – в случае газовыделения из угольного пласта будем считать равной [6]:

$$g(t) = g_0 \cdot e^{-at},$$

где  $g_0$  – начальное газовыделение;  $a$  – коэффициент, учитывающий свойства газоотдачи угольного пласта, которые зависят также от площади поверхности трещинно-порового пространства, а, значит, и от коэффициента проницаемости;  $t$  – время, прошедшее с момента начала газовыделения.

Истощение газовыделения из газоносных песчаников происходит примерно в 4 раза быстрее, чем из угля [7], значит:

$$g = g_0 \cdot e^{-a \frac{t}{4}}.$$

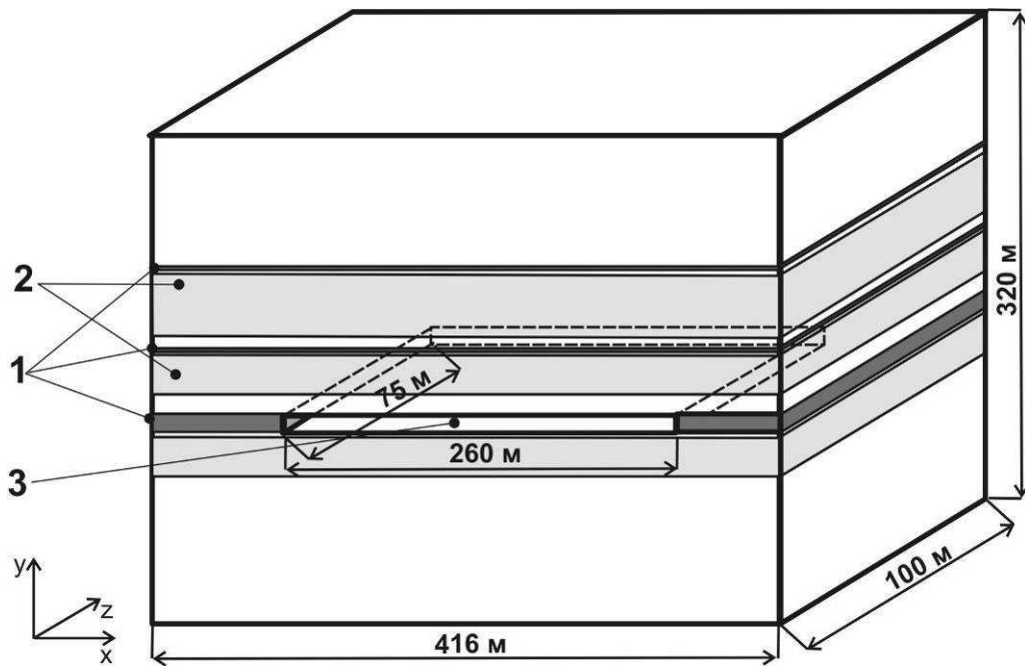
Уравнения (1) - (2) с граничными условиями (3) будем решать методом конечных элементов (МКЭ), который сегодня является мощным средством математического моделирования разнообразных процессов, происходящих в горном массиве. Основная концепция этого метода состоит в аппроксимации искомой непрерывной функции набором простых, кусочно-непрерывных функций, заданными над ограниченными областями – конечными элементами.

С целью определения границ области фильтрации и коэффициентов проницаемости в ней [8] с помощью МКЭ проводится расчет напряженно-деформированного состояния пород в объемной, упруго-пластической постановке.

Найдем распределение давлений метана, скоростей его движения и расходов в зоне влияния очистной выработки, расположенной на глубине 570 м. Длина лавы – 260 м. Средняя мощность разрабатываемого угольного пласта – 1,5 м. Система управления кровлей – полное обрушение.

Расчетная схема представлена на рис. 2.

Стратиграфическая колонка (скважина №3393) показана на рис. 3.



1 – уголь; 2 – газоносные песчаники; 3 – выработанное пространство

Рис. 2 – Расчетная схема

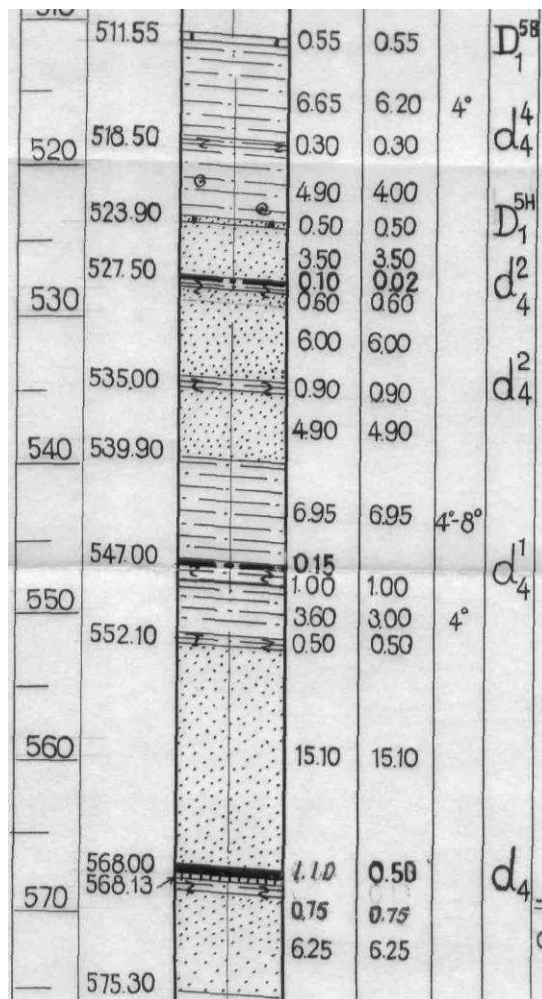


Рис. 3 – Стратиграфическая колонка

Потенциально опасными источниками метановыделения являются пласты-спутники  $d_4^1$  и  $d_4^2$  мощностью 0,2 и 0,5 м, а также песчаники, залегающие в кровле и почве пласта. Природная газоносность угля – 20 м<sup>3</sup>/т, песчаников – 3,5 м<sup>3</sup>/т.

В результате расчета получим распределения давления метана, скоростей его фильтрации и расходов в каждой точке исследуемой области при различных скоростях подвигания лавы. На рис. 4 показано распределение значений коэффициентов проницаемости в центральном продольном, на рис. 5 – в поперечном сечении исследуемой области для случаев, когда скорость подвигания очистного забоя  $V_{O3} = 3; 6; 9$  и 12 м/сут.

Видно, что значения коэффициентов проницаемости с увеличением скорости подвигания лавы понижаются, размеры области фильтрации сокращаются.

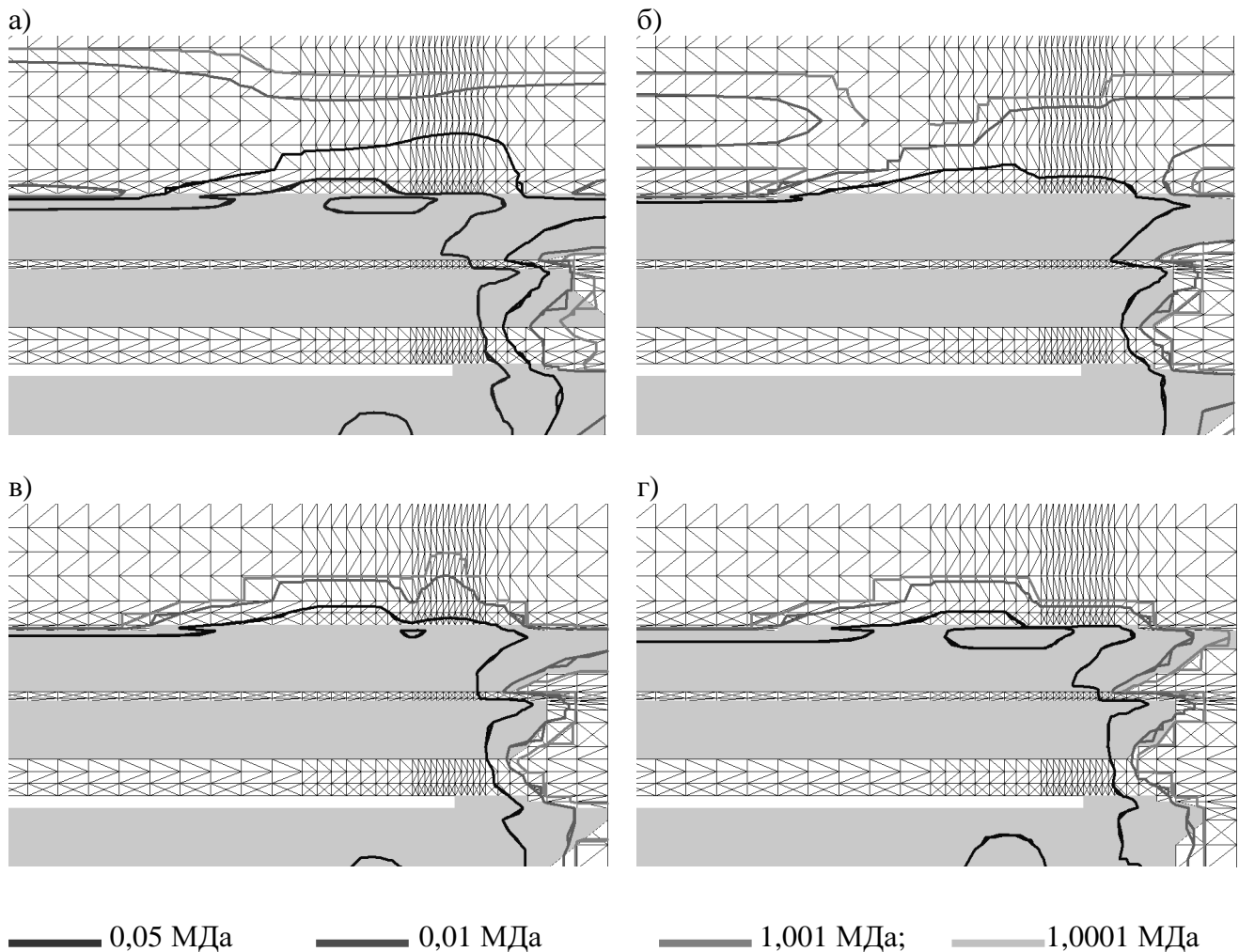
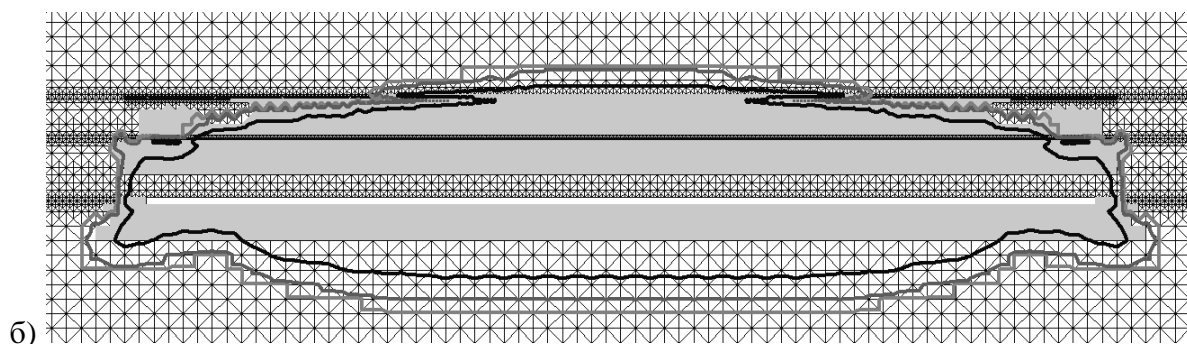
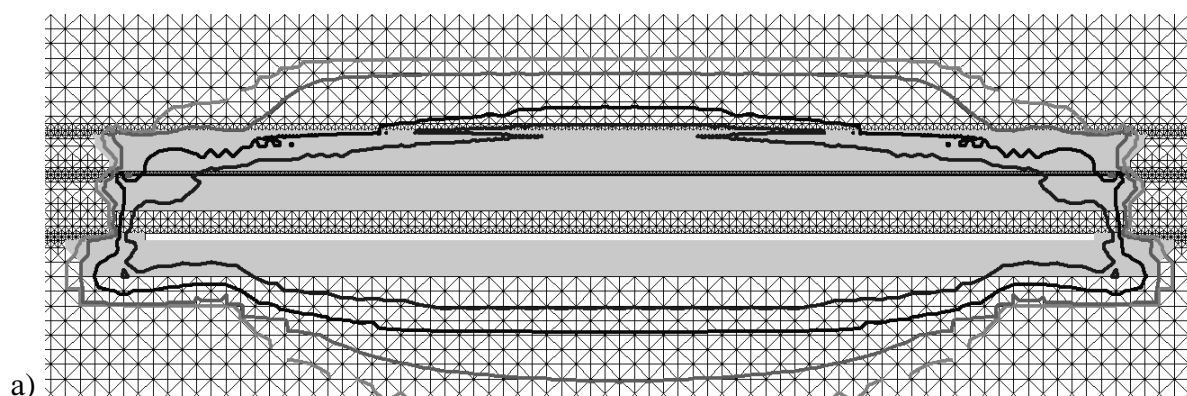


Рис. 4 – Изолинии равных значений коэффициентов проницаемости, сечение  $x=500$  м



————— 0,05 МПа      ————— 0,01 МПа      ————— 1,001 МПа;;      ————— 1,0001 МПа

а)  $V_{O_3} = 3$  м/сут; б)  $V_{O_3} = 9$  м/сут

Рис. 5 – Изолинии равных значений коэффициентов проницаемости, сечение  $z=50$  м

Объем области фильтрации по сравнению с ее объемом при  $V_{O_3} = 3$  м/сут уменьшается на 19,6 % при  $V_{O_3} = 6$  м/сут; на 46,6 % при  $V_{O_3} = 9$  м/сут; на 52,0 % при  $V_{O_3} = 12$  м/сут. Внутри области фильтрации попадают и два газоносных песчаника и два угольных пропластка кровли выработки. Однако с увеличением скорости подвигания лавы размеры этих источников газовыделения уменьшаются – при  $V_{O_3} = 12$  м/сут верхний угольный пропласток и верхняя часть газоносного песчаника уже находятся за пределами области фильтрации, передняя граница которой подвигается ближе к линии очистного забоя.

На рис. 6 показано распределение относительного давления метана ( $p/p_0$ , где  $p_0$  – давление метана в нетронутом массиве) в центральном продольном сечении исследуемой области, на рис. 7 – в поперечном (сечение плоскостью  $z=50$  м, 25 м за лавой) для случаев, когда  $V_{O_3} = 3; 6; 9$  м/сут.

Из рисунков видно, что в нетронутом массиве давление метана сохраняется на уровне пластового. В области фильтрации, расположенной в нарушенных очистными работами горных породах, находится зона пониженного давления, из которой метан частично уже переместился в атмосферу выемочного участка.

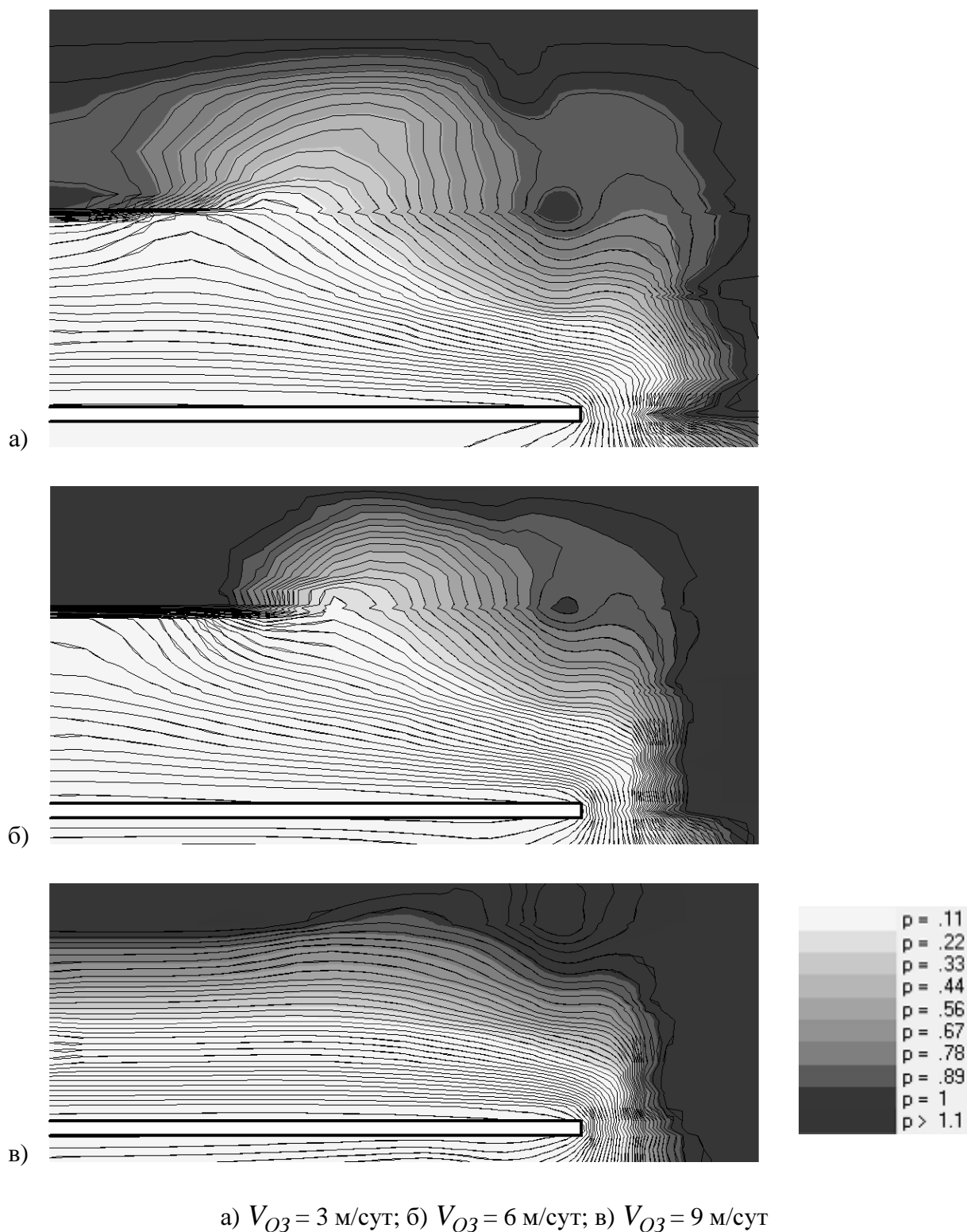
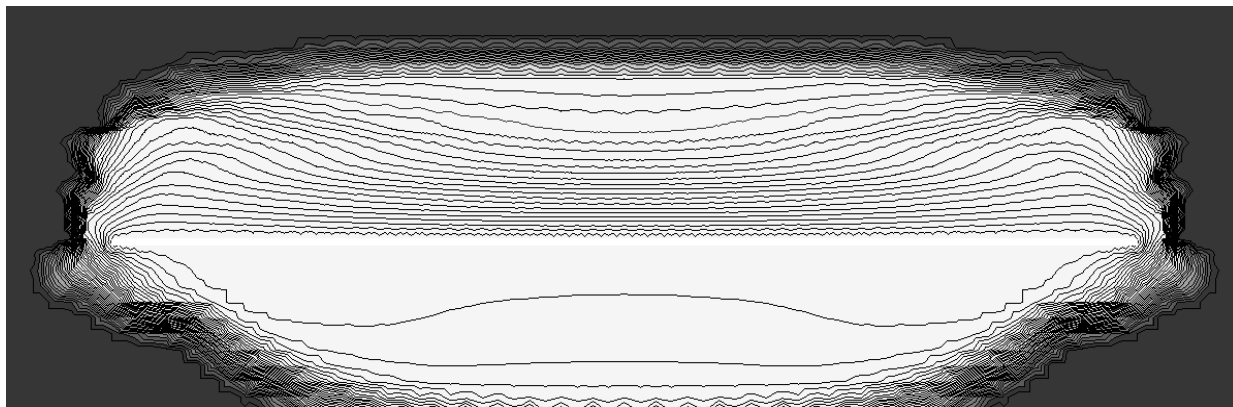


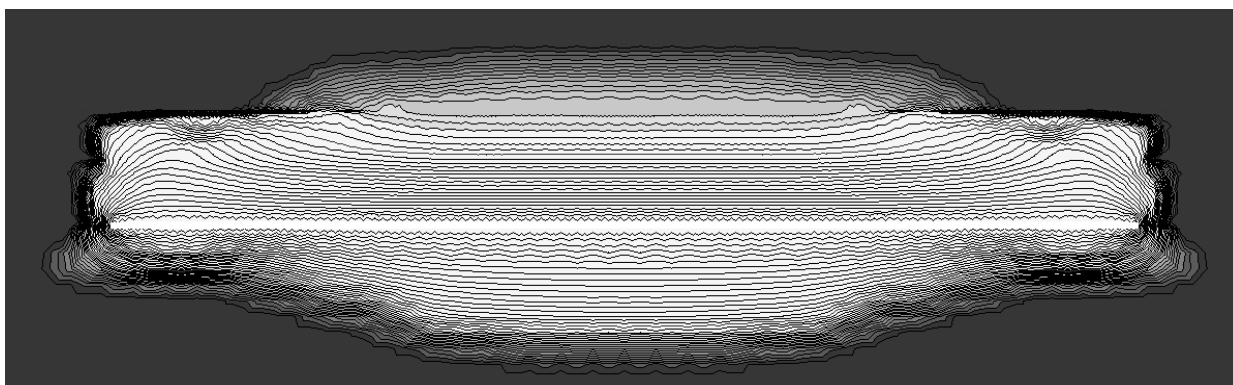
Рис. 6 – Изобары относительного давления и линии тока метана в центральном продольном сечении исследуемой области

При увеличении скорости подвигания область пониженного давления метана уменьшается, рис. 6-7, снижаются скорости его десорбции и фильтрации в подрабатываемых породах, и, как следствие, сокращается количество метана, поступающее в очистной забой.

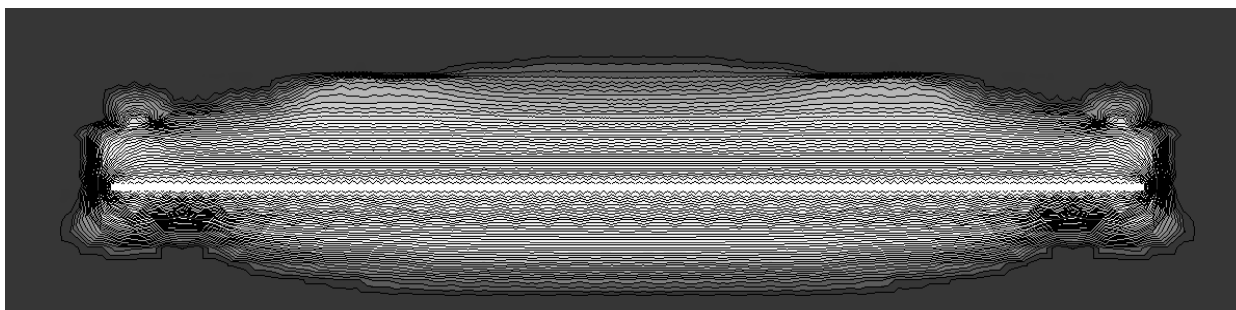




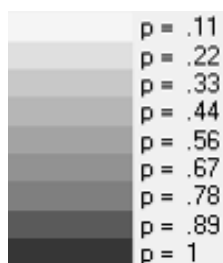
а)



б)



в)



а)  $V_{O_3} = 3$  м/сут; б)  $V_{O_3} = 6$  м/сут; в)  $V_{O_3} = 9$  м/сут

Рис. 7 – Изобары относительного давления и линии тока метана в поперечном сечении исследуемой области,  $z=50$  м

Из рассчитанного массива значений давления метана выберем данные о давлении в подрабатываемых угольных пропластках при различных скоростях подвигания лавы, рис. 8-9. Видно, что в ближнем пропластке, рис. 8, давление метана достигает более низких значений, метан из него быстрее перемещается в атмосферу выработки. Он хорошо дегазируется, в отличие от пропластка, расположенного выше.

При увеличении скорости подвигания очистного забоя  $V_{оз}$  кривые изменения давления поднимаются вверх, остаточное давление метана повышается с 0,25 до 0,6, рис. 8. Давление в верхнем угольном пропластке при  $V_{оз} = 9$  м/сут лишь незначительно отклоняется от пластового давления в нетронутом массиве, рис. 9. Это говорит о том, что при такой скорости подвигания лавы метан из него практически не поступает в очистную выработку.

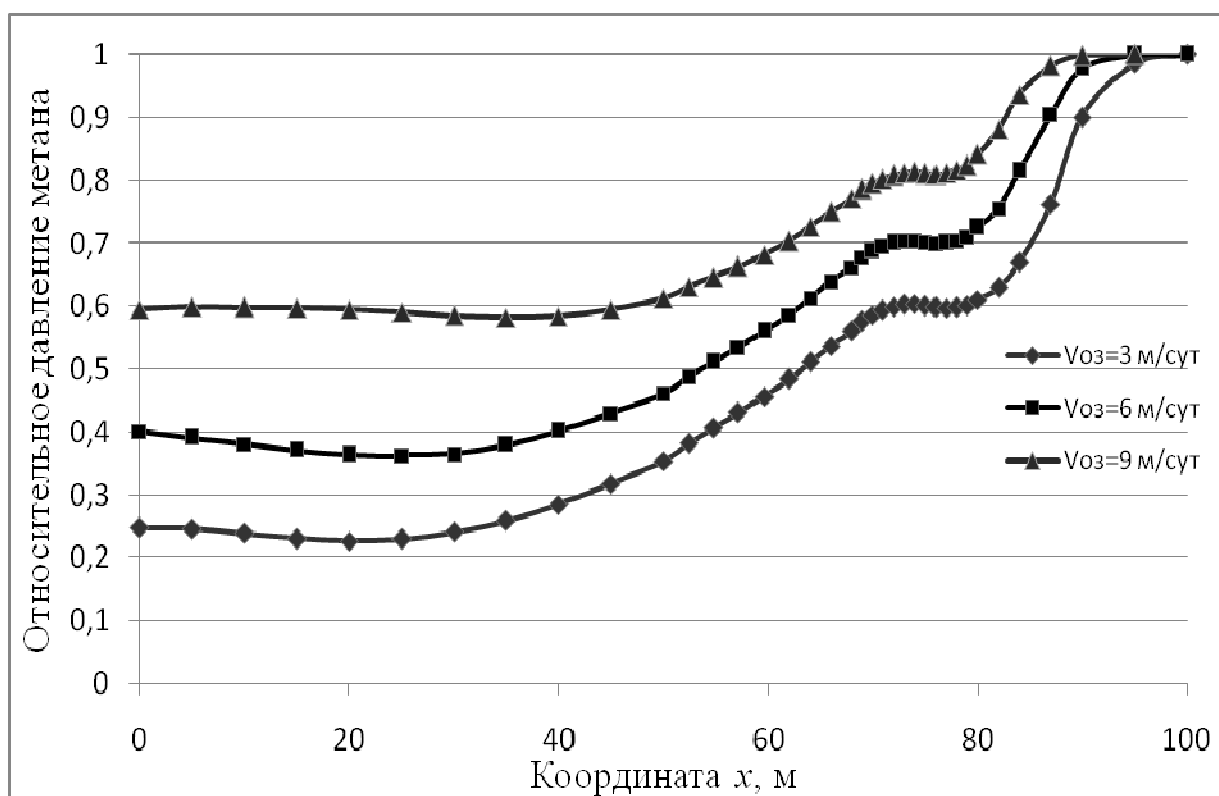


Рис. 8 – Изменение давления в угольном пропластке при его подработке (высота 20 м над разрабатываемым пластом, очистной забой – в плоскости  $x = 75$  м)

Повышение давления при увеличении скорости подвигания лавы приводит также к замедлению процесса десорбции метана из подрабатываемых угольных пропластков.

Из расчетных данных следует, что без учета влияния наличия дегазационной системы изменение скорости подвигания с 3 до 9 м/сут влечет за собой уменьшение объема области фильтрации  $V_{оф}$  на 46,6 %; газовыделения  $Q_{подр}$  из подрабатываемых угольных пропластков и газоносных песчаников на 17,4 %; притока метана в очистной забой из кровли очистной выработки  $Q_{min}$  на 38,2 %, рис. 10.

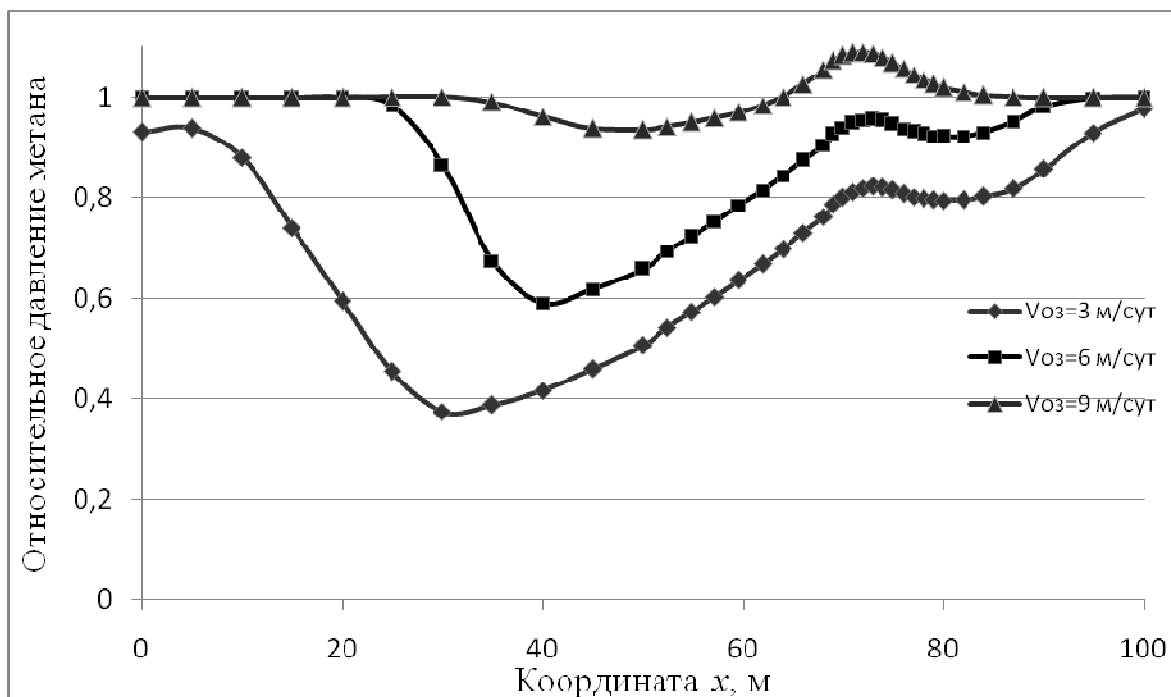


Рис. 9 – Изменение давления в угольном пропластке при его подработке (высота 38 м над разрабатываемым пластом, очистной забой – в плоскости  $x = 75$  м)

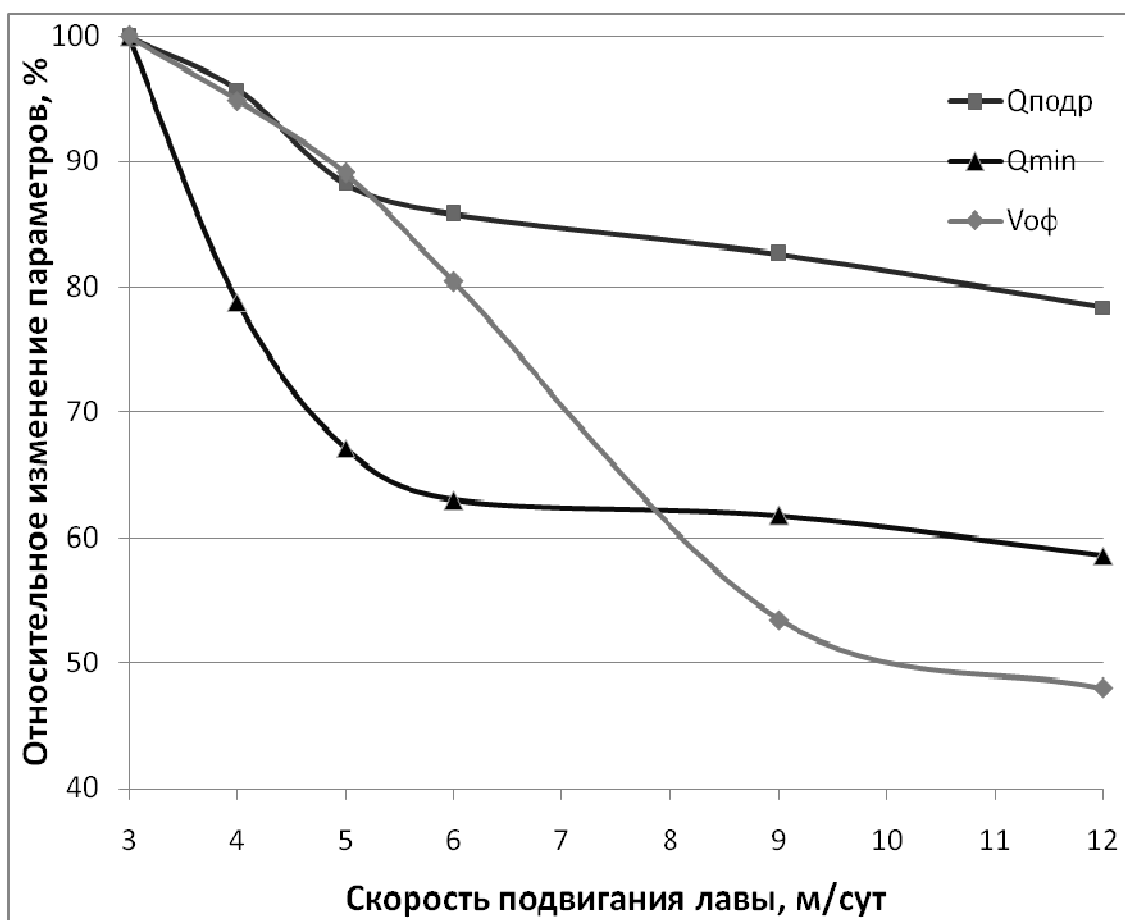


Рис. 10 – Изменение параметров фильтрации метана с увеличением скорости подвигания лавы

Построив функции регрессии, эти показатели можно выразить через скорость подвигания очистного забоя следующим образом:

$$Q_{\text{нодр}} = 0,41\ln^2(V_{\text{оз}} - 2) - 10,36\ln(V_{\text{оз}} - 2) + 100,52;$$

$$Q_{\text{мин}} = e^{0,1\ln^2(V_{\text{оз}} - 2) - 0,45\ln(V_{\text{оз}} - 2) + 4,61},$$

$$V_{\text{оф}} = 0,43V_{\text{оз}}^2 - 13,02V_{\text{оз}} + 116,61.$$

Скорость подвигания очистного забоя,  $V_{\text{оз}}$ , изменяется в пределах от 3 до 12 м/сут.

Погрешность аппроксимации при этом не превышает 5 %.

Таким образом, в результате проведения практических наблюдений и численных расчетов установлено, что при увеличении скорости ведения добычных работ происходит снижение газовыделения из подрабатываемых газоносных пород и угольных пропластков, обусловленное замедлением процесса трещинообразования в породах кровли и, как следствие, процессов десорбции метана и фильтрации его в атмосферу выработок очистного участка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по производству депрессионных и газовых съемок в угольных шахтах. – М.: Недра, 1975. – 96 с.
2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – К.: Основа, 1994. – 312 с.
3. Скипочка С.И. Элементы геомеханики углепородного массива при высоких скоростях подвигания лав / С.И. Скипочка, Б.М. Усаченко, В.Ю. Куклин. - Днепропетровск: Лира, 2006. - 248 с.
4. Открытие № 275. Свойство пород угольных формаций в процессе своего разрушения проявлять дополнительную десорбцию связанных молекул метана / М.А. Ильяшов, С.И. Скипочка, Б.М. Усаченко, В.В. Назимко, А.В. Мухин. – №А-334; Заявл. 21.07.2004; Приоритет 19.12.2002.
5. Булат А. Ф. Метаногенерация в угольных пластах / А. Ф. Булат, С.И. Скипочка, Т.А. Паламарчук, В.А. Анциферов – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. – 328 с.
6. Мясников А.А. Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах / А.А. Мясников, В.П. Садохин, Т.С. Жирнова – М: Недра, 1977.- 248 с.
7. Малышев Ю.Н. Фундаментально-прикладные методы решения проблем метана угольных пластов / Ю.Н. Малышев, К.Н. Трубецкой, А.Т. Айруни – М.: Изд. Академии горных наук, 2000. – 519 с.
8. 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. / НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск. – 2005. – № 57. – С. 3-12.