УДК 622.817

А.В.АГАФОНОВ, *д-р техн. наук, генеральный директор, agafonov.av@donetsksteel.com*
М.А.ИЛЬЯШОВ, *д-р техн. наук, первый зам. генерального директора, ilyahov@donetsksteel.com*
«Донецксталь – металлургический завод», Донецк, Украина
В.Н.КОЧЕРГА, *канд. техн. наук, зав. лабораторией, maknii.ra@gmail.com*
Макеевский государственный НИИ по безопасности работ в горной промышленности, Украина
С.И.СКИПОЧКА, *д-р техн. наук, зав. отделом, skipochka@ukr.net*
В.В.КРУКОВСКАЯ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, igtm@ua.fm*
Институт геотехнической механики Национальной академии наук Украины, Днепропетровск

O.V.AGAFONOV, *Dr. in eng. sc, general director, agafonov.av@donetsksteel.com*
M.A.ILYASHOV, *Dr. in eng. sc, first vice-general director, ilyashov@donetsksteel.com*
Donetsksteel Iron & Steel Works Private Joint Stock Company, Donetsk, Ukraine
V.N.KOCHERGA, *PhD in eng. sc., Head of laboratory, maknii.ra@gmail.com*
Makeevka State Coal Mine Safety Research Institute, Ukraine
S.I.SKIPOCHKA, *Dr. in eng. sc, skipochka@ukr.net*
V.V.KRUKOVSKAYA, *PhD in eng. sc., senior research assistant, igtm@ua.fm*
Institute of Geotechnical Mechanics at National Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk

НОВЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ОТРАБОТКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Натурными наблюдениями и математическим моделированием метановыделения при повышении интенсивности отработки пологих угольных пластов установлено, что при увеличении скорости подвигания выемочного участка замедляются процессы десорбции метана и фильтрации его в атмосферу очистной выработки. Выявленные закономерности являются научной базой для определения допустимых по газовому фактору нагрузок на высокопроизводительные очистные забои.

***Ключевые слова*:** геомеханические процессы, электродинамика процесса, процесс фильтрации метана, процесс десорбции метана, фильтрации в атмосферу, нетронутый массив, пологие угольные пласты, высокопроизводительные очистные забои, интенсивность отработки, система дегазации.

NEW OBJECTIVE LAWS OF METHANE EXHALATION DURING INTENSIVE MINING OF SHALLOW COAL SEAMS

Natural observations and mathematical modeling of methane exhalation during increase of intensive mining in shallow coal seams have found that when excavation speed of coal area movement increases, process of methane desorption and its filter into atmosphere of working face is delayed. Discovered objective laws are subject to create scientific base to determine loading factor of highly productive working face, allowed as per gas ratio.

***Key words*:** geomechanical processes, process electrodynamics, process of a filtration of methane, process of a desorption of methane, filter into atmosphere,the untouched massif, shallow coal seams, highly productive working face, excavation speed, degassing system.

На современных угледобывающих предприятиях основной проблемой, препятствующей достижению высоких нагрузок на очистной забой, является ожидаемый значительный уровень газовыделения на выемочном участке. Для ее решения специалистами компании «Донецксталь» с привлечением ведущих ученых Макеевского государственного НИИ по безопасности работ в горной промышленности и Института геотехниче-

ской механики НАН Украины был проведен комплекс исследований метановыделения в очистных выработках при интенсивной отработке пологих угольных пластов.

В качестве объекта было выбрано шахтоуправление «Покровское», характеризующееся наличием высоконагруженных очистных забоев и высокой природной газоносностью отрабатываемого пласта d_4, являющегося 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 0,7-2,2 м. Выемочные участки подготавливаются по столбовой системе, отрабатываются обратным ходом. Подача воздуха производится с использованием как прямоточной схемы с подсвежением исходящей струи, так и возвратно-точной. Для обеспечения газовой безопасности на выемочных участках применяется дегазация угольных пластов и пород кровли через скважины, пробуренные из подготовительных выработок. При использовании возвратно-точной схемы проветривания дополнительно проводится дегазация и изолированный отвод метана из выработанного пространства за пределы выемочного участка с помощью газоотсасывающих установок.

Для оценки параметров реального метановыделения проведены экспериментальные работы в 1-й северной лаве блока № 3. 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 [7]. Результаты наблюдений представлены в таблице.

Оценка фактического дебита метана показала существенное его отличие от расчетной величины, определяемой в соответствии с нормативной методикой [8]. Разница возрастает с увеличением скорости подвигания лавы и эффективности дегазации кровли.

Для описания физической сущности данного явления использованы известные положения.

Первое касается геомеханических процессов в углепородном массиве при высоких скоростях его обнажения. Согласно существующим представлениям, например [9], с возрастанием скорости подвигания лавы увеличивается длина породной консоли в выработанном пространстве. При этом процесс трещинообразования в породах кровли замедляется, увеличивается размер блоков, на которые разрушаются газоносные песчаники кровли.

Второе обусловлено изменениями в электродинамике процесса. Уменьшается эмиссия электронов, вызванная снижением площади поверхности свежеобразованных трещин [3, 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 проникает в очистной забой 1-й северной лавы и каковы пути его дренирования, создана математическую модель области горных пород, вмещающая очистной забой, 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 пространственным координатам. Трехмерное движение газовой смеси, при наличии в области фильтрации газоносных пород описывается уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \rho \frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \rho \frac{\partial p}{\partial y}\right)+$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \rho \frac{\partial p}{\partial z}\right)=\mu \frac{\partial q_i}{\partial t}, \qquad (1)$$

Дебит метана на участке 1-й северной лавы блока № 3

Расстояние лавы от монтажной камеры, м	Скорость подвигания забоя, м/сут	Дебит метана, м^3/мин			Дебиты каптируемого метана, м^3/мин		
		в очистной выработке		общий на участке	Скважины	Выработанное пространство	Газо-отсасывающая установка
		фактический	расчетный				
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	5,1

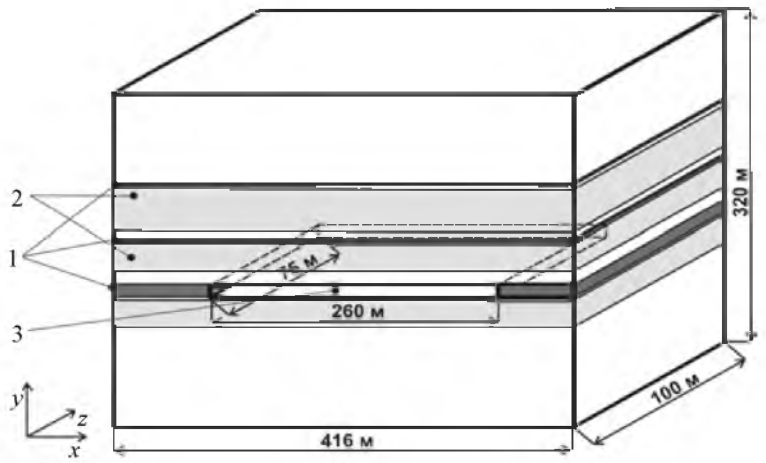


Рис.1. Расчетная схема
1 – уголь; 2 – газоносные песчаники; 3 – выработанное пространство

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

При безынерционном движении и малых скоростях фильтрации справедлив закон Дарси

$$\overline{u} = -\frac{k}{\mu}\operatorname{grad} p; \qquad (2)$$

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

Граничные условия имеют вид

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

где Ω_1 – внешняя поверхность, ограничивающая область фильтрации; Ω_2 – внутренняя граница области фильтрации (контур выработки); $\gamma_в$ – плотность воды; h – высота вышележащей толщи горных пород.

Третье слагаемое в выражении (1) – функция газовыделения, в случае газовыделения из угольного пласта представляется следующим образом [4]:

$$g(\mathrm{t}) = g_0 \mathrm{e}^{-at}.$$

где g_0 – начальное газовыделение; a – коэффициент, учитывающий свойства газоотдачи угольного пласта, которые зависят также от площади поверхности трещинно-порового пространства 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 [2], следовательно

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

Уравнения (1)-(2) с граничными условиями (3) решено методом конечных элементов (МКЭ). С целью определения границ области фильтрации и коэффициентов проницаемости в ней [1] с помощью МКЭ проводится расчет напряженно-деформированного состояния пород в объемной, упруго-пластической постановке (рис.1).

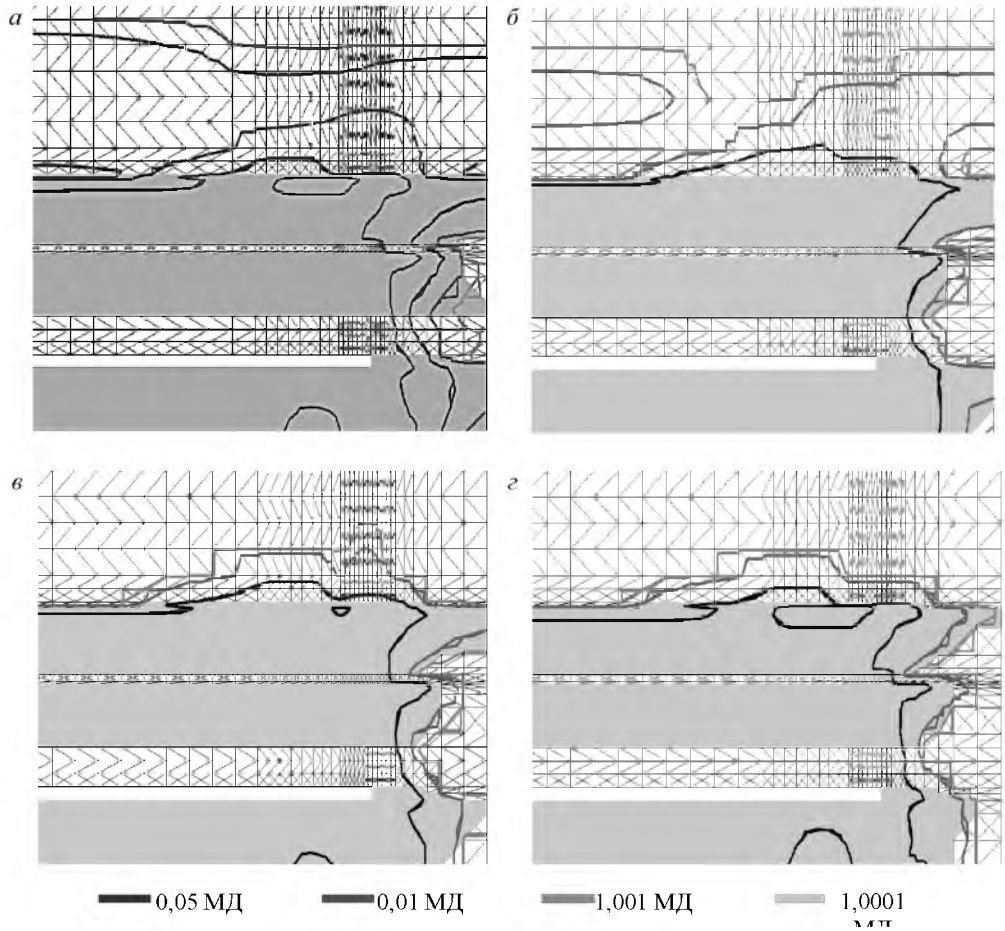


Рис.2. Изолинии равных значений коэффициентов проницаемости (сечение x = 500 м):
а – $V_{о.з}$ = 3 м/сут; *б* – $V_{о.з}$ = 6 м/сут; *в* – $V_{о.з}$ = 9 м/сут; *г* – $V_{о.з}$ = 12 м/сут

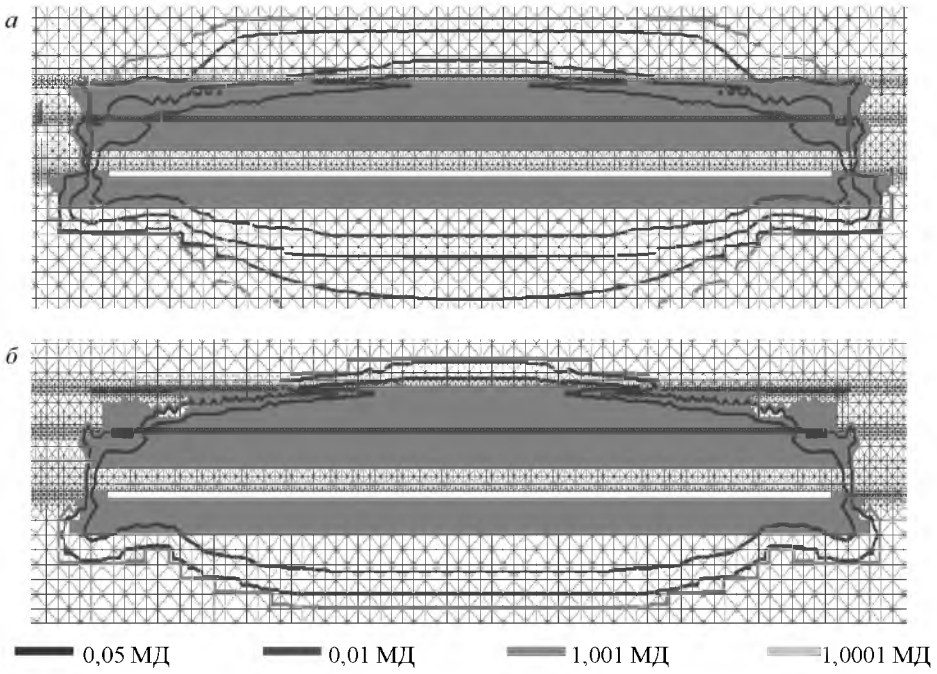


Рис.3. Изолинии равных значений коэффициентов проницаемости (сечение z = 50 м):
а – $V_{о.з}$ = 3 м/сут; *б* – $V_{о.з}$ = 9 м/сут

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

В результате расчета получено распределение давления метана, скорости его фильтрации и расхода в каждой точке исследуемой области при различных скоростях подвигания лавы. На рис.2 показано распределение значений коэффициентов проницаемости в центральном продольном, на рис.3 – в поперечном сечении исследуемой области.

Установлено, что значения коэффициентов проницаемости с увеличением скорости подвигания лавы понижаются, размеры области фильтрации сокращаются. Объем области фильтрации по отношению к ее объему при $V_{о.з} = 3$ м/сут уменьшается на 19,6 % при $V_{о.з} = 6$ м/сут, на 46,6 %, при $V_{о.з} = 9$ м/сут, на 52,0 % при $V_{о.з} = 12$ м/сут. Внутри области фильтрации располагаются два газоносных песчаника и два угольных пропластка в кровле выработки. Однако с увеличением скорости подвигания лавы размеры этих источников газовыделения уменьшаются: при $V_{о.з}$=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.4 показано распределение относительного давления метана p/p_0 (где p_0 – давление метана в нетронутом массиве) в

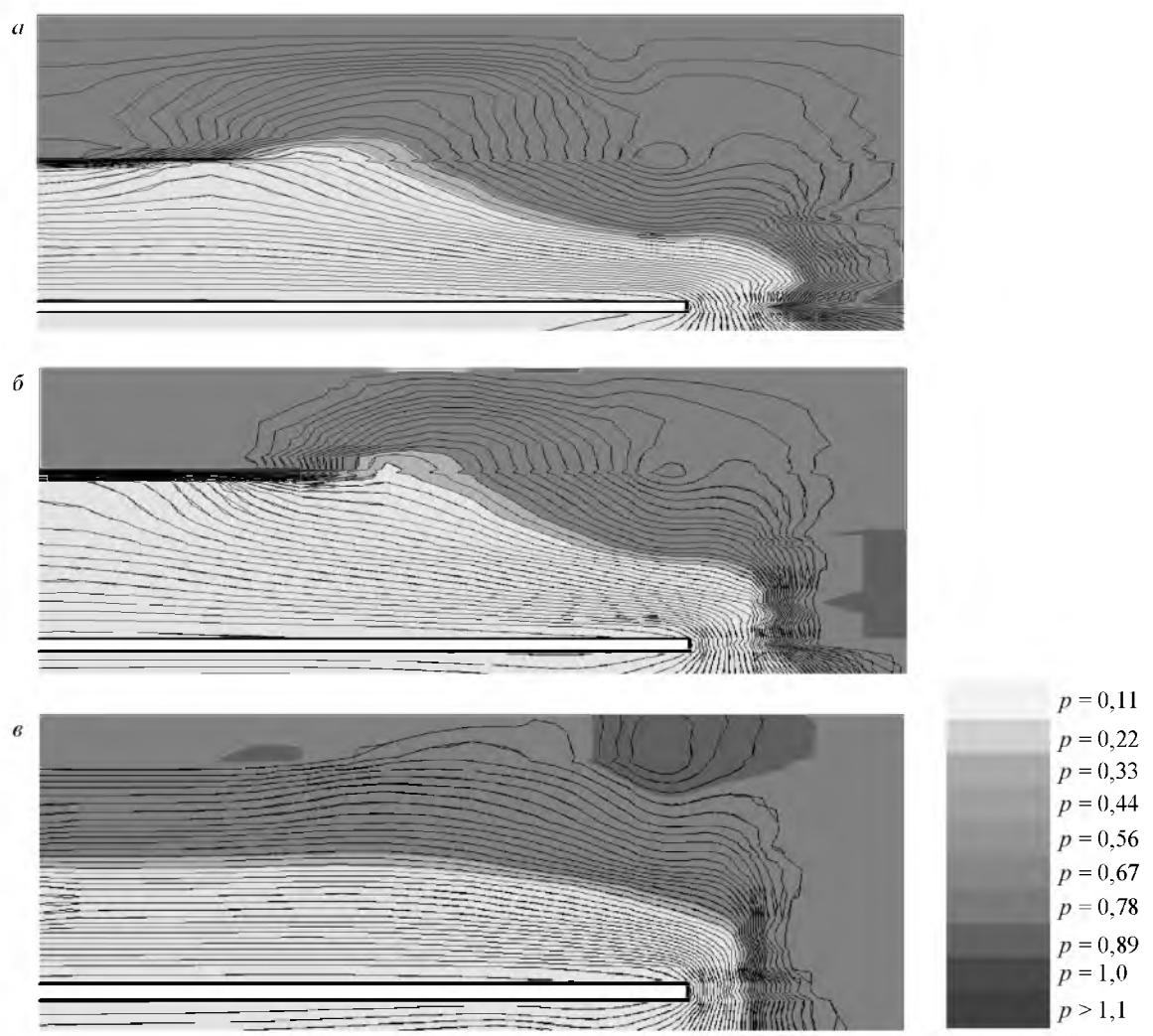


Рис.4. Изобары относительного давления и линии тока метана в центральном продольном сечении исследуемой области: *а* – $V_{о.з} = 3$ м/сут; *б* – $V_{о.з} = 6$ м/сут; *в* – $V_{о.з} = 9$ м/сут

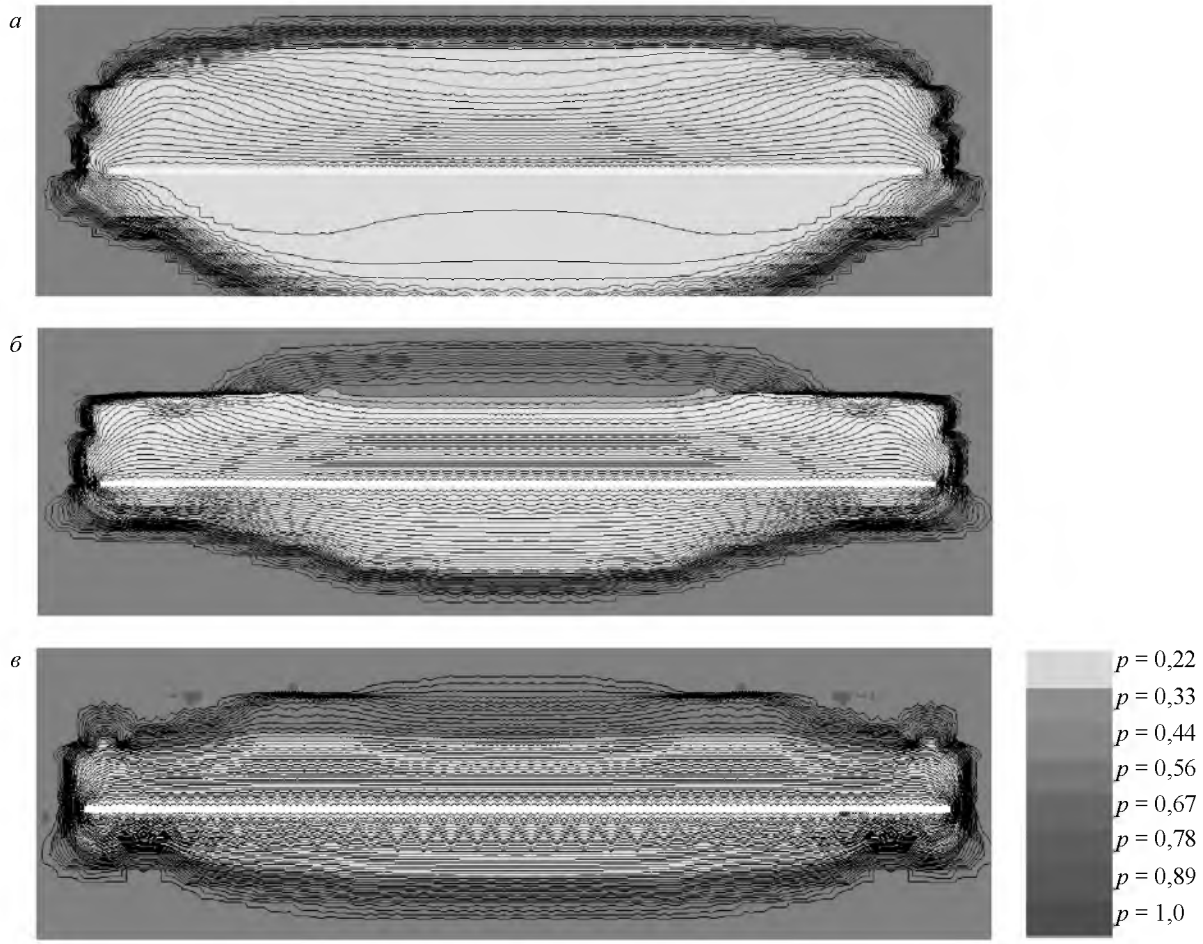


Рис.5. Изобары относительного давления и линии тока метана в поперечном сечении исследуемой области (z = 50 м): *а* – $V_{о.з}$ = 3 м/сут; *б* – $V_{о.з}$ = 6 м/сут; *в* – $V_{о.з}$ = 9 м/сут

центральном продольном сечении исследуемой области, на рис.5 – в поперечном сечении (сечение плоскостью z = 50 м, 25 м за лавой). Из рис.4 и 5 следует, 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 выработок выемочного участка. При увеличении скорости подвигания область пониженного давления метана уменьшается, снижаются скорости его десорбции и фильтрации в подрабатываемых породах, и, как следствие, сокращается количество метана, поступающее в очистной забой.

На рис.6-7 показано изменение давления метана в подрабатываемых угольных пропластках в зависимости от скорости движения очистного забоя. Установлено, что в ближнем пропластке давление метана достигает более низких значений, что позволяет ему быстрее перемещаться в атмосферу выработки. Он хорошо дегазируется в отличие от выше расположенного пропластка.

При увеличении скорости подвигания очистного забоя $V_{о.з}$ давление увеличивается с 0,25 до 0,6 (рис.6). Давление в верхнем угольном пропластке при $V_{о.з}$ = 9 м/сут лишь незначительно отклоняется от пластового давления в нетронутом массиве (рис.7). Это свидетельствует о том, что при такой скорости подвигания лавы метан из него практически не поступает в очистную выработку.

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

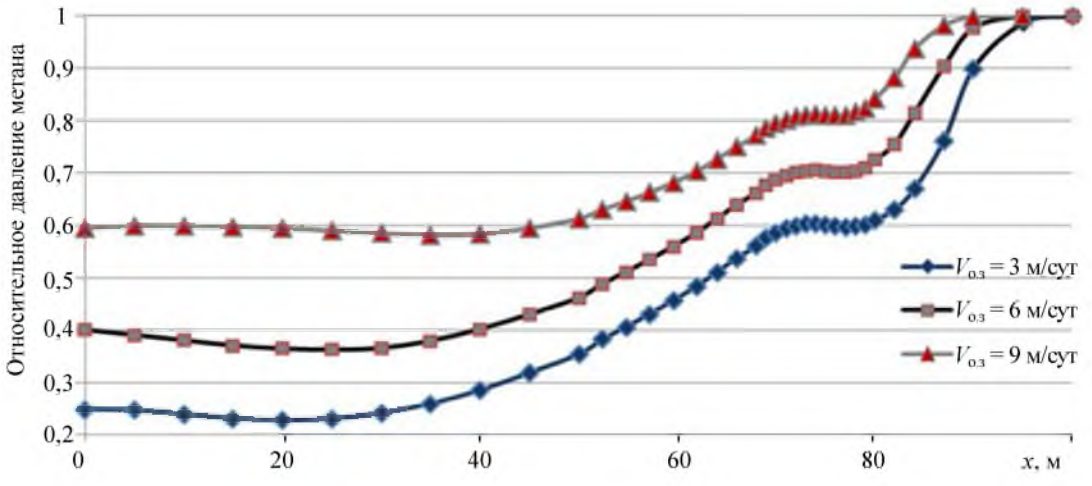


Рис.6. Изменение давления в угольном пропластке при подработке (высота 20 м над разрабатываемым пластом, очистной забой в плоскости x = 75 м)

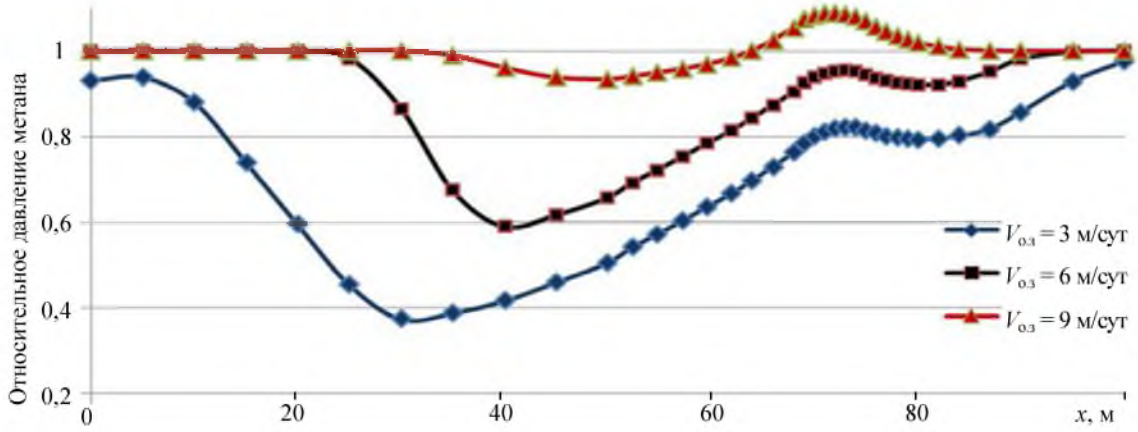


Рис.7. Изменение давления в угольном пропластке при подработке (высота 38 м над разрабатываемым пластом, очистной забой в плоскости x = 75 м)

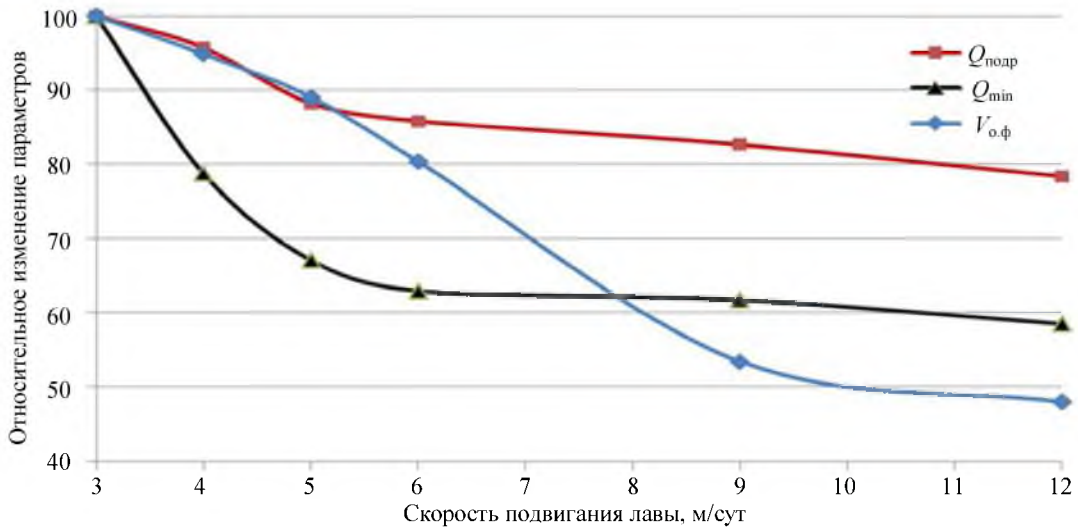


Рис.8. Изменение параметров фильтрации метана с увеличением скорости подвигания лавы

влияния системы дегазации изменение скорости подвигания с 3 до 9 м/сут влечет за собой уменьшение объема области фильтрации $V_{о.ф}$ 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.8).

С помощью функции регрессии эти показатели выражаются через скорость подвигания очистного забоя следующим образом:

$$Q_{подр} = 0{,}41\ln^2(V_{оз} - 2) -$$

$$- 10{,}36\ln(V_{оз} - 2) + 100{,}52;$$

$$Q_{min} = e^{0{,}11\ln2(Vоз - 2) - 0{,}45\ln(Vоз - 2) + 4.61);}$$

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

Скорость подвигания очистного забоя изменяется в пределах от 3 до 12 м/сут. Погрешность аппроксимации при этом не превышает 5 %.

Таким образом, в результате проведения натурных наблюдений и математического моделирования установлено неизвестное ранее явление снижения удельного дебита метана в очистную выработку из углепородного массива при повышении интенсивности отработки пологих угольных пластов, заключающееся в том, что при увеличении скорости подвигания фронта очистных работ замедляются процессы десорбции метана и фильтрации его в атмосферу очистной выработки, обусловленные процессом разрушения углепородного массива укрупненными блоками с уменьшением размеров области фильтрации и проницаемости внутри ее [6].

Следовательно, максимально допустимые нагрузки на очистные забои высоконагруженных лав, определенные согласно действующим нормативным документам, занижены, что не позволяет объективно оценивать реальные возможности комплекса мер по обеспечению газовой безопасности.

Накопленный опыт ведения горных работ в высоконагруженных очистных забоях позволяет выполнить специальные исследования, результаты которых явились бы основой нормативного документа «Правила определения максимально допустимой нагрузки на высокопроизводительный очистной забой с учетом фактического метановыделения и достигнутой эффективности дегазации». Наличие такого документа позволит определять параметры метановыделения в высоконагруженных очистных забоях для разработки эффективного комплекса мер по обеспечению газовой безопасности выемочных участков на угольных шахтах Украины и Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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. Днепропетровск, 2005. № 57. С.3-12.

2. *Малышев Ю.Н.* Фундаментально-прикладные методы решения проблем метана угольных пластов / Ю.Н.Малышев, К.Н.Трубецкой, А.Т.Айруни. М., 2000. 519 с.

3. Метаногенерация в угольных пластах / А.Ф.Булат, С.И.Скипочка, Т.А.Паламарчук, В.А.Анциферов. Днепропетровск, 2010. 328 с.

4. *Мясников А.А.* Применение ЭВМ для решения задач управления метановыделением в шахтах / А.А.Мясников, В.П.Садохин, Т.С.Жирнова. М., 1977. 248 с.

5. 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.

6. Открытие № 411. Явление снижения удельного дебита метана в очистную выработку из углепородного массива при повышении интенсивности отработки пологих угольных пластов / М.А.Ильяшов, С.И.Скипочка, А.В.Агафонов, В.Н.Кочерга, А.А.Боднарь, В.В.Круковская. № А-515; Заявл. 8.09.10, Приоритет 2007 и 2009.

7. Руководство по производству депрессионных и газовых съемок в угольных шахтах. М., 1975. 96 с.

8. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. Киев, 1994. 312 с.

9. *Скипочка С.И.* Элементы геомеханики углепородного массива при высоких скоростях подвигания лав / С.И.Скипочка, Б.М.Усаченко, В.Ю.Куклин. Днепропетровск, 2006. 248 с.

REFERENCES

1. *Bulat A.F.* Computer modeling of methane filtration in worked-up mining massif in three-dimensions' arrangement/ A.F.Bulat, V.V.Krukovskaya // Geotechnical mechanics: Interdepartmental collection of scientific works. Dnepropetrovsk. 2005. N 57. P.3-12.

2. *Malyshev Y.N.* Fundamental and applied methods of solving problems of methane in coal beds / Y.N.Malyshev, K.N.Trubetskoy, A.T.Airuny. Moscow, 2000. 519 p.

3. Generation of methane in coal beds / A.F.Bulat, S.I.Skipochka, T.A.Palamarchuk, V.A.Antsiferov. Dnepropetrovsk, 2010. 328 p.

4. *Myasnikov A.A.* Usage of computers for solving the problems of managing methane evolving in mines / A.A.Myasnikov, V.P.Sadokhin, T.S.Zhyrnova. Moscow, 1977. 248 p.

5. Research № 275. The property of mining rocks of coal formations in the process of their destruction to show additional desorption of combined methane molecules / M.A.Iliyashov, S.I.Skipochka, B.M.Usachenko, V.V.Nazimko, A.V.Mukhin. A-334; Application from July 21, 2004; Priority December 19, 2002.

6. Research N 411. The phenomenon of decrease of methane specific debit into the purification excavation from coal-rock massif while increase of intensity of work-out of flat coal beds / M.A.Iliyashov, A.V.Agafonov, V.N.Kocherga, A.A.Bodnar', V.V.Krukovskaya. A-515; Application from September 8, 2010; Priority to 2007 and 2009.

7. The guide on holding depression and gas surveys in coal mines. Moscow, 1975. 96 p.

8. The guide on ventilation designing of coal mines. Kiev, 1994. 312 p.

9. *Skipochka S.I.* The elements of geomechanics of coal massif while high-speed movement of excavations / S.I.Skipochka, B.M.Usachenko, V.Y.Kuklin. Dnepropetrovsk, 2006. 248 p.