



**С. П. МИНЕЕВ,**  
доктор техн. наук  
(ИГТМ НАН Украины)



**В. Н. КОЧЕРГА,**  
инж.  
(ИГТМ НАН Украины)



**А. С. ЯНЖУЛА,**  
инж.  
(ПАО «Шахтоуправление «Покровское»)

**В**ысокопроизводительная отечественная и зарубежная выемочная техника, используемая на шахтах Украины, в зависимости от мощности разрабатываемого пласта позволяет добывать уголь с нагрузкой  $A$  до 8 тыс. т/сут и скоростью подвигания очистного забоя  $v_{оч}$  более 6 м/сут. В газовых шахтах такая интенсивность сдерживается высо-

УДК 622.411.33

# Закономерности метановыделения при высоких скоростях подвигания очистного забоя

Приведены результаты исследований метановыделения в выработки шахт при скорости подвигания очистных забоев от 3 до 8 м/сут. Предложена методика расчета максимально допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору с учетом дегазации кровли и почвы скважинами для выемочных участков, протриваемых по схемам с подсвеживанием. По результатам исследований разработан проект нормативного документа «Правила определения максимально допустимой нагрузки на высокопродуктивный очистной забой с учетом фактического метановыделения и достигнутой эффективности дегазации».

**Ключевые слова:** метановыделение, очистная выработка, уголь, дегазация, максимально допустимая нагрузка.

**Контактная информация:** [sergmineeve@gmail.com](mailto:sergmineeve@gmail.com)

ким метановыделением, которое при среднесуточной добыче 2–8 тыс. т составляет 25–60 м<sup>3</sup>/мин, а на шахте им. А. Ф. Засядько – 90 м<sup>3</sup>/мин. Поэтому для снижения метановыделения в горные выработки применяют дегазацию.

Высокие скорости подвигания очистного забоя достигаются при столбовых системах разработки, а газовая безопасность обеспечивается высокоэффективной дегазацией в условиях двух принципиально разных схем проветривания и нескольких их вариантов. Это схемы типа 3-В (2-В), когда исходящая вентиляционная струя примыкает к выработанному пространству и подсвеживается струей воздуха, движущейся со стороны целика угля, и типа 1-М, когда исходящая вентиляционная струя примыкает к целику.

Принципиальным отличием схем является наличие поддерживаемых и контролируемых вентиляционных выработок позади очистного забоя (схемы проветривания типа 2-В и 3-В) или их отсутствие (схема типа 1-М). Указанное отличие схем проветривания обуславливает особенности проектирования вентиляции и дегазации выемочных участков, а также расчет максимально допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору.

В пределах выемочного участка метан выделяется из обнаженной поверхности разрабатываемого пласта, отбитого угля в лаве и конвейерной выработки, из угля, оставляемого в выработанном пространстве в целиках и невынимаемых пачках, из подработанных и надработанных сближенных угольных пластов-спутников и вмещающих газонасыщенных пород [1].

Предварительную и текущую дегазацию разрабатываемых угольных пластов на шахтах Донбасса не применяют из-за малой эффективности, обусловленной их низкой природной проницае-

мостью. В то же время широко используются эффективные способы дегазации подработанных и надработанных угольных пластов, пород и выработанного пространства. Их применение позволяет снизить метановыделение из выработанного пространства в выработки на 70–95 % и за счет этого обеспечить высокую скорость подвигания очистного забоя. В таких случаях основной сдерживающий фактор в повышении добычи – метановыделение из очистного забоя и отбитого угля. Особенно это заметно на пластах малой мощности (до 1,3 м), где максимальный расход воздуха ограничен площадью поперечного сечения призабойного пространства очистной выработки, составляющей 2,5–3,3 м<sup>2</sup> в зависимости от типа крепи.

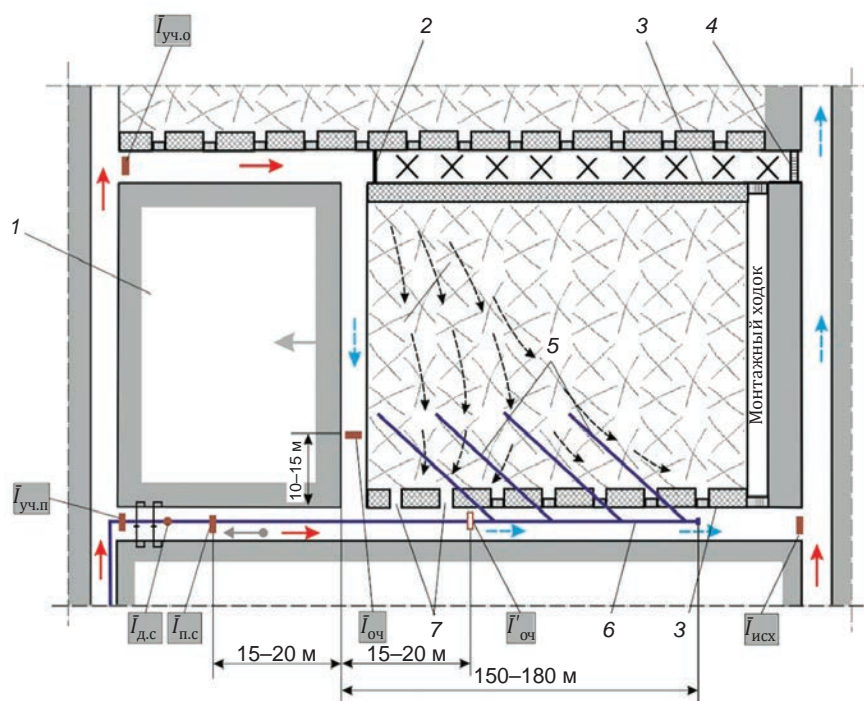
Экспериментальные исследования, проведенные на выемочных участках ПАО «Шахтоуправление «Покровское» и шахты «Краснолиманская», проветриваемых по схеме типа 1-М, показали, что высокоэффективная комплексная дегазация выработанного пространства (70–95 %) позволяет обеспечить скорость подвигания очистного забоя более 6 м/сут на пластах мощностью более 1,5 м. Повышение интенсивности отработки угольных пластов сопровождается увеличением метанообильности выемочных участков и уменьшением в их газовом балансе доли метановыделения в очистную выработку [2–4].

Для подтверждения достоверности снижения удельного дебита метана в очистную выработку при возрастании интенсивности отработки пологих угольных пластов в условиях столбовой системы разработки и схемы проветривания типа 3-В проведены исследования фактической метанообильности выемочных участков и достигнутой эффективности дегазации на шахтах «Степная» и «Юбилейная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».

Шахты разрабатывают угольный пласт с<sub>6</sub>, который не подработывали и не надработывали

(марка угля Г; выход летучих веществ 38,6–39,5%; природная метаноносность 14–16 м<sup>3</sup>/т с.б.м.; средняя вынимаемая мощность пласта 1,1 м; угол залегания 3–5°). На выемочных участках шахты «Степная» (161-я, 157-я, 160-я и 165-я лавы) пласт отработывали длинными столбами по восстанию, а на шахте «Юбилейная» (122-я лава) – по простиранию. Схема проветривания прямооточная с подсвеживанием исходящей вентиляционной струи типа 3-В.

Чтобы уменьшить метановыделение в горные выработки, на шахтах применяли дегазацию кровли скважинами, пробуренными за лавой, из поддерживаемой выработки с исходящей струей воздуха. Метанообильность выемочных участков и достигнутую эффективность дегазации оценивали по данным системы аэрогазового контроля и результатам газовых съежек [5], выполненных во время работы выемочной техники. Схема расположения пунктов наблюдений за метановыделением показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема расположения пунктов наблюдений за метановыделением: 1 – разрабатываемый пласт; 2 и 4 – переносная и глухая изолирующие перегородки; 3 – охранные полосы; 5 – дегазационные скважины в кровле; 6 – дегазационный газопровод; 7 – каналы в охранный полосу; → свежая струя воздуха; → исходящая струя воздуха; ← направление движения угля; ■ пункты наблюдений в выработках; □ место измерения фактического метановыделения в очистной выработке [1]; ● замерный пункт в газопроводе.

## МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ

Общий средний дебит метана на участке  $\bar{I}_{\text{уч}}$  определяли как сумму средних дебитов метана в исходящей вентиляционной струе  $\bar{I}_{\text{исх}}$  и в дегазационном газопроводе  $\bar{I}_{\text{д.с}}$  за вычетом количества метана, поступающего на выемочный участок со свежей основной  $\bar{I}_{\text{уч.о}}$  и подсвежающей  $\bar{I}_{\text{уч.п}}$  струями воздуха:

$$\bar{I}_{\text{уч}} = \bar{I}_{\text{исх}} + \bar{I}_{\text{д.с}} - \bar{I}_{\text{уч.о}} - \bar{I}_{\text{уч.п}}$$

Эффективность дегазации кровли скважинами  $k_{\text{д.с}}$  определяли как отношение дебита каптируемого метана к метановыделению из кровли:

$$k_{\text{д.с}} = \bar{I}_{\text{д.с}} / \bar{I}_{\text{кр}} = \bar{I}_{\text{д.с}} / (\bar{I}_{\text{в.п}} d_{\text{кр}}) = \bar{I}_{\text{д.с}} / [(\bar{I}_{\text{уч}} - \bar{I}_{\text{оч}} - \bar{I}_{\text{о.у}}) d_{\text{кр}}],$$

где  $\bar{I}_{\text{кр}}$  – метановыделение из угольных пластов и пород кровли, м<sup>3</sup>/мин;

$\bar{I}_{\text{в.п}}$  – метановыделение в выработанное пространство из угольных пластов и пород кровли и почвы, м<sup>3</sup>/мин;

$d_{\text{кр}}$  – доля метановыделения из кровли в газовом балансе выработанного пространства; рассчитывали по методике прогноза метанообильности [1],  $d_{\text{кр}} \approx 0,9$ ;

$\bar{I}_{\text{оч}}$  – расход метана в лаве на расстоянии 10–15 м от вентиляционной выработки, м<sup>3</sup>/мин;

$\bar{I}_{\text{о.у}}$  – метановыделение из отбитого угля в подсвежающую вентиляционную струю, м<sup>3</sup>/мин,

$$\bar{I}_{\text{о.у}} = \bar{I}_{\text{п.с}} - \bar{I}_{\text{уч.п}}$$

$\bar{I}_{\text{п.с}}$  – расход метана в выработке с подсвежающей струей 15–20 м перед очистным забоем, м<sup>3</sup>/мин.

Анализ результатов исследований показал следующее. Увеличение скорости подвигания очистного забоя  $v_{\text{оч}}$  способствует повышению

общего дебита метана, выделяющегося в пределах выемочного участка в горные выработки и дегазационные скважины (табл. 1). При этом абсолютный и удельный (доля в общем метановыделении на участке) дебит метана в очистную выработку снижается (см. табл. 1). Это экспериментально подтверждает достоверность установленного явления [6] и в условиях отработки угольных пластов малой мощности (до 1,1 м) при схеме проветривания типа 3-В.

Газовая безопасность при увеличении скорости подвигания очистного забоя обеспечивается за счет применения эффективной (70–85 %) дегазации кровли (см. табл. 1). Дегазационные скважины работают на участке от 20 до 150–180 м за лавой. Затем дебит метана по ним прекращается и их отключают от газопровода.

Высокая эффективность дегазации кровли достигнута за счет оптимальных параметров бурения скважин, качественной герметизации их устьев и использования высокопроизводительной дегазационной системы.

На первых 20 м за очистным забоем в исходящую вентиляционную струю через каналы (окна), устраиваемые в охранной полосе для предотвращения опасных скоплений метана в очистной выработке, поступает 53–74 % метана, выделяющегося из выработанного пространства в вентиляционную выработку (табл. 2, рис. 2). За счет этого количество метана в вентиляционной выработке на расстоянии 20 м от очистного забоя существенно (в 1,7–3,5 раза) превышает его количество в лаве на расстоянии 10–15 м от выхода из нее (см. табл. 1 и рис. 1). На расстоянии 150 м за лавой дебит метана

Таблица 1

Лавы	$v_{\text{оч}}$ , м/сут	$A_{\text{ф}}$ , т/сут	Количество метана, м <sup>3</sup> /мин						$d_{\text{оч}}$ доли ед.	$k_{\text{д.с}}$ доли ед.
			$\bar{I}_{\text{оч}}$	$\bar{I}_{\text{уч}}$	$\bar{I}_{\text{д.с}}$	$\bar{I}_{\text{п.с}}$	$\bar{I}'_{\text{оч}}$	$\bar{I}_{\text{исх}}$		
161-я	3,2	1300	4,90	17,2	6,40	0,4	8,40	10,80	0,285	0,60
157-я	3,4	1400	3,90	17,1	5,60	0,5	8,90	11,50	0,228	0,49
160-я	5,2	2008	3,30	24,7	12,95	1,3	9,90	11,75	0,134	0,72
165-я	7,6	3060	3,05	40,1	24,40	1,0	10,70	15,70	0,076	0,76
122-я	6,2	2450	3,10	35,0	22,60	1,8	10,00	12,40	0,089	0,85

**Примечание.**  $\bar{I}'_{\text{оч}}$  – количество метана в вентиляционной выработке на расстоянии 20 м от лавы;  $d_{\text{оч}}$  – доля метановыделения в очистной выработке.

из выработанного пространства в исходящую вентиляционную струю достигает 75–90 % общего объема (см. табл. 2 и рис. 2).

Выделяющийся из выработанного пространства метан разбавляется подсвежающей струей воздуха, поэтому на выемочных участках, проветриваемых по схемам с частичным (тип 2-В) и полным (тип 3-В) обособленным разбавлением вредностей по источникам поступления, в отличие от схем проветривания типа 1-В, метановыделение в вентиляционную выработку на расстоянии 15–20 м от очистного забоя при высокоэффективной дегазации не является сдерживающим фактором в повышении добычи угля. В условиях схем проветривания с подсвежением типа 2-В и 3-В сдерживающий фактор в увеличении добычи – выделение метана непосредственно в очистное пространство или (в случае низкой эффективности дегазации) в исходящую вентиляционную струю.

Установленные закономерности метановыделения при высоких скоростях подвигания очистного забоя и эффективной дегазации не учитываются при расчете максимально допустимой нагрузки по газовому фактору [1].

В соответствии с п. 7.2 Руководства [1] для выемочных участков с частичным или полным обособленным разбавлением метана по источникам выделения максимально допустимую нагрузку на очистной забой по газовому фактору рассчитывают по формуле

$$A_{\max} = A_{\phi} \bar{I}_p^{-1,67} [Q_p(C - C_0)/194]^{1,93} (l_{\text{оч.р}}/l_{\text{оч}})^{-0,67}, \quad (1)$$

где  $A_{\phi}$  – фактическая нагрузка на очистной забой, т/сут;

$\bar{I}_p = \bar{I}_{\text{оч.ф}}$  – среднее фактическое метановыделение в очистной выработке, м<sup>3</sup>/мин;

$Q_p = Q_{\text{оч.мах}} k_{\text{о.з}}$  – максимальный расход воздуха, который можно подать в очистную выработку, м<sup>3</sup>/мин;

$$Q_{\text{оч.мах}} = 60 S_{\text{оч.мин}} v_{\max}, \quad (2)$$

$S_{\text{оч.мин}}$  – минимальная площадь поперечного сечения призабойного пространства очистной выработки всвету, м<sup>2</sup>;

$v_{\max} = 4$  м/с – максимально допустимая скорость движения воздуха в очистной выработке;

$k_{\text{о.з}}$  – коэффициент, учитывающий движение воздуха по части выработанного пространства, непосредственно прилегающей к призабойному, принимается от 1,05 до 1,3 в зависимости от состава пород непосредственной кровли;

Таблица 2

Лавы	$v_{\text{оч}},$ м/сут	$\bar{I}_{\text{в.п}}$ на расстоянии, м				$\bar{I}_{\text{исх}},$ м <sup>3</sup> /мин	$d'_{\text{кр}},$ доли ед.
		10	15	20	150		
161-я	3,2	–	–	3,10	4,9	5,90	0,53
157-я	3,4	–	–	4,50	6,1	7,60	0,66
160-я	5,2	4,10	5,00	5,30	5,9	7,15	0,74
165-я	7,6	4,85	6,25	6,65	8,9	11,65	0,57
122-я	6,2	3,60	4,20	5,10	6,2	7,50	0,68

**Примечание.**  $\bar{I}_{\text{в.п}}$  – дебит метана из выработанного пространства за лавой;  $d'_{\text{кр}}$  – доля дебита метана в исходящую вентиляционную струю из выработанного пространства на первых 20 м за лавой от общего дебита.

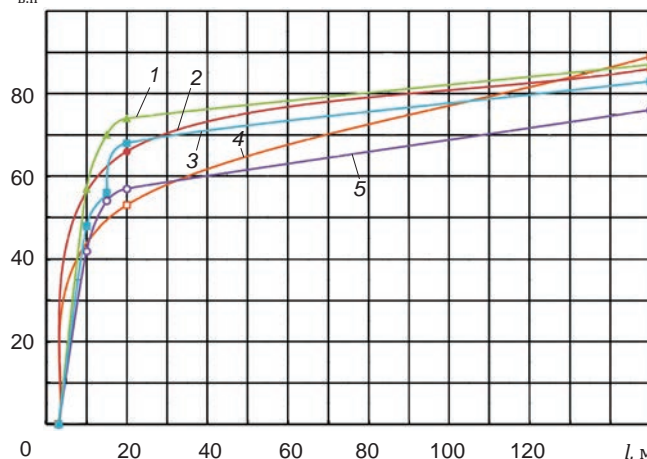
$C$  и  $C_0$  – концентрация метана, допустимая в исходящей вентиляционной струе, и концентрация в поступающей на выемочный участок вентиляционной струе, %;

$l_{\text{оч.р}}$  – длина очистного забоя, для которого рассчитывается  $A_{\max}$ , м;

$l_{\text{оч}}$  – длина очистного забоя, для которого известны  $\bar{I}_{\text{оч}}, \bar{I}_{\text{уч}}$  и  $A_{\phi}$ , м.

В соответствии с п. 3.3.2.1 Руководства [1] среднее фактическое газовыделение в очистной выработке при обособленном проветривании рассчитывают по формуле

$$\frac{\Delta I_i}{\bar{I}_{\text{в.п}}} \cdot 100, \%$$



**Рис. 2.** Относительное нарастание дебита метана из выработанного пространства  $\Delta I_i / \bar{I}_{\text{в.п}}$  по длине вентиляционной выработки  $l$ : 1 – 160-я лавы; 2 – 157-я лавы; 3 – 122-я лавы; 4 – 161-я лавы; 5 – 165-я лавы.

$$\bar{I}_{\text{оч.ф}} = \bar{I}'_{\text{оч.ф}} - \bar{I}_{\text{п.с}} - \bar{I}_{\text{оч.п}}, \quad (3)$$

где  $\bar{I}'_{\text{оч.ф}}$  – средний расход метана в вентиляционной выработке на расстоянии 15–20 м от очистного забоя, м<sup>3</sup>/мин;

$\bar{I}_{\text{оч.п}}$  – средний расход газа, поступающего в очистную выработку со свежей струей воздуха, м<sup>3</sup>/мин.

Расчетная формула (1) получена по результатам исследований, проведенным до 1975 г. [7], и идеально подходит для условий сплошной системы разработки и схемы проветривания типа 1-В. Она не учитывает расход воздуха в подсвежающей струе, которой разбавляется метан, выделяющийся из выработанного пространства на участке вентиляционной выработки в 15–20 м от лавы, и достигнутую эффективность дегазации. В связи с этим максимально допустимые нагрузки на очистной забой по газовому фактору, рассчитанные в соответствии с Руководством [1], существенно меньше, чем фактически достигнутые при схемах с подсвежением и высокоэффективной дегазацией.

Так, на выемочном участке 122-й лавы пласта с<sub>6</sub> шахты «Юбилейная» среднее фактическое метановыделение в очистной выработке, рассчитанное по формуле (3), составляет (см. табл. 1)

$$\bar{I}_{\text{оч.ф}} = 10 - 1,8 - 0,0 = 8,2 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

При таком метановыделении и фактической площади поперечного сечения очистной выработки 2,6 м<sup>2</sup> максимально допустимая нагрузка на очистной забой по газовому фактору в соответствии с формулой (1)

$$A_{\text{max}} = 2450 \cdot 8,2^{-1,67} [60 \cdot 2,6 \cdot 4 \cdot 1,3 (1,0 - 0,0) / 194]^{1,93} = 1154 \text{ т/сут}.$$

Фактическая суточная добыча в лаве, равная 2450 т, превышает расчетную в 2,1 раза. При этом содержание метана в выработках ниже допустимых норм, следовательно на выемочном участке обеспечивается газовая безопасность.

Выполненные исследования указывают на необходимость корректировки нормативных [1] правил расчета максимально допустимой нагрузки на высокопроизводительный очистной забой по газовому фактору с учетом высокопроизводительной дегазации и применяемой схемы проветривания выемочного участка.

Для объективного расчета максимально допустимой нагрузки на очистной забой при схемах с подсвежением предлагается в формуле (1) вместо  $\bar{I}_p$  использовать не фактическое метановыделение в вентиляционной выработке на расстоянии 15–20 м от очистного забоя, а фактическое выделение метана непосредственно в очистную выработку:

$$\bar{I}_{\text{оч.ф}} = \bar{I}'_{\text{оч.ф}} - \bar{I}_{\text{оч.п}},$$

где  $\bar{I}'_{\text{оч.ф}}$  – средний расход метана в очистной выработке на расстоянии 10–15 м от выхода из нее вблизи от места установки датчика стационарной автоматической аппаратуры контроля содержания метана, м<sup>3</sup>/мин.

В качестве  $Q_p$  следует использовать  $Q_{\text{оч max}}$ , а если максимальный расход воздуха по лаве невозможно обеспечить, то  $Q_{\text{оч.ф}}$ . Рассчитанное значение  $A_{\text{max}}$  – максимально возможная нагрузка по условию обеспечения газовой безопасности в очистной выработке.

Затем рассчитывают максимальную нагрузку по условию обеспечения газовой безопасности в вентиляционной выработке. Для этого вместо  $\bar{I}_p$  предлагается использовать среднее ожидаемое метановыделение в исходящую струю выемочного участка после дегазации:

$$\bar{I}_{\text{исх}} = \bar{I}_{\text{уч}} - k_{\text{д.кр}} \bar{I}_{\text{кр}} - k_{\text{д.п}} \bar{I}_{\text{п}},$$

где  $k_{\text{д.кр}}$  и  $k_{\text{д.п}}$  – достигнутая эффективность дегазации кровли и почвы скважинами, доли ед.;  $\bar{I}_{\text{кр}}$  и  $\bar{I}_{\text{п}}$  – метановыделение из кровли и почвы в газовом балансе выработанного пространства, м<sup>3</sup>/мин.

Меньшее из полученных значений – максимально допустимая нагрузка на очистной забой по газовому фактору. Дегазационную систему должны проектировать так, чтобы обеспечивать каптирование требуемого объема метана [8].

По результатам исследований разработан проект нормативного документа «Правила определения максимально допустимой нагрузки на высокопродуктивный очистной забой с учетом фактического метановыделения и достигнутой эффективности дегазации», который проходит апробацию на некоторых шахтах Украины.

**Выводы.** Увеличение скорости подвигания очистного забоя приводит к повышению об-

щего дебита метана, выделяющегося в пределах выемочного участка в выработки и дегазационные скважины. При этом абсолютный и удельный (доля в общем метановыделении на участке) дебит метана в очистную выработку снижается.

Применение высокоэффективной дегазации позволяет существенно увеличить скорость подвигания очистного забоя и обеспечить газовую безопасность выемочного участка.

На первых 20 м за очистным забоем в исходящую вентиляционную струю через каналы (окна), устраиваемые в охранной полосе, поступает 53–74 % метана, выделяющегося из выработанного пространства в вентиляционную выработку. За счет этого количество метана в вентиляционной выработке на расстоянии 20 м от очистного забоя существенно (в 1,7–3,5 раза) превышает его количество в лаве на расстоянии 10–15 м от выхода из нее. В связи с этим максимально допустимые нагрузки на очистной забой по газовому фактору, рассчитанные в соответствии с Руководством [1], существенно меньше, чем фактически достигнутые при схемах с подсвежением и высокоэффективной дегазацией.

Предложена методика расчета максимально допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору с учетом дегазации кровли и почвы скважинами для выемочных участков, проветриваемых по схемам с подсвежением.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт*: НПАОП10.0-7.08-93. – К., 1994. – 312 с.
2. *Ильяшов М. А.* Особенности метановыделения в высоконагруженных очистных забоях / М. А. Ильяшов, А. В. Агафонов, В. Н. Кочерга, А. А. Бондарь // Уголь. – 2010. – № 7. – С. 24.
3. *Ильяшов М. А.* О корректировке учета метанообильности выработок при интенсивной разработке тонких пологих угольных пластов / М. А. Ильяшов, А. В. Агафонов, А. А. Бондарь, В. Н. Кочерга // Материалы 4-й Международ. науч.-практ. конф., 12–18 сент. 2010 г. – Днепропетровск: НГУ, 2010. – С. 25.
4. *Кочерга В. Н.* Эффективность комплексной дегазации выемочных участков на шахте «Краснолиманская» / В. Н. Кочерга, И. В. Сытник, Г. С. Левчинский // Уголь Украины. – 2014. – № 11. – С. 26.
5. *Руководство по производству депрессионных и газовых съемок в угольных шахтах.* – М.: Недра, 1975. – 96 с.
6. *Диплом № 411 на открытие* / В. Н. Кочерга, М. А. Ильяшов, А. В. Агафонов, А. А. Бондарь, С. И. Скипочка, В. В. Круковская // Явление снижения удельного дебита метана в очистную выработку из углеродного массива при повышении интенсивности отработки пологих угольных пластов. – М.: РАЕН, Международ. ассоциация авторов науч. открытий и изобретений 2009. – Рег. № А-515; заявл. 8.09.10; приоритет 2007 и 2009 гг.
7. *Инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания действующих угольных шахт.* – М.: Недра, 1975. – 65 с.
8. *Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемы дегазации*: СОУ 10.1.00174088.001-2004. – К.: Минтопэнерго Украины, 2004. – 167 с.

## ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

В журнале № 6 в статье Г. М. Цурпала «Новые направления в проектировании угольных шахт» говорится о проектировании объектов шахтного фонда для пяти крупнейших комбинатов Донбасса в Донгипрошахте. Новые решения, отвечающие условиям индустриальности строительства, заложены в проектах шахтной поверхности. В частности, максимальное объединение промышленных объектов главных стволов и АБК в один блок в проекте шахты «Красноармейская-Западная» № 1 вместо трех блоков в проектах шахт «Красноармейская-Капитальная», «Южно-Донбасская» № 1 и других снижает степень трудоемкости работ на технологическом комплексе, сокращает внутрицеховые передачи, площади отводимых земель, обеспечивает минимум работ по прокладке различных коммуникаций, создает возможности для поточной организации строительных работ.