

УДК 622.23:539.194

# Обоснование способа прогноза выбросоопасности пластов по параметрам массопереноса метана в угле

Приведены методика и результаты горно-экспериментальных исследований способа прогноза выбросоопасности угля и газа по параметрам массопереноса метана в угле.

**Ключевые слова:** уголь, внезапный выброс, метан, давление, массоперенос, гидрорыхление, термодинамическая теория, критерий

**Контактная информация:** (095) 1723227, [hydoley63@mail.ru](mailto:hydoley63@mail.ru)

**Б**ольшое количество угольных пластов, разрабатываемых на предприятиях Донбасса, относятся к категории склонных к внезапным выбросам угля и газа. Ведение горных работ сопряжено не только с опасностью для подземного персонала шахт, но и с существенными экономическими рисками.

Практика показала, что действующая в Украине нормативная база по борьбе с выбросами [1] требует совершенствования. Главное направление – повышение достоверности и технологичности прогноза месторасположения выбросоопасных зон при проведении подготовительных выработок.

Согласно Правилам [1] для текущего прогноза выбросоопасности по газовому фактору применяется способ определения начальной скорости газовыделения из шпуров. Многолетний опыт показал, что на разрабатываемых угольных пластах с высокой природной газоносностью (более 25 м<sup>3</sup>/т с.б.м.) скорость газовыделения в неопасных зонах нередко превышает установленный критический уровень, более того, с увеличением глубины разработки в условиях неравнокомпонентного поля напряжений [2] могут возникнуть ошибки первого рода, связанные с интенсивным разрушением стенок скважин, что не позволит надежно загерметизировать измерительную камеру.

Достоверная оценка выбросоопасности зон по газовому фактору должна основываться на закономерностях кинетики и механизма десорбции метана в угле [3, 4, 5]. Этот принцип заложен в способ прогноза по параметрам массопереноса метана в угле, разработанном в Институте физики горных процессов НАН Украины. Его научное обоснование дано также в работах [6, 7, 8].

Для проверки способа прогноза выбросоопасности по параметрам массопереноса метана в угле в ИФГП НАН Украины создан шахтный десорбметр ШИММ, который состоит из четырех пробоотборников и электронного блока. Прибор имеет также пульт управления, индикатор результатов измерения и контроля, микропроцессор с электронной частью, программой измерения и управления прибором (рис. 1). С помощью ШИММ в забое выработки оперативно (в течение 15 мин) можно определить параметры массопереноса метана в угле и выдать заключение о степени его выбросоопасности.



**Г. П. СТАРИКОВ,**  
доктор техн. наук  
(ИФГП НАН Украины)



**О. Г. ХУДОЛЕЙ,**  
канд. техн. наук  
(ИФГП НАН Украины)



**В. В. ЗАВРАЖИН,**  
канд. техн. наук  
(ИФГП НАН Украины)



**В. А. ИВАНОВ,**  
инж.  
(ДТЭК)



**Рис. 1.** Шахтный десорбметр ШИММ.

В соответствии с решением Центральной комиссии по вопросам вентиляции, дегазации и борьбы с газодинамическими явлениями в шахтах Украины (протокол от 10 июня 2012 г. № 52) одним из объектов проведения горно-экспериментальных работ по разработке способа прогноза выбросов угля и газа по параметрам массопереноса метана в угле были выбраны очистные и подготовительные выработки шахты «Комсомолец Донбасса».

Горно-экспериментальные исследования проводились в конвейерной выработке 4-й западной лавы пласта  $l_7$  (блок № 3, горизонт 628 м). Условия эксперимента: угольный пласт  $l_7$  – угрожаемый по внезапным выбросам угля и газа (ниже отметки –389 м), не опасен по горным ударам, угольная пыль невзрывоопасная, марка угля Т. Пласт имеет простое строение (кроме небольшого участка на северо-западе, где строение сложное, мощность породного прослоя 0,05–0,15 м). Характерная мощность пласта 1,0–1,10 м, реже – 0,9–1,0 м, минимальная – 0,8–0,68 м. На всей площади шахтного поля угол падения пласта изменяется в пределах 2–24°, природная газоносность 30–35 м<sup>3</sup>/т с.б.м., максимальная газоносность (39,1 м<sup>3</sup>/т с.б.м.) отмечена на глубине 434 м.

Отработка пласта осложняется наличием:

- размывов пород кровли и частично пласта (зеркала скольжения, микроскладчатость, углистые включения); размытая часть пласта замещена песчаником

или песчаным сланцем, мощность пласта уменьшается до 0,8–0,6 м, местами – до 0,2 м;

- линзообразных включений песчаника в угольном пласте;
- мелкоамплитудных тектонических нарушений (сбросы, надвиги) с амплитудой смещения до 0,6 м, резких колебаний гипсометрии пласта.

Для конкретных условий проведения рассматриваемой выработки предусмотрено два способа текущего прогноза выбросоопасности:

первый – по начальной скорости газовыделения из шпуров или сорбционным показателям угля;

второй – выбросоопасности призабойной части массива по параметрам акустического сигнала.

Способ предотвращения газодинамических явлений (ГДЯ) – гидрорыхление угольного пласта с оперативным управлением процессом по параметрам акустического сигнала, в случае неэффективности гидрорыхления – буровзрывные работы в режиме СВ.

Условия проведения подготовительной конвейерной выработки 4-й западной лавы, расположенной вне зоны влияния очистных работ:

Срок службы, лет	Менее 15
Длина проведения, м	1450
Направление движения	По падению пласта
Глубина работ, м	618–742
Тип крепи	Незамкнутая арочная податливая АП-3–13,8
Тип замка	ЗПКм
Площадь сечения, м <sup>2</sup> :	
в свету	13,2
в проходке	15,9
Ширина в проходке, м	5,2
Высота в проходке, м	3,7

Контроль эффективности противовыбросных мероприятий и прогноз геологических нарушений выполняют с помощью аппаратуры АПСС.

На основе методики проведения горно-экспериментальных работ во время натурных измерений были установлены следующие параметры: давление метана  $P$  в пласте; количество метана  $Q$  в пласте; коэффициент массопереноса метана  $D_{эф}$  в угле пласта.

Перед проведением шахтных исследований в лаборатории разработали десорбционный паспорт, который базировался на основе измерения кинетики десорбции метана из угля данного пласта после его предварительного насыщения при различных равновесных давлениях. Паспорт позволяет в оперативном режиме по результатам замера давления метана прибором ШИММ определять давление и количество метана в пласте в месте замера. В электронном виде десорбционный паспорт введен в электронную память ШИММ.

Методика определения давления и количества метана в угольном пласте включала бурение скважин диаметром 42 мм на глубину 6 м с интервалом отбора проб через каждые 1,5 м. Для отбора угольных проб поочередно бурили два шпура (рис. 2, скважины № 1 и 2) по угольному пласту до глубины 1,3 м и прорабатывали, т. е. буровую штангу проворачивали без продвижения вперед до полного выхода горной массы. Затем продолжали бурить шпуры до глубины 1,5 м и отбирали измельченный угольный штыб, который высыпался из шпура в специальную кассету из сит. На ситах штыб отсеивается и выделяются гранулы размером 0,4–0,5 мм. Их помещали в пробоотборники до полного заполнения. На все операции – от начала бурения шпура по углю и перебуривания угольного пласта до заполнения пробоотборников – отводили не более 5 мин. Аналогично отбирали пробы угля из шпура с глубины 3; 4,5 и 6 м.

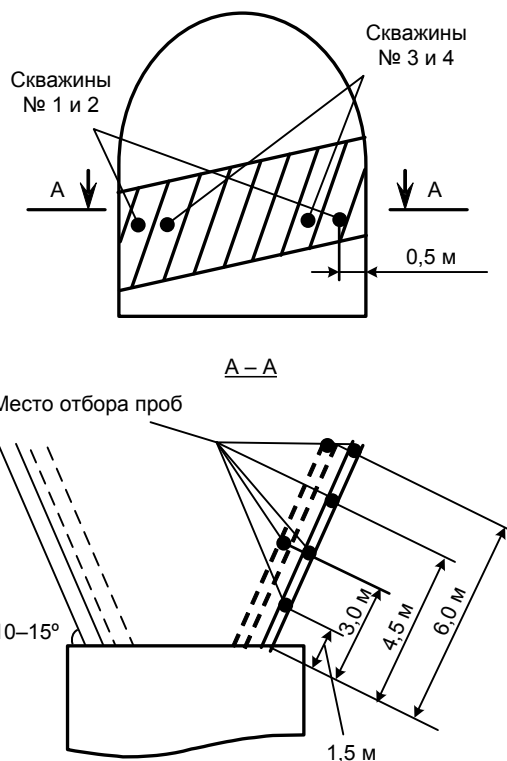
Для определения коэффициента массопереноса бурили два шпура (см. рис. 2, скважины № 3 и 4) по угольному пласту и отбирали пробы фракций угля размерами 0,4–0,5 мм и 1–1,6 мм с глубины 3 и 6 м, которые с помощью пробоотборников помещали в измерительную часть прибора ШИММ. Измерение продолжалось 15–30 мин.

За весь период проведения горно-экспериментальных работ (с 28 августа 2013 г. по 11 декабря 2013 г.) проведено 45 циклов измерения давления и газоносности угольных пластов (порядка 360 единичных замеров) и 40 циклов измерения коэффициента массопереноса метана в угле (порядка 160 единичных замеров). При этом подвигание конвейерной выработки 4-й западной лавы пласта  $l_7$  горизонта 628 м со средней скоростью проходки 8 м/сут составило 614 м.

Результаты анализа горно-экспериментальных работ свидетельствуют о том, что вне зоны влияния гидрорыхления давление метана в пласте и его газоносность в среднем составили 2,74 МПа и  $Q = 16,2 \text{ м}^3/\text{т}$  соответственно, а эффективный коэффициент массопереноса  $1,17 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ . При этом начальная скорость газовыделения, определяемая согласно Правилам [1], не превышала 1 л/мин без перепадов.

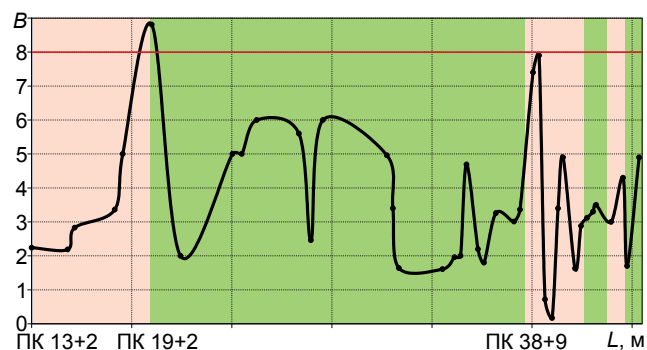
На пикете 19+2 м (18 сентября 2013 г.) давление в пласте удвоилось ( $P = 4,61 \text{ МПа}$ ), а начальная скорость газовыделения достигла 6 л/мин на глубине 1,5 м со снижением до 1 л/мин на интервале 3 м, что свидетельствовало о возрастании газодинамической активности угольного массива. С этого периода призабойная часть пласта подвергалась гидрорыхлению.

Для обоснования критерия выбросоопасности использовали полимерную модель угольного вещества, в которой растворителями были мономерные молекулы метана [3].



**Рис. 2.** Схема расположения скважин в забое подготовительной выработки.

Согласно общей термодинамической теории [9] состояние газа, сорбированного угольным веществом, можно описать на основе свободной энергии системы уголь–газ, представленной в виде функционала распределения плотности  $\psi = f(r)$ , где  $r$  – количество узлов в полимерной решетке угольного вещества, заполненного молекулами метана [10]. Под плотностью принято понимать отношение фактического содержания метана  $Q_\phi$  в поровой структуре угля к полной



**Рис. 3.** Изменение критерия выбросоопасности по длине конвейерной выработки 4-й западной лавы пласта  $l_7$ : ■ – без гидрорыхления; ■ – с гидрорыхлением.



метаноёмкости  $Q_c$  при максимальном давлении насыщения

$$\psi(r) = Q_\phi / Q_c \quad (1)$$

Полная энергия системы уголь–газ имеет вид

$$\Delta F = N_0 T \{ \chi \psi (1 - \psi) + k [\psi \ln(\psi)] \}, \quad (2)$$

где  $N_0$  – количество структурных звеньев угля, заполненных метаном;

$T$  – температура угля;

$\chi$  – параметр, характеризующий интенсивность взаимодействия молекул метана в зависимости от степени изменения текущего давления метана в угле  $P_T$  относительно давления сорбционного равновесия  $P_c$ , обусловленного условием конкретного угольного пласта ( $\chi(P) \approx P_T / P_c$ );

$k$  – постоянная Больцмана.

Уровень кинетики функционала свободной энергии системы уголь–газ, позволяющего оценивать степень газодинамической активности угольного пласта,

$$\partial \Delta F / \partial t = D_{\text{эф}} (Q_\phi / Q_c) - \gamma N_0 T [(P_T / P_c) (1 - 2 (Q_\phi / Q_c))], \quad (3)$$

где  $D_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент массопереноса метана в угле;

$\gamma$  – релаксационная постоянная, определяющая характерный масштаб времени.

Анализ зависимости (3) показывает, что скорость реализации энергии, накапливаемой угольным массивом, определяется уровнем эффективного коэффициента массопереноса метана в угле. Для исключения абсолютных значений  $D_{\text{эф}}$  и произведения  $\gamma N_0 T$ , которое по порядку величин также близко к размерности эффективного массопереноса, безразмерим значение кинетики функционала свободной энергии системы уголь–газ в виде критерия выбросоопасности  $N$  с учетом, что в условиях термодинамического равновесия  $Q_\phi \approx Q_c$ , а  $P = Q_r P_a / \gamma_{\text{эф}}$ :

$$N = D_{\text{эф,т}} / D_{\text{эф,ф}} + P_T / P_c \geq N, \quad (4)$$

где  $D_{\text{эф,т}}$  и  $D_{\text{эф,ф}}$  – текущие и фоновые значения эффективного коэффициента массопереноса метана в угле;  $P_T$  и  $P_c$  – текущее давление метана в угле и давление метана, обеспечивающее 80 % его сорбции углем;  $\rho$  – плотность угля;

$P_a$  – атмосферное давление;

$\gamma_{\text{эф}}$  – эффективная пористость угля.

На основе приведенных аналитических выражений и результатов фактических замеров обоснована структура и значения параметров, определяющих критерий выбросоопасности:

$$N = P_T / P_c + 1,35 D_{\text{эф,т}} / D_{\text{эф,ф}} \geq 8. \quad (5)$$

Используя критерий (5), рассчитали степень выбросоопасности угольного массива пласта  $l_7$  по результатам измерения эффективного массопереноса метана в угле по глубине призабойной зоны конвей-

ерной выработки 4-й западной лавы (рис. 3). Из результатов анализа следует, что при начальной скорости газовыделения 0,6–1,2 л/мин вне зоны и в зоне гидрорыхления критерии в среднем не превышают 3,12 и 3,64 соответственно. И только при начальной скорости газовыделения более 6 л/мин, характеризующей наличие очага ГДЯ, его уровень составил 8,8.

**Вывод.** В ходе проведения горно-экспериментальных работ разработанный способ прогноза выбросов угля и газа по параметрам массопереноса метана в угле показал свою функциональность и достоверность. Результаты исследования газодинамической активности разрабатываемого пласта, полученные с помощью указанной методики и с использованием прибора ШИММ, позволяют выполнять оперативный прогноз очагов ГДЯ и оценивать эффективность применяемых противовыбросных мероприятий.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.00174088.011–2005 // Стандарт Мінвуглепрому України. – Макіївка: МакНДІ, 2006. – 225 с.
2. Ольховиченко А. Е. Прогноз выбросоопасности в глубоких шахтах Донбасса / А. Е. Ольховиченко, Я. Н. Бойко, С. А. Зеленский // Безопасность труда в промышленности. – 1981. – № 1. – С. 45–46.
3. Алексеев А. Д. Прогнозирование неустойчивости системы уголь–газ / А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, В. Н. Чистоклетов. – Донецк: Ноулидж (Донецкое отд-ние), 2010. – 343 с.
4. Стариков Г. П. Энергия активации диффузионного процесса – характеристика геомеханического состояния угольных пластов / Г. П. Стариков, Т. А. Василенко, Н. И. Волошина, З. Г. Пастернак // Физика и техника высоких давлений. – 2003. – Т. 13. – № 4. – С. 104–113.
5. Алексеев А. Д. Результаты промышленных испытаний способа прогноза очагов ГДЯ / [А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, Т. А. Василенко, Н. И. Лобков и др.] // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XIII Междунар. науч. школы им. акад. С. А. Христиановича, Алушта, 2003. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2003. – С. 7–9.
6. Ходот В. В. Источники энергии возбуждения внезапных выбросов угля и газа / В. В. Ходот // Выбросоопасность угольных пластов. Науч. сообщения ИГД им. А. А. Скочинского. – 1990. – Вып. 186. – С. 8–20.
7. Айруни А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в шахтах / А. Т. Айруни. – М.: Наука, 1987. – 310 с.
8. Эттингер И. Л. Распределение метана в порых ископаемых углей / И. Л. Эттингер, Н. В. Шульман. – М.: Наука, 1975. – 112 с.
9. Ландау Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – 4 т. – М.: Наука, 1986. – 583 с.
10. П. де Жен. Идеи скейлинга в физике полимеров. – М.: Мир, 1982. – 368 с.