

# Активация диффузии газа в угольных пластах в условиях импульсного нагружения

Рассмотрены термодинамические основы, характеризующие процесс массопереноса газа в угольном веществе в условиях импульсного нагружения горного массива. Показано, что степень механической активации диффузии, определяющей газодинамическую активность угольных пластов, можно оценивать с помощью эквивалентной температуры, формирующейся при высокоскоростном деформировании трещиноватопоровой структуры угля. На основе установленных зависимостей температурного снижения энергии активации выхода метана обоснована новая методология прогнозирования выбросоопасности угольных пластов.

**Ключевые слова:** диффузия, энергия активации, энергия формоизменения, эквивалентная температура, критерий выбросоопасности, прогноз очагов выбросов угля и газа.

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

**П**роблема внезапных выбросов угля и газа, несмотря на многолетние исследования ученых, по-прежнему остается актуальной. Статистический анализ [1, 2] свидетельствует, что более 90 % выбросов угля и газа реализуются при проведении пластовых полевых выработок и ниш в очистных забоях буровзрывным способом. Существующие гипотезы и модели, описывающие условия формирования очагов и процессов выбросов угля и газа, построены на учете одного фактора либо по принципу суперпозиции ряда факторов. Тем не менее ни один из существующих подходов однозначно не определяет причины уменьшения энергии активации выхода метана, сорбированного угольным веществом, обеспечивающим переход этого газа в свободную фазу в интервале 20–50 с.

**Цель исследований** – обоснование методологии оценки степени выбросоопасности газоносных угольных пластов, основанной на учете температурной активации массопереноса метана в углях и формирующейся под воздействием энергии формоизменения угольного массива.

Сложность проблемы заключается в том, что для учета кинетики процесса истечения газа из угольной системы, сопровождающегося изменением суммарной концентрации, необходимо обеспечивать выполнение равенства нулю концентрации газа на поверхности забоя и ее стремление к исходному (равновесному) значению в глубине пласта. Кроме того, она усложняется процессами, происходящими в угле с неоднородно распределенной пористостью.

При решении задач такого класса аналитическими методами возникают большие затруднения, поэтому наиболее перспекти-



**Г. П. СТАРИКОВ,**  
доктор техн. наук



**Я. В. ШАЖКО,**  
канд. техн. наук



**О. Г. ХУДОЛЕЙ,**  
канд. техн. наук



**А. В. КРАВЧЕНКО,**  
канд. техн. наук

вен феноменологический подход, основанный на законах статистической физики.

## МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ

Шахта, пласт	Выход летучих, %	Газоносность, м <sup>3</sup> /т с. б. м.	Глубина ведения работ, м	Категория опасности пласта
Им. Е. Т. Абакумова, $m_3$	35,8	5	855	Невыбросоопасный
«Южная», $k_3^H$	22,5	7–10	510	То же
«Краснолиманская», $l_3$	35,0	10–15	747	Угрожаемый
Им. А. Ф. Засядько, $m_3$	33,3	16–23	1322	Выбросоопасный
Им. А. Ф. Засядько, $k_8$	30,7	17–25	1305	То же
Им. А. Ф. Засядько, $l_1$	31,8	20–25	1033	» »
Им. К. А. Румянцева, $m_3$	24,3	15–20	980	» »
Им. Ф. Э. Дзержинского, $m_3$	31,7	20–25	1146	» »
Им. В. М. Бажанова, $m_3$	23,5	25–30	870	» »
Им. М. И. Калинина, $h_{10}$	18,9	15–20	930	Особовыбросоопасный
Им. А. А. Скочинского, $h_6^1$	31,0	20–30	1300	То же

Согласно общей термодинамической теории [3] состояние газа, растворенного в угле, описывают на основе свободной энергии системы  $F$  в виде функционала от распределения плотности  $\psi(r, t)$ , учитывающей отношение части узлов угольной решетки, заполненных молекулами газа  $N_0$ , к полному внутреннему количеству узлов решетки угля  $N_r(r)$ . При этом уровень кинетики изменения функционала свободной энергии определяется процессами диффузии газа из порового объема и имеет вид

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial t} = D_{\text{эф}} \Delta \psi(r, t) - \gamma N_0 T \{ \chi(1 - 2\psi) + k(1 - r^{-1}) + [\ln \psi - \ln(1 - \psi) r^{-1}] \}, \quad (1)$$

где  $D_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент диффузии;  
 $\gamma$  – релаксационная постоянная, зависящая от масштаба времени процесса;  
 $T$  – температура системы уголь–газ (пласта);  
 $\chi$  – параметр, фиксирующий взаимодействие молекул газа в зависимости от соотношения внешнего и внутреннего давлений;  
 $k$  – постоянная Больцмана;  
 $r$  – параметр, определяющий соотношение между энергией свободного и заполненного состояний.

В сущности, из всех параметров, представленных в уравнении экспериментально, можно определить температуру угольного массива и его эффективную диффузию [4]:

$$D_{\text{эф}} = D_0 \exp[-U/(RT)], \quad (2)$$

где  $D_0$  – постоянная диффузии, не зависящая от температуры, м<sup>2</sup>/с;

$U$  – энергия активации выхода метана из угля, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К).

Наличие в уравнении параметра  $U/(RT)$  свидетельствует о термоактивационном характере эффективной диффузии.

Из анализа уравнений (1) и (2) следует, что интенсивность выхода метана из порового пространства угля зависит от уровня снижения энергии активации. Данное явление может иметь прямое отношение к известному в физике металлов и материаловедении эффекту «аномального массопереноса» в диффузионных процессах, происходящих за доли микросекунд в условиях сильных динамических воздействий на металл путем взрывного или иного импульсного ударного нагружения. Это обусловлено эквивалентными деформационными изменениями при механическом нагружении, требующими на порядки меньших энергетических затрат, чем при нагреве [5, 6].

Следовательно, механическая активация диффузии реализуется значительно легче, чем температурная, в той ее части, которая зависит от межатомного расстояния, в значительной степени влияющего на коэффициент диффузии из-за понижения уровня потенциального барьера для

элементарного акта диффузии. Учитывая, что технология ведения горных работ в подготовительных выработках осуществляется с помощью буровзрывных работ, т. е. в режиме высокоскоростного деформирования угольного массива по типу ударной волны, можно предположить идентичность рассматриваемых явлений.

Согласно разработанной теории физики ударных волн [7] внутренняя энергия сжатого вещества в ударной волне состоит из упругой и тепловой составляющих. При этом упругая энергия затрачивается на формоизменения  $A_\phi$  твердого тела, а тепловая энергия, в случае ее превышения энергии связи молекул метана с угольным веществом, запускает процесс испарения (десорбцию) метана из трещиноватопористой структуры угля.

Таким образом, в выбросоопасных угольных пластах, при прочих равных условиях, проявление выбросов будет определяться энергией формоизменения [8], обусловленной уровнем главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  в результате перераспределения их в угольном массиве при нагружении его ударной волной:

$$A_\phi = 1 + \nu / [18E(1 + 2\nu^2)] (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2, \quad (3)$$

где  $A_\phi$  – энергия формоизменения, Дж/моль;  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона;  
 $E$  – модуль упругости, МПа.

Эффект от увеличения межатомного пространства в структуре угольного вещества при импульсном нагружении характеризуется с помощью эквивалентной температуры:

$$T_\phi = A_\phi [-R \ln(D_0/D_{\phi})]^{-1} + T. \quad (4)$$

Учитывая зависимость параметра энергии активации от энергии формоизменения, рассчитываем уровень снижения удельной энергии активации выхода метана из угольного массива:

$$U_{уд} = U_\phi / (T_\phi / T), \quad (5)$$

где  $U_\phi$  – фактическая энергия активации.

Используя полученное значение  $U_{уд}$ , определяем расчетный уровень значения эффективной диффузии и сравниваем ее с критическими значениями, при которых произошли внезапные выбросы угля и газа.

Разработанную методологию прогноза степени выбросоопасности угольных пластов

апробировали на угольных образцах, отобранных на пластах, горно-геологические характеристики которых приведены в таблице. Группирование пластов по степени выбросоопасности показало, что средняя газоносность невыбросоопасных пластов не превышает  $9 \text{ м}^3/\text{т}$ , а выбросоопасных и особовыбросоопасных составляет соответственно  $19,75$  и  $26,25 \text{ м}^3/\text{т}$  с. б. м. При этом по выходу летучих веществ, кроме пласта  $h_{10}$  шахты им. М. И. Калинина, все перечисленные выбросоопасные и особовыбросоопасные пласты идентичны. Учитывая, что газодинамические явления происходят на выбросоопасных и особовыбросоопасных пластах, весь цикл исследований был проведен для установления закономерностей процесса десорбции метана из углей указанной категории пластов.

Для определения параметров десорбции метана из исследуемых угольных образцов отбирали две фракции с частицами размерами  $0,4-0,5$  и  $2-2,5$  мм, массой не менее  $10$  г. Отобранные частицы угля высушивали в течение  $1$  ч при температуре  $105^\circ\text{C}$  с контролем качества высушивания по спектрам ЯМР. После исчезновения лоренцевой составляющей в спектре ЯМР угля высушенные фракции помещали в емкости высокого давления, в которых происходило их вакуумирование при давлении  $10^{-4}$  МПа и насыщение метаном при давлении  $10$  МПа в течение  $144$  ч. После этого контейнеры вскрывали и проводили термографические измерения десорбции метана при средней температуре  $295$  и  $330$  К.

Степень десорбции метана при указанных температурах определяли через каждые  $15$  мин в течение  $10$  ч. Полученные исходные данные использовали для расчетов параметра диффузии и энергии активации выхода метана из угля.

Коэффициент эффективной диффузии рассчитывали по формуле

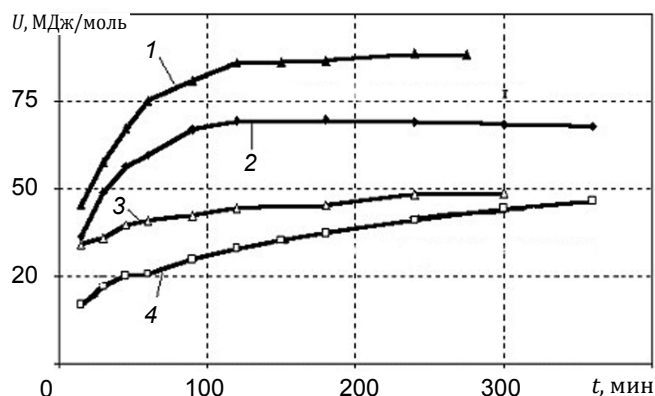
$$D_i = (L_2^2 \ln Q_1 - L_1^2 \ln Q_2) / [6t \ln(Q_1/Q_2)], \quad (6)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – размеры фракции угля, м;

$t$  – время десорбции, с;

$Q_1$  и  $Q_2$  – относительное изменение количества метана за время десорбции, соответствующее каждой фракции;

$W$  – масса угольной фракции с учетом газонасыщенности, г.



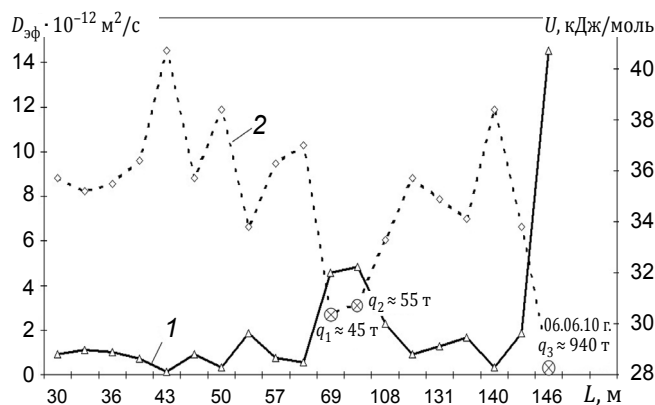
**Рис. 1.** Кинетика энергии активации выхода метана из углей  $U$  на выбросоопасных и особовыбросоопасных пластах на шахтах: 1 – пласт  $l_1$ ; 2 – пласт  $k_8$  (им. А. Ф. Засядько); 3 – пласт  $h_{10}$  (им. М. И. Калинина); 4 – пласт  $h_6^1$  (им. А. А. Скочинского).

Энергию активации диффузии метана из угля рассчитывали по формуле

$$U = 2,38R[T_1 T_2 / (T_1 - T_2) \lg(D_1 / D_2)], \quad (7)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры, при которых определяются соответственно  $D_1$  и  $D_2$  ( $T_1 = 291...298$  К,  $T_2 = 321...339$  К).

Зависимости энергии активации выхода метана от времени ее замера для выбросоопасных пластов  $l_1$ ,  $k_8$  шахты им. А. Ф. Засядько и особовыбросоопасных пластов  $h_{10}$ ,  $h_6^1$  шахт им. М. И. Калинина и им. А. А. Скочинского показаны на рис. 1.



**Рис. 2.** Изменение эффективной диффузии  $D_{эф}$  метана в угле 1 и энергии активации выхода метана 2 в нише 2-й западной лавы пласта Смоляниновский  $h_6^1$  шахты им. А. А. Скочинского по мере подвигания очистного забоя по простиранию  $L$  пласта;  $\otimes$  – место выброса.

Анализ представленных результатов по определению энергии активации выхода метана из углей разной степени выбросоопасности свидетельствует о том, что для выбросоопасных зон энергия активации составляет 60–90 кДж/моль, а в особовыбросоопасных зонах – 30–50 кДж/моль.

Проверку функциональности и достоверности разработанного методического подхода к оценке степени увеличения выбросоопасности угольного массива проводили на пласте Смоляниновский  $h_6^1$ , на горизонте 1300 м шахты им. А. А. Скочинского в нише 2-й западной лавы между ПК 111+6м – ПК 126+4м на протяжении 146 м по простиранию. Работы в нише выполняли в режиме сотрясательного взрывания. Исследования включали бурение двух скважин диаметром 42 мм на глубину 3 м, отбор угольных проб фракций 0,4–0,5 и 1–1,6 мм и по кинетике десорбции метана, измеряемой с помощью шахтного десорбометра [9] определяли значение эффективной диффузии метана в угле. Используя формулу (2), рассчитывали энергию активации десорбции метана в угле. Результаты исследований показаны на рис. 2 в виде зависимостей 1 ( $D_{эф} = f(L)$ ) и 2 ( $U = f(L)$ ), характеризующих соответственно степень изменения эффективной диффузии метана в угле и энергии активации выхода метана в интервале подвигания линии очистного забоя.

Кроме того, показаны места расположения очагов внезапных выбросов угля и газа. Два из них интенсивностью  $q_1 = 45$  и  $q_2 = 55$  т произошли при выполнении сотрясательного взрывания по угольному массиву. При этом эффективная диффузия метана в угле перед выбросами составляла в среднем  $4,7 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с. Третий внезапный выброс угля и газа интенсивностью  $q_3 = 940$  т произошел 6 июня 2010 г. в нижней части лавы при разрушении угольного массива исполнительным органом комбайна 2ГШ-68Б в зоне непрогнозируемого геологического нарушения. Измерения, проведенные в верхнем углу нижней ниши 2 июня 2010 г., т. е. за четыре дня до выброса, зафиксировали значения эффективной диффузии  $14,35 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с, т. е. было отмечено ее снижение в среднем в 1,4 раза относительно измеренных значений.

Фактический расчет с учетом импульса взрывных работ показал, что при переходе в предельное состояние угольного массива

### ЛИТЕРАТУРА

энергия формоизменения  $A_{\text{ф}} = 13,66$  кДж/моль ( $\sigma_1 = 160$  МПа,  $\sigma_2 = 86$  МПа,  $\sigma_3 = 32,5$  МПа,  $\nu = 0,35$ ,  $E = 7 \cdot 10^3$  МПа), а эквивалентная температура  $T_3 = 427,4$  К. Это привело к уменьшению удельной энергии активации выхода метана из угля по отношению к фоновой в 1,39 раза.

Методически для применения предлагаемого способа прогноза выбросоопасности угольных пластов, в том числе осложненных мелкоамплитудными непрогнозируемыми геологическими нарушениями, необходимо в лабораторных условиях определить энергию активации выхода и ее снижение за счет учета энергии формоизменения деформируемого угольного массива. После этого сравнить ее с диффузией, измеряемой в шахтных условиях. В случае ее превышения следует прогнозировать наличие очага выброса угля и газа.

**Выводы.** Предложена новая трактовка аномального массопереноса метана (эффективная диффузия) за счет эквивалентной температуры, формирующейся при высокоскоростном деформировании горного массива.

Обоснована методология способа прогноза выбросоопасности угольных пластов по критерию, основанному на соотношении эффективной диффузии метана из угля, измеренной в шахтных условиях, к эффективной диффузии метана из угля, определенной в лабораторных условиях с учетом энергии формоизменения деформируемого угольного массива.

1. *Агафонов А. В.* Способы и средства обеспечения безопасности проведения подготовительных выработок по выбросоопасным пластам. – Донецк: Донбасс, 1995. – 238 с.
2. *Левкин Н. Б.* Предупреждение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины / Н. Б. Левкин. – Донецк: Донбасс, 2002. – С. 396.
3. *Алексеев А. Д.* Прогнозирование системы уголь-газ / А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, В. П. Чистоклетов. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 343 с.
4. *Ландау Л. Д.* Статистическая физика. Т. 2: Теория концентрированного состояния / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1978. – 448 с.
5. *Коротченко С. А.* Продольная прочность. Кристаллы, металлы, конструкции / С. А. Коротченко, Ю. Я. Мешков. – К.: Наук. думка, 2008. – 295 с.
6. *Мешков Ю. Я.* К вопросу о механизме ускоренного массопереноса в металлах в условиях импульсных нагрузок / Ю. Я. Мешков, Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазенко // Металлофизика и новейшие технологии. – 1996. – 18, № 4. – С. 52–53.
7. *Зельдович Я. Б.* Физика ударных волн и высокотемпературных и гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
8. *Снеддон И. Н.* Классическая теория упругости / И. Н. Снеддон, Д. С. Борн. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 219 с.
9. *Пат. 105584* Україна, МПК E21F5/00 (2014.01). Пристрій для вимірювання ефективної дифузії газу у вугіллі / В. Г. Гріньов, Г. П. Старіков, В. В. Завражин, Ю. А. Службін, О. Г. Худолій, Е. П. Навка; заявник і патентовласник ІФГП НАН України. – № а201307863; заявл. 29.03.13; опубл. 26.05.14, Бюл. № 10.

## ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

**Год 1977**

В журнале № 1 сообщается, что сооружается шахта «Западно-Донбасская» № 16/17. Строительство шахты (проектной мощностью 3 млн т в год) ведет комбинат «Днепрошахтострой» по проекту Днепрогипрошахта.

Предполагается разработка восьми пологих пластов каменного угля, который пригоден для коксования. Среднединамическая мощность пластов 0,85 м, угол падения 2–5°. В проекте принят ряд новых прогрессивных решений. Здания и сооружения на поверхности объединены в блоки. Предусмотрен высокий уровень механизации и автоматизации производственных процессов в шахте и на поверхности. Перед шахтостроителями поставлена ответственная задача – обеспечить ввод в эксплуатацию первого блока (годовая мощность 1,5 млн т) шахты в декабре 1979 г.