

УДК 622.831:537.86

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗА ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ УГЛЯ И ГАЗА

д.т.н. Стариков Г.П. (ИФГП НАНУ)

Досліджувалась вільна енергія системи вугілля – газ та вплив на неї хвилі розвантаження. Обґрунтований та апробований критерій прогнозу викидів вугілля та газу.

PHYSICAL FOUNDATIONS OF GAS AND COAL OUTBURST PREDICTION

Starikov G.P.

Free energy of a system containing coal-gas mixture is studied. An influence on the system from the unload wave is investigated also. A criterion for a prediction of the coal and gas bursts is developed and tested.

Опыт применения нормативных способов прогноза и предотвращения выбросов угля и газа, основанных на учете частных признаков выбросоопасности, вытекающих из механических и энергетических моделей, свидетельствуют о недостаточной их надежности и достоверности. Это характеризует несовершенство существующих геомеханических моделей, определяющих условие потери устойчивости газонасыщенным угольным массивом. Дальнейшее развитие методов диагностики выбросоопасности угольных пластов и предотвращения выбросов угля и газа требует совершенствования физических моделей на базе фундаментальных законов статистической термодинамики и физики полимеров.

Учитывая результаты работы [1,2] обоснована физическая модель системы “уголь–газ”, включающей углеродные слои, в виде полимерной сетки, узлы N_0 которой заполнены мономерными молекулами метана и нагружены внутренним P_0 и внешним давлением P .

Состояние такой системы описывается потенциалом свободной энергии ΔF , зависящего от плотности распределения метана ψ и характеризует работу, способную выполнить системой при нарушении равновесного состояния под действием внешних условий. Свободная искомая энергия [3,4] при этом принимает вид:

$$\Delta F = \Delta E - T\Delta S_{\text{conf}} = N_0 T \{ \chi \psi (1 - \psi) + k [\psi \ln(\psi) + (1 - \psi) \ln(1 - \psi)/r] \}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура системы, r – число узлов, заполненных молекулами метана.

Величина параметра χ определяется взаимодействием молекул метана и угольного вещества. Интенсивность взаимодействия увеличивается при уменьшении давления P в системе “уголь–газ”. Вблизи произвольного давления P_0 , которое в общем случае реализуется в угольном пласте, зависи-

мость $\chi(P)$, не имеет особенностей и при прочих равных условиях может быть представлена в виде разложения:

$$\chi(P) = \chi(P_0) + \beta (P - P_0) \approx \text{const} - \kappa(1 - P/P_0). \quad (2)$$

Таким образом, видно, что уровень свободной энергии системы «уголь–газ» определяется концентрацией метана в угле и соотношением внутренних и внешних напряжений.

Равновесные значения концентрации ψ определяются положением минимумов свободной энергии:

$$\partial\Delta F/\partial\psi = N_0T\{\chi(1 - 2\psi) + k(1 - 1/r) + [\ln(\psi) - \ln(1 - \psi)/r]\} = 0. \quad (3)$$

Из соотношения (3) непосредственно вытекает, что как равновесная концентрация ψ , так и само существование одного или двух различных минимумов энергии, существенно зависят от величины параметра χ . На рис. 1 показано несколько типичных реализаций энергии $\Delta F(\psi)$, рассчитанных при различных значениях параметра χ .

Насыщенному газом состоянию соответствует минимум энергии, расположенный при значении концентрации $\psi = \psi_0$, близком к единице, что соответствует глобально неустойчивому (метастабильному) минимуму энергии.

Однако при достаточно высоком давлении (т.е. достаточно большом значении параметра χ) это состояние отделено от устойчивого глобального минимума, расположенного при $\psi \ll 1$, высоким потенциальным барьером. В результате насыщенное газом состояние, с существенно отличным от нуля $\psi = \psi_0$, остается устойчивым практически неограниченное время.

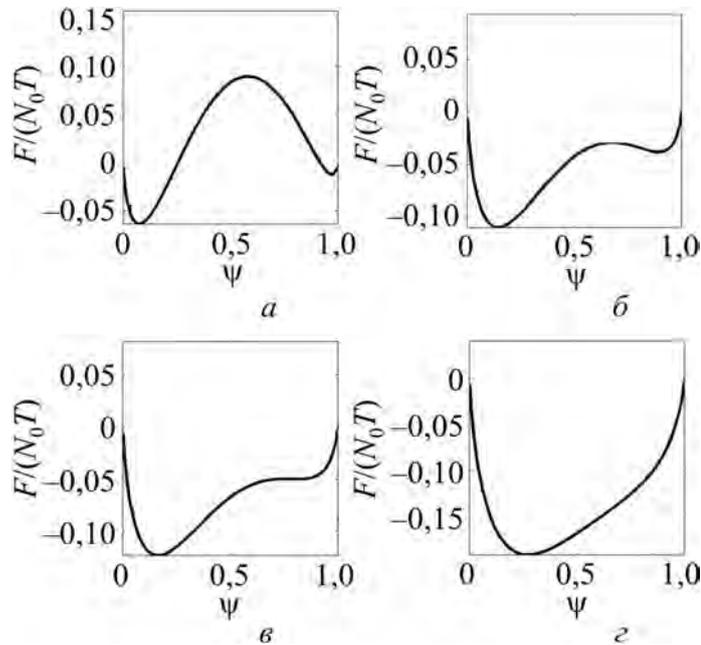


Рис. 1. Изменение свободной энергии $\Delta F(\psi)$ при различных значениях давления P/P_0 : а – 1, б – 0,9, в – 0,88, г – 0,8

При понижении барьера интенсифицируются процессы диффузии, в результате которых система постепенно покидает этот минимум в окрестности ψ_0 и переходит в состояние с $\psi \ll 1$.

Этот процесс описывается кинетикой свободной энергии [4,5], которая принимает вид:

$$\partial \Delta F / \partial t = D_{\text{eff}} \Delta \psi(r, t) - \gamma N_0 T \{ \chi(1 - 2\psi) + k(1 - 1/r) + [\ln(\psi) - \ln(1 - \psi)/r] \}, \quad (4)$$

где γ – релаксационная постоянная, определяющая характерный масштаб времени процесса, D_{eff} – эффективный коэффициент диффузии.

Приведенная закономерность показывает, что кинетика свободной энергии системы “уголь–газ” в условиях отсутствия влияния горных работ $P/P_0 = 1$ определяется процессом твердотельной диффузии, а в случае ее разработки $P/P_0 = 1$ приоритетным является процесс фильтрации. Участие свободной энергии системы “уголь–газ” в ГДЯ определяется уровнем и скоростью снижения потенциального барьера, разделяющего устойчивое состояние при $\psi = 1$ от неустойчивого при $\psi \ll 1$. Это, как правило, происходит при движении волны разгрузки, формирующейся при разрушении части угольного массива. В качестве расчетной схемы принято, что угольный массив контактирует вдоль плоской границы со свободным полупространством $x < 0$ при следующем граничном условии:

$$\rho(r, t) \Big|_{x < 0} = 0, \quad (5)$$

где ρ – плотность среды.

В момент времени $t = 0$ небольшой объем угля изымается из малой сферической полости некоторого радиуса r_0 , что приводит к смещению угля, направленного внутрь образованной полости, сопровождаемое сбросом давления и вызывает волну разгрузки, распространяемую внутрь полупространства $x > 0$. Уравнение движения такой волны, связывающей скорость волны разгрузки v , вязкость угля, пропорциональную модулю сдвига и давления на фронте волны P , имеет вид, достаточно простой для численного интегрирования:

$$\begin{aligned} \rho(r, t) [\partial v(r, t) / \partial t + v(r, t) \partial v(r, t) / \partial r] = \\ = -\text{grad} p(r, t) + \eta \partial^2 v(r, t) / \partial r^2 + (d - 1) \partial v(r, t) / \partial r, \end{aligned} \quad (6)$$

где d – размерность пространства, которая в практических расчетах может изменяться от 1 до 3.

Поскольку уравнение (6) записано для скорости как независимая переменная, тогда начальное условие нужно выбрать в виде локализованного всплеска v_0 , направленного в сторону центра разрушения (и отрицательных координат x непосредственно на открытой границе):

$$v(r, t = 0) \Big|_{r < r_0} = v_0 < 0. \quad (7)$$

Численное интегрирование уравнения (6) было выполнено при $d = 3$ и вышеперечисленных граничных и начальных условиях.

На рис. 2 показано распределение давления $p(r,t)$ в виде семейства кривых для различной начальной скорости волны разгрузки. Установлено, что с ростом скорости волны разгрузки радиус проникновения ее в угольный массив возрастает с увеличением давления на фронте волны.

На рис. 3 показано распределение мгновенных конфигураций давления по глубине пласта при различной вязкости системы “уголь–газ”. Анализ представленных результатов свидетельствует о значительном влиянии физико-механических свойств на степень ослабления, либо усиления давления на фронте волны разгрузки.

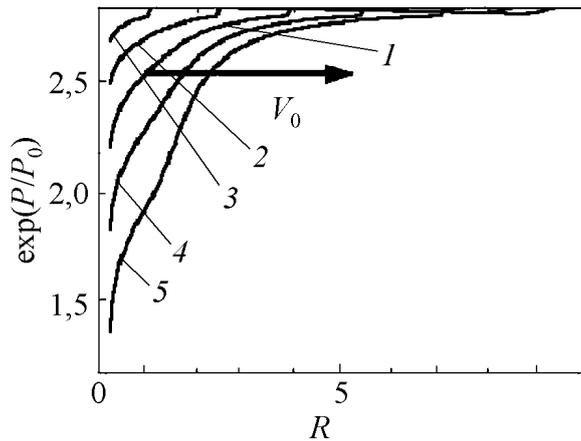


Рис. 2. Распределение мгновенных конфигураций давления вдоль радиуса при различной начальной скорости разрушения краевой части пласта 1 – $V_0 = 1$; 2 – $0,1V_0$; 3 – $0,01V_0$; 4 – $10V_0$; 5 – $100V_0$

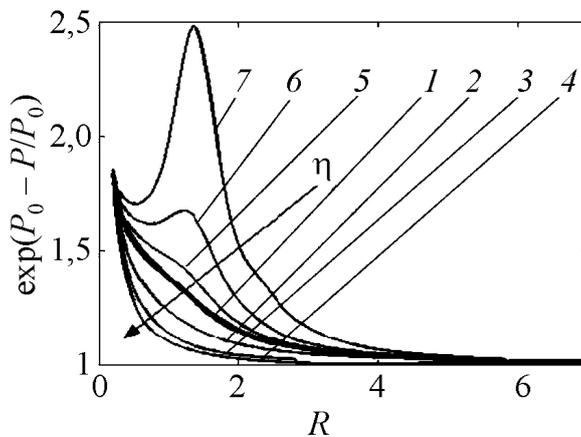


Рис. 3. Распределение мгновенных конфигураций давления вдоль радиуса при различной вязкости системы “уголь–газ”. 1 – η ; 2 – 2η ; 3 – 4η ; 4 – 8η ; 5 – $\frac{1}{2}\eta$; 6 – $\frac{1}{4}\eta$; 7 – $\frac{1}{8}\eta$

Поскольку, как уже отмечалось выше, условия десорбции метана из угля зависят от внешних параметров (от давления), естественно ожидать их изменения при прохождении волны разгрузки. Используя установленные закономерности, представленные на рис. 2, 3 была восстановлена форма потенциала свободной энергии при увеличении волны разгрузки вглубь пласта. В результате численного решения, приведенного на рис. 4, впервые было установлено, что по мере расширения волны разгрузки при некотором фиксированном расстоянии от ее центра исчезает барьер, отделяющий метастабильное состояние с высокой концентрацией метана от устойчивого состояния с малой концентрацией метана.

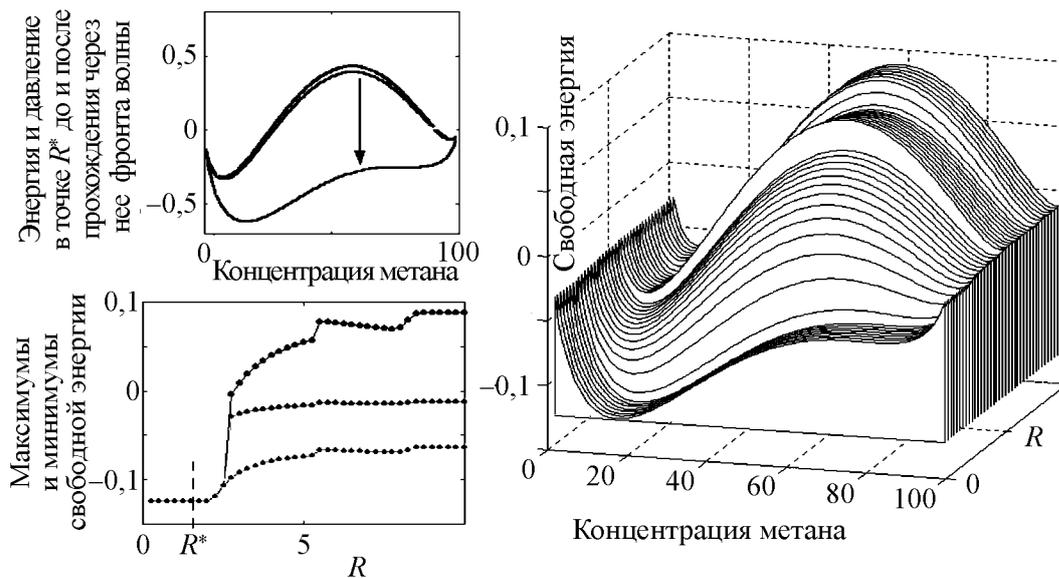


Рис. 4. Трансформация свободной энергии метана при прохождении волны разгрузки в переменных радиус–концентрация

Слева на вставках показаны: сверху – исчезновение барьера, разделяющего состояния с высокой и низкой концентрацией при некотором фиксированном расстоянии R^* от центра волны; внизу – поведение экстремумов свободной энергии в зависимости от R . Черная кривая соответствует максимуму, серые – двум различным минимумам энергии. В области малых R все три экстремума сливаются в один, что соответствует исчезновению потенциального барьера. Фактически полученный результат свидетельствует, что высокоскоростное снижение внешнего давления в системе “уголь–газ” обеспечивает потерю ее устойчивости и способствует развитию ГДЯ.

Физическим следствием изменения формы потенциала свободной энергии (снижение потенциального барьера) при прохождении волны разгрузки кроме потери устойчивости системой “уголь–газ” является увеличение части ее открытой пористости за счет превращения части закрытых пор в трещины. Это связано с тем, что высокоскоростное снижение давления на фронте волны разгрузки вызывает напряжение растяжения в порах угля. Согласно общей теории упругости [5], критический размер пор, выше которого развивается их неустойчивость, определяется при данном изменении давления $\Delta P = (1 - P/P_0)$ условием:

$$L_{cr} = L_0 / \Delta P^2, \quad (8)$$

где L_0 – некоторая постоянная размерности длины поры.

При этом одновременно происходят два противоположно направленных процессы. С одной стороны, число трещин возрастает, а среднее расстояние между ними, соответственно, падает. Это способствует связыванию пор в единственный кластер. Однако, поскольку в трещины в первую очередь, превращаются наиболее крупные поры, средний размер остающихся пор

снижается, и уменьшается вероятность их взаимного пересечения с трещинами, и, следовательно, образование искомого кластера.

Количество трещин, которые образуются при раскрытии пор в зависимости от давления, описывается таким образом:

$$\rho_{\text{тр}}(\Delta P, t) = \left(\int_{L_0/\Delta P^2}^{\infty} \rho_{\text{пор}}(r, t) dr \right)^{-1}, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{пор}}(r, t) dr \approx \partial G(r, t) / \partial r$ – функция распределения пор по радиусам (рис. 5,а).

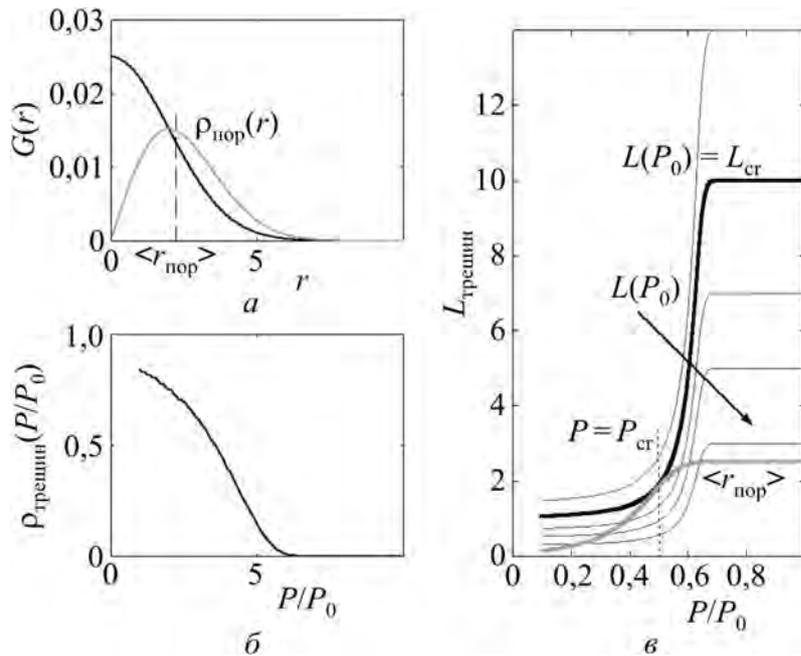


Рис. 5. Вычисление среднего расстояния между трещинами как функции давления: *а* – корреляционная функция пористой среды и распределение пор по радиусам $\rho_{\text{пор}}(r)$, *б* – зависимость плотности трещин от давления $\rho_{\text{тр}}(\Delta P)$; *в* – сопоставление среднего расстояния между трещинами $L_{\text{тр}}(\Delta P)$ и среднего радиуса пор $\langle r_{\text{пор}}(\Delta P, t) \rangle$, вычисленных в зависимости от давления.

Считая, что трещины параллельны друг другу, получаем среднее расстояние между ними:

$$L_{\text{тр}}(\Delta P, t) = 1/\rho_{\text{тр}}(\Delta P, t). \quad (10)$$

Эта величина сокращается с ростом напряжений ΔP . В свою очередь, средний радиус пор $\langle r_{\text{пор}}(t) \rangle = \int r \rho_{\text{пор}}(r, t) dr$ убывает по мере превращения наиболее крупных из них в трещины.

Протекание по системе возникает тогда и только тогда, когда расстояние между трещинами оказывается меньше характерного масштаба пор: $L_{\text{тр}}(\Delta P, t) < \langle r_{\text{пор}}(\Delta P, t) \rangle$. Поскольку помимо давления $L_{\text{тр}}(\Delta P, t)$ определяется также исходной величиной L_0 , то для $L_{\text{тр}}(\Delta P, t)$ имеем семейство кривых, ко-

торые пересекаются с линией лишь при достаточно малых L_0 . Т.е., начиная с некоторого L_{cr} , показанного на рис. 5в жирной черной линией, которая касается (серой) кривой для $r_{пор}(\Delta P, t)$ в единственной точке $P = P_{cr}$, весь метан, находящийся в системе закрытых пор, перейдет в трещины, из которых он будет выделяться путем интенсивной фильтрации.

Как видно из этих результатов, распространение волны способствует раскрытию пористости и выходу метана. Данный эффект может быть значительно снижен только при уменьшении общей доли открытых пор и трещин в исходной системе.

Из представленной физической модели следует, что основным условием потери устойчивости моделируемого газонасыщенного угольного массива является высокоскоростная разгрузка в виде приложения растягивающих деформаций со стороны поверхности забоя. Фактически, применительно к реальным угольным пластам это связано с процессом деформирования и разрушения угля разной степени газонасыщенности, находящегося в условиях объемного неравнокомпонентного нагружения, учет которых дает возможность обосновывать структуру и количественные значения критерия разрушения газонасыщенных углей в форме выброса.

Для реализации поставленной задачи использовался метод физического моделирования с применением установки трехосного нагружения, позволяющей создавать на образцах кубической формы с размером ребра грани 5,0–6,0 см в трех взаимно перпендикулярных направлениях напряженное состояние ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) аналогичное натурному. Оценка процессов деформирования и разрушения производилась на дегазированных и газонасыщенных углях ($Q_{г} = 15\text{--}30,0 \text{ м}^3/\text{т}$) пластов h_6' – «Смоляниновский» и h_8 – «Прасковиевский».

Моделирующие программы нагружения формировались с учетом, что конечное геомеханическое состояние угольного массива связано с переходом его от обобщенного сжатия ($\mu_{\sigma} = -1$) к обобщенному сдвигу ($\mu_{\sigma} = 0$) и обобщенному растяжению ($\mu_{\sigma} = 1$). По первой программе первоначально создавали $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{сж} = 5\text{--}20,0$ МПа, после этого повышали $\sigma_1 = \sigma_{пред}$ и производили разгрузку при скорости $V_p < 1,0$ МПа/сек, где $\sigma_{сж}$ – прочность угля на одноосное сжатие, $\sigma_{пред}$ – предельная прочность угля. По второй программе первоначально создавали $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma H$, затем повышали $\sigma_1 = \gamma H/\lambda$ и производили разгрузку при $V_p = 1,0\text{--}10,0$ МПа/сек, где γ – средневзвешенный объемный вес горных пород; H – глубина залегания пласта ($H = 800\text{--}3000$ м), λ – коэффициент бокового подпора ($\lambda = 0,5$). Величина σ_2 при реализации обеих программ формировалась самопроизвольно, за счет бокового подпора. Результаты исследования влияния газонасыщенности на упругие и энергетические показатели угля по первой программе приведены в табл. 1, в которой представлены измеренные и рассчитанные параметры, отражающие состояние угля в области предразрушения (верхняя строка) и в области разрушения (нижняя строка).

Анализ полученных результатов свидетельствует, что начало разрушения газонасыщенных образцов происходит при σ_1 на 11,0–23,0 МПа меньше чем

у дегазированных образцов. В области предельного состояния модуль деформации (K), а модуль сдвига (G) и энергии изменения формы (A_{ϕ} у газонасыщенных образцов больше в 1,1–1,24 раза и 1,25–1,51 раза соответственно. По параметру μ_{σ} уголь вне зависимости от степени газонасыщенности на 70 – 80% находится в условии обобщенного сжатия и на 20–30% обобщенного сдвига, а по параметру μ_{ε} уголь без газа находится в условиях обобщенного сдвига, а с газом на 12–15% в условиях обобщенного растяжения. При снижении $\sigma_3 = 0$ уровень σ_1 у газонасыщенных образцов ($Q > 14 \text{ м}^3/\text{т}$) уменьшается до σ_2 , при этом $\mu_{\sigma} = 0,35\text{--}0,6$, а $\mu_{\varepsilon} = 0\text{--}0,12$ и характеризует обобщенное растяжение, а у образцов без газа $\mu_{\sigma} = \mu_{\varepsilon} = 0$.

Таблица 1

Результаты измеренных и рассчитанных свойств деформируемых углей

σ_3 , МПа	Тип обработки	$K_{\text{ср}} \cdot 10^2$ МПа	$G_{\text{ср}} \cdot 10^2$ МПа	$\sigma_{1\text{ср}}$ МПа	$\sigma_{2\text{ср}}$ МПа	$A_{0\text{ср}}$ Дж/м ³	$A_{\phi\text{ср}}$ Дж/м ³
5,0	газонасыщение	<u>6,5</u> 13,7	<u>7,4</u> 2,5	<u>54,3</u> 98,2	<u>6,4</u> 14,1	<u>3,6</u> 5,1	<u>4,7</u> 56,0
	дегазация	<u>10,0</u> 13,0	<u>8,3</u> 2,3	<u>69,8</u> 103,8	<u>5,8</u> 10,5	<u>3,6</u> 4,5	<u>3,5</u> 37,0
10,0	газонасыщение	<u>7,5</u> 19,3	<u>7,9</u> 2,7	<u>59,7</u> 133,7	<u>12,2</u> 29,6	<u>6,0</u> 8,7	<u>4,9</u> 90,0
	дегазация	<u>9,1</u> 16,7	<u>8,9</u> 2,5	<u>83,4</u> 136,2	<u>10,9</u> 28,6	<u>6,0</u> 6,9	<u>7,7</u> 67,3
20,0	газонасыщение	<u>10,3</u> 24,1	<u>8,8</u> 4,1	<u>110,4</u> 162,1	<u>29,1</u> 40,5	<u>11,9</u> 13,0	<u>11,1</u> 74,0
	дегазация	<u>11,3</u> 21,4	<u>9,8</u> 3,3	<u>121,4</u> 175,0	<u>23,1</u> 36,4	<u>18,4</u> 11,2	<u>10,5</u> 58,9

Таким образом, изменения механизма разрушения угля от сдвигового к послойному отрыву при разгрузке из предельного состояния определяется степенью его газонасыщенности. Вид образцов представлен на рис. 6.

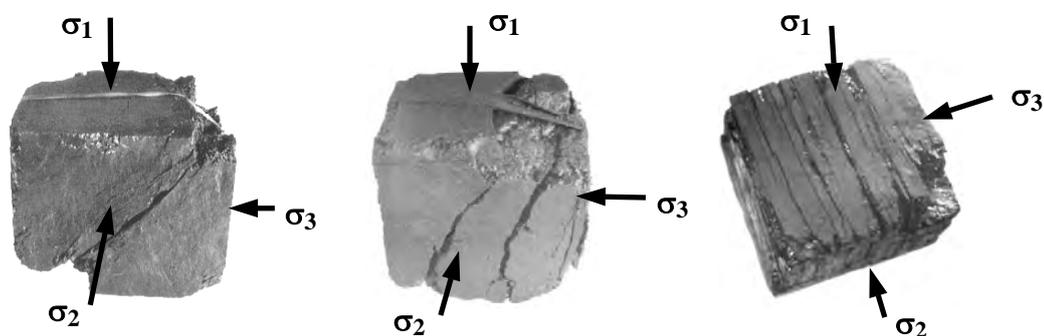


Рис. 6. Механизм разрушения угольных образцов в условии $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ при $\sigma_3 \rightarrow 0$:
 $a - Q_{\Gamma} = 3,5 - 5,4 \text{ м}^3/\text{т}$, $\mu_{\sigma} = 0$, $\mu_{\varepsilon} = 0$ (разрушение сдвигом);
 $b - Q_{\Gamma} = 14 - 17 \text{ м}^3/\text{т}$, $\mu_{\sigma} = 0,45$, $\mu_{\varepsilon} = 0$ (разрушение сдвигом и отрывом);
 $v - Q_{\Gamma} = 22 \text{ м}^3/\text{т}$, $\mu_{\sigma} = 0,6$, $\mu_{\varepsilon} = 0,12$ (разрушение послойным отрывом)

Аналогичные результаты были получены по второй программе нагружения, свидетельствующие, что смена механизма разрушения угля при снижении минимального сжимающего напряжения, для всех моделируемых глубин происходит при $Q > 10 \text{ м}^3/\text{т}$. При этом было установлено, что на повреждаемость трещиновато – пористой структуры угля, кроме степени газонасыщения и уровня напряженного состояния принципиальное значение имеет скорость его разгрузки. Определение структурных изменений в угле при высокоскоростной разгрузке производилось по его фильтрационным параметрам ($K_1K_2K_3$). Результаты исследований свидетельствуют, что в нагруженном состоянии моделирующие призабойную зону $K_1K_2K_3$ составляют 10^{-6} – 10^{-7} Д против $(1,2-1,8) \cdot 10^{-4}$ Д до нагружения. При $V_p \leq 1,0$ МПа/сек возникает анизотропия коэффициентов фильтрации.

Наибольшая величина их возрастает в направлении σ_2 , причем K_2 при разгрузке превышает в среднем K_2 ненагруженного образца в 8–12 раз, а K_1 и K_3 практически остаются на уровне до нагружения и свидетельствуют об образовании в направлении σ_3 плоскостей разрушения ориентированных под углом 40–50° к направлению действия напряжений σ_1 и σ_3 . При $V_p \geq 10$ МПа/сек коэффициенты фильтрации составляют $K_1 = K_2 = 1,2-1,4 \cdot 10^{-3}$ Д и превышают на порядок K_1, K_2 ненагруженного угля, при этом K_3 остается практически неизменным. Это показывает на то, что, сформировались плоскости разрушения, параллельные разгружаемой грани. Образование систем вторичных трещин, резко изменяющих проницаемость угля, при хаотическом их расположении связано, в первую очередь, с раскрытием части объема закрытых пор, который для угля пласта h_6^1 – Смоляниновский составляет $0,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Установленные закономерности по влиянию газонасыщенности, уровня напряжений и скорости разгрузки на механизм разрушения угля в окончательном виде были уточнены при моделировании разрушения части грани образцов в форме выброса.

Результаты по моделированию высокоскоростной разгрузки части грани угольных образцов представлены на рис. 7 в виде зависимости $Q/W = f(\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{сж}})$ где W – содержание физически связанной влаги, $\sigma_{\text{ср}} = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ – среднее напряжение в пласте; $\sigma_{\text{сж}}$ – прочность угля на одноосное сжатие.



Рис. 7. Зависимость $Q/W = f(\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{сж}})$, определяющая смену механизма разрушения угля

Анализ полученных результатов показал, что при прочих равных условиях (σ_{cp} , V_p) с ростом метаноемкости угля разрушение части грани образца происходит отрывом с радиусом частиц 0,2–0,5 мм, а с увеличением содержания физически связанной влаги – сдвигом с размером частиц более чем на порядок. Аппроксимация разделяющей линии с разным механизмом разрушения угля фактически является критерием выбросоопасности газоносных углей (B), учитывающего в явном виде содержание флюидов в угле, напряженное состояние пласта и прочность угля:

$$B \geq \frac{Q}{W} - 0,27 \frac{\sigma_{cp}}{\sigma_{сж}} - 2,5 \quad (11)$$

В результате выполненного цикла исследований установлено, что высокоскоростная разгрузка угля с $Q > 10 \text{ м}^3/\text{т}$ из предельного неравнокомпонентного нагружения в условиях обобщенного сжатия переводят его в плоское напряженное состояние ($\sigma_1 = \sigma_2$) с формированием обобщенного растяжения как по напряжениям, так и по деформациям и плоскостей параллельных разгружаемой поверхности.

На основании установленных закономерностей обоснован критерий определения степени выбросоопасности угольных пластов связывающий развитие неустойчивого состояния призабойной зоны с количеством водометановой смеси в поровом объеме угля, его прочностью, напряженно деформированным состоянием и скоростью его изменения в виде :

$$B = \left[Q/W + (0,47 - 0,235 \cdot 10^{-3} \cdot H) \sigma_{\gamma H} / \sigma_{сж} \right] \geq 2,5 \quad (12)$$

Проверка работоспособности критерия производилась при вскрытии 42 пластов крутого падения разной степени выбросоопасности квершлагами и стволами на глубинах от 530 м до 1180 м.

Как показали приемочные испытания определение степени выбросоопасности по критерию (20) производится без ошибок I рода. Количество ошибок II рода не превышало 12%, что в 1,5–1,8 раза меньше чем у нормативного способа. На основании проведенных испытаний разработан нормативный способ прогноза выбросоопасности при вскрытии крутых угольных пластов [7].

В настоящее время одной из наиболее сложных проблем, возникающих при проведении подготовительных выработок по выбросоопасным и особо-выбросоопасным пластам, является прогноз месторасположения очагов выбросов угля и газа, который существующими нормативными документами не решается. Критерий, характеризующий наличие очага ГДЯ (B), определяется по результатам теоретических исследований учитывающих степень изменения формы потенциала свободной энергии ΔF , характеризующей «скрытое» выбросоопасное состояние системы «уголь–газ» и плотность заполнения закрытых пор метаном:

$$B \approx (\Delta F_T - \Delta F_\phi) / \Delta F_\phi \geq 1, \quad (13)$$

где ΔF_T – текущие значения потенциала свободной энергии системы «уголь–газ», ΔF_Φ – фоновые значения потенциала свободной энергии системы «уголь–газ».

Однако расчет потенциала свободной энергии системы «уголь–газ» для условий движущегося забоя в настоящее время не представляется возможным. В связи с этим определение наличия очагов ГДЯ, при условии, что напряженное состояние и скорость волны разгрузки остается постоянными, производится по плотности заполнения поровой структуры угля метаном в виде показателей:

$$B_1(\Delta\psi) = \frac{\psi_T - \psi_\Phi}{\psi_\Phi} > B_n, \quad (14)$$

$$B_2(\Delta\psi) = \frac{L}{\psi_T} \frac{d\psi_T}{dx} > B_n, \quad (15)$$

где ψ – текущее и фоновое значение количества метана в пробах угля, определяемого по спектрам ЯМР; B_1 – показатель, характеризующий очаги ГДЯ по абсолютным значениям количества метана в угле; B_2 – показатель, характеризующий очаги ГДЯ по скорости изменения текущих значений количества метана в пределах одного цикла измерений; B_n – значение показателя, характеризующего отсутствие очагов ГДЯ; x – текущая координата отбора проб, м; L – величина подвигания забоя подготовительной выработки за один цикл.

Апробация показателя проводилась на особовыбросоопасных пластах h_{10} , гор. 1190 м шахты "Глубокая" при проведении 6-го и 8-го западного конвейерных штреков и h_4 , гор. 770 м шахты им. 60-летия Советской Украины при проведении разрезного ходка. Общее подвигание подготовительных выработок в период исследований и приемочных испытаний составило 280 м.

Методика проведения работ включала отбор проб из левой и правой скважин, которые бурились по углю из забоя подготовительных выработок в направлении его движения на глубину 1,8 м, обработку их в лаборатории и расчет показателей B_1 и B_2 . Значение B_n определяли в зоне, в которой отсутствовали признаки выбросоопасности.

При $B_{1,2} > B_n$ прогнозируется наличие ГДЯ, а его месторасположение определяется координатой отобранной пробы угля в шпурах.

На рис. 8 приведены результаты определения показателя B_1 и фактическое проявление выбросов угля и газа при проведении разрезного ходка по пласту h_4 .

Установлено, что среднее значение показателя в неопасных зонах составляла $B_n = 0,41$. Перед каждым из пяти выбросов оно возрастало до уровня $B_1 \geq 0,6$. Расстояния на которых фиксировались очаги ГДЯ не превышали 1,5–3,0 м от поверхности забоя. По результатам приемочных испытаний разработан нормативный способ прогноза очагов ГДЯ при проведении подготовительных выработок, в котором впервые значения B_1 устанавливаются для каждого пласта индивидуально [8].

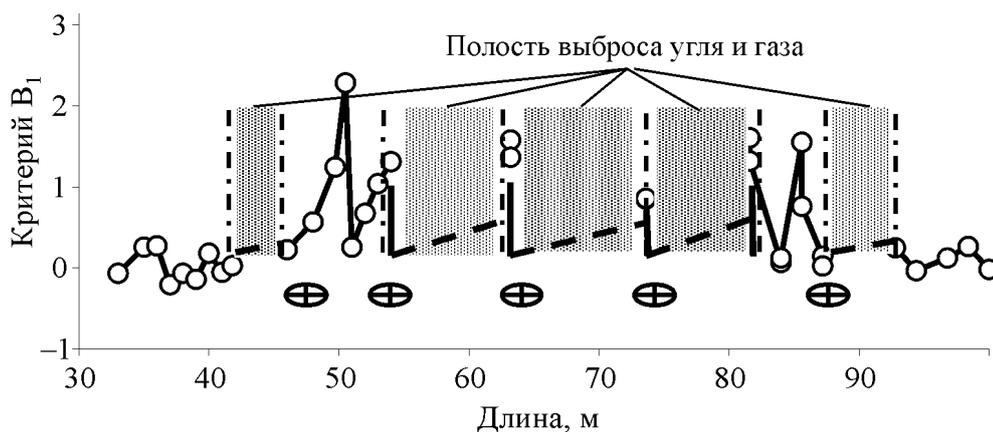


Рис. 8. Расчетные и фактические результаты, характеризующие местоположение ГДЯ при проведении разрезного хода по пласту h_4 .

Учитывая энергетическую основу формирования и развития выбросов угля и газа, был выполнен цикл исследований по изучению кинетики десорбции метана из углей разной степени газодинамической активности.

Поскольку десорбция метана из объема закрытых пор происходит по механизму диффузии, требующей значительного времени на оценку кинетики, в исследованиях использовался термоактивационный метод определения энергии активации десорбции метана [9, 10].

Для установления данного параметра угольные образцы измельчались до фракций $R = 0,4-0,5$ мм, массой (m) 10–12 г и помещались в рабочую камеру установки ADGS-50, где по заданной программе, в интервале температур 40–160°C, изотермической выдержкой 10 °C/мин определяли потерю массы (Δm). Используя установленную зависимость $\Delta m/m = f(T)$ и ее производную, характеризующую скорость процесса дегидратации, определяли максимальную и минимальную температуры и соответствующие им потери массы угольной фракции. Далее в системе координат $\ln(\Delta m/m)$ по оси ординат и $1/T$ по оси абсцисс строили прямую и по тангенсу угла наклона вычисляли величину энергии активации (E). Результаты измерений E для углей из пластов разной степени выбросоопасности приведены в табл. 2.

Анализ представленных результатов показывает, что у выбросоопасных пластов энергия активации десорбции метана из закрытых пор в среднем в 1,98 раза меньше, чем у угрожаемых и невыбросоопасных, при этом угли из разных пластов имеют собственную температуру дегидратации. В целом, установленные закономерности дают основание для использования величины параметра E при категоризации степени выбросоопасности угольных пластов.

Однако, практика ведения горных работ по выбросоопасным пластам показывает, что наиболее сложной проблемой является прогноз выбросоопасных зон. Применительно к данной проблеме был проведен цикл шахтных исследований по прогнозу зон ГДЯ на основе учета энергии активации десорбции метана из угольных проб. Пробы в виде штыба отбирались с глубины 1,5–2,0 м при бурении скважин диаметром 42 мм во 2 западном конвей-

ерном штреке, проводимого по пласту h_6' Смоляниновский, гор. 1300 м шахты им А.А. Скочинского в режиме сотрясательного взрывания на протяжении 60 м подвигания. Результаты исследований приведены на рис. 9 в виде зависимостей $E = f(L)$ и $T = f(L)$.

Таблица 2

Значения энергии активации и температуры дегидратации для пластов разной степени выбросоопасности

Пласт, шахта, горизонт	Степень выбросоопасности	Энергия активации десорбции, кДж/моль	Температура дегидратации, °С
Грязный m_1 , ш. им.Ф.Э. Дзержинского, 1146 м	Выбросоопасный	36,2	82
Кирпичевка l_2^1 , ш. им.Ф.Э. Дзержинского, 1026 м	Выбросоопасный	33	66
Толстый m_3 , ш. им.Ф.Э. Дзержинского, 1026 м	Выбросоопасный	36,5	75
Тонкий m_2 , ш. им.Ф.Э. Дзержинского, 1026 м	Выбросоопасный	38,2	88
Мазур l_1 , ш. Торецкая, 810 м	Угрожаемый	64	97
Кирпичевка l_2^1 , ш. Торецкая, 810 м	Угрожаемый	61,3	75
Смоляниновский h_6' , ш. им. А.А. Скочинского, 1300 м	Особовыбросоопасный	45,2	84
Песчанка m_4 , ш. Юнком, 1020 м	Невыбросоопасный	73	82

Анализ представленных результатов свидетельствует, что в зонах отсутствия ГДЯ величина энергии активации десорбции метана из угольного массива составляет 45–52 кДж/моль, а температура дегидратации в среднем 80°С. При снижении E до 25–35 кДж/моль и T в среднем до 70°С резко возрастает газодинамическая активность угольного пласта.

Согласно шахтных наблюдений было зафиксировано два ГДЯ: на 28 м (интенсивностью 38 т) и на 34 м (интенсивность 23,2 т). Таким образом, установленные закономерности вполне достоверно могут быть использованы для оценки газодинамической активности угольного пласта в виде критериев:

$$B_1 \approx \frac{E_\phi - E_T}{E_\phi} \geq B_H, \quad (16)$$

$$B_2 = \frac{L}{E_T} \frac{dE_T}{dx} \geq B_H, \quad (17)$$

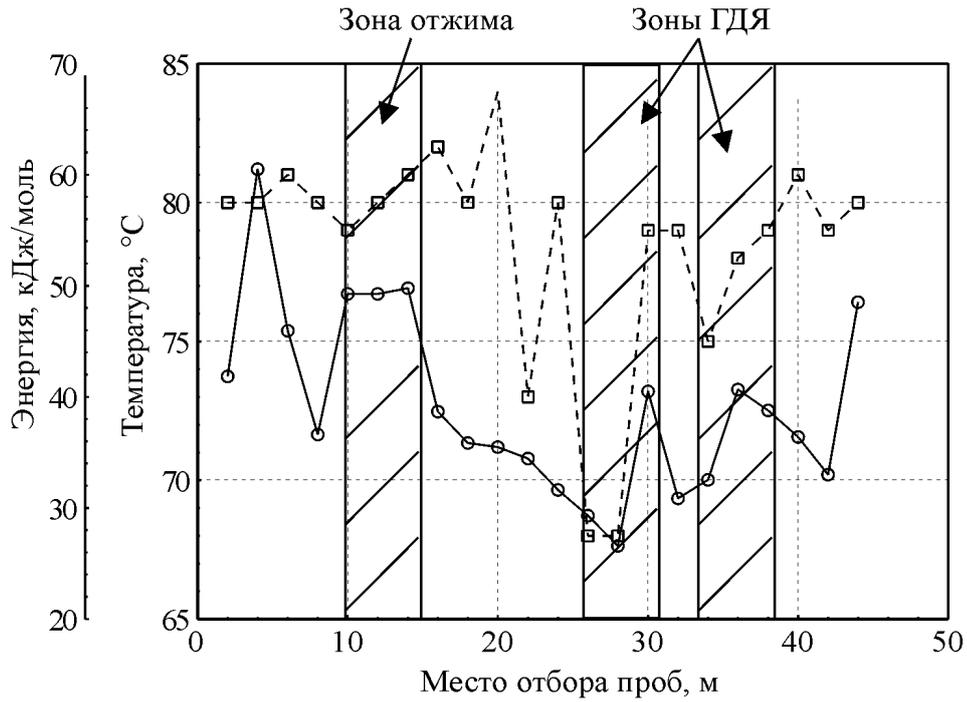


Рис. 9. Изменение энергии активации и температуры дегидратации по длине выработки

где E_T и E_Φ – текущее и фоновое значения энергии активации десорбции соответственно, кДж/моль; B_H – значение показателя, характеризующего отсутствие очагов ГДЯ; x – текущая координата отбора проб, м; L – величина подвигания забоя подготовительной выработки за один цикл.

При $B_{1,2} > B_H$ прогнозируется наличие ГДЯ, а его месторасположение определяется координатой отобранной пробы угля в шпурах.

Результаты расчетов по критериям B_1 и B_2 приведены на рис. 10, а, б.

Анализ представленных на рис. 2 расчетов показывает достаточную степень надежности обоих критериев.

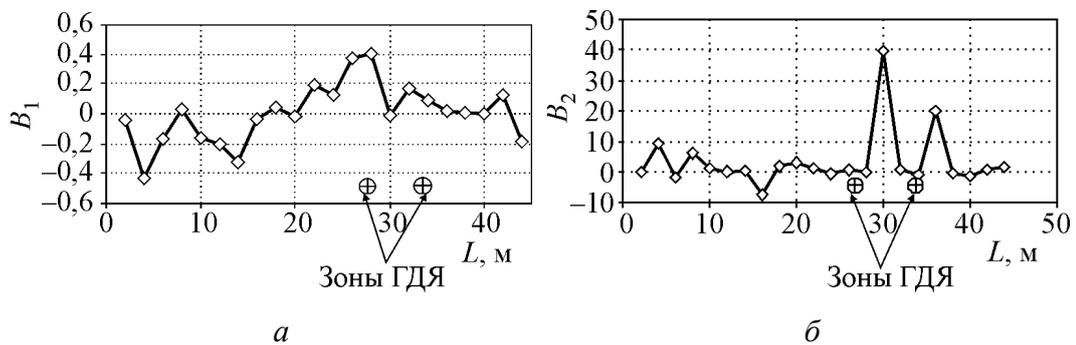


Рис. 10. Расчетные и фактические результаты, характеризующие месторасположение зон ГДЯ пласта h_6' во 2-м западном конвейерном штреке шахты им. А.А. Скочинского при расчете по критериям B_1 и B_2

В целом результаты исследований подтвердили физическую обоснованность методов прогноза очагов ГДЯ и выбросоопасных зон в угольных пластах по степени изменения функционала свободной энергии системы «уголь–газ», энергии активации десорбции и температуры дегидратации флюида из угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Van Krevelen D.W. Coal. – Amsterdam: Elsevier Publ. Corp., 1961. – 514 p.
2. Малышев Ю.Н., Тубецкой К.Н, Айруни А.Т. Фундаментально прикладные методы решения проблемы метана угольных пластов. – М.: Изд-во Аккад. Горных наук, 2000. – 519 с.
3. Алексеев А.Д., Синолицкий В.В., Василенко Т.А., и др. Закрытые поры ископаемых углей // ФТПРПИ. – 1992. – №2. – С. 99–106.
4. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Филиппов А.Э. Численное моделирование выхода из угля с учетом волны разгрузки и раскрытие пористости при изменении напряжений. // В сб. Проблеми гірничого тиску. Вып. 9. – Донецк: ДонГУ. – 2003. – С. 120–151.
5. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Физическая кинетика. М.: Наука, 1986. – 525 с.
6. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. – 202 с.
7. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Волошина Н.І. та інші. Прогнозування осередків викидів вугілля і газу у вибої пластової підготовчої виробки. ГСТУ 101.24647077.001. – 2003: Стандарт Мінпаливенерго України: Затверджено та надано чинності 26.11.2004. – Київ: Мінпаливенерго України. – 2004. 15 с.
8. Стариков Г.П., Алексеев А.Д., Лунев С.Г., Недодаев Н.В. и др. Прогноз выбросоопасности при вскрытии крутонаклонных пластов. Методические указания. - КД 12.01.05.070-1999: Нормативный документ Минуглепрома Украины: Утверждено и введено в действие 03.01.2000. – Киев: Минуглепром Украины. – 2000. – 23 с.
9. Стариков Г.П., Завражин В.В, Василенко Т.А., Бойко А.Н., Калугина Н.А. Кинетика газовыделения водометанового флюида из углей как интегральная характеристика степени их выбросоопасности // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVII Межд. науч. школы – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2007.- С. 285–287
10. Энциклопедический словарь «Физика твердого тела», Т.2. – Киев.: Наукова думка, 1998 – 643 с.
11. Кнорре Г.Ф. Топочные процессы. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 301 с.