

**ТЕРМОДИНАМИКА ПРИРОДНОЙ СИСТЕМЫ «УГОЛЬ–ГАЗ»**

**д.т.н. Маевский В.С. (ИФГП НАНУ)**

*В роботі наведені результати досліджень, які пов'язані з вивченням фізико-механічних, газодинамічних властивостей газосмічних пластів та методів контролю та оцінки структурної порушеності вугілля у викидонебезпечних зонах.*

**THERMODYNAMICS OF NATURAL SYSTEM «COAL–GAS»**

**Maevsky V. S.**

*In work results of researches which are connected with studying physicomachanical, gas of dynamic properties gas of containing coal seams and a quality monitoring and an estimation structural infringement coal at emission dangerous zones are resulted.*

Перспективы развития горной промышленности связаны с освоением глубоких горизонтов и интенсификацией производственных процессов, которые осложняются выбросами угля и газа, проявляющимися при воздействии на пласты: взрывных работ; узко- и широкозахватной механизированной выемки угля; породопогрузочной техники при уборке горной массы; выемки угля отбойным молотком; при оформлении забоев ручным инструментом после взрывных работ: бурения шпуров и скважин; обрушении угля на пластах крутого падения, а также при выполнении противовыбросных мероприятий, связанных с образованием разгрузочных пазов и щелей, высоконапорным нагнетанием воды в пласт, вымыванием пласта. Всего за столетний период, начиная с 1906 г. в России, а затем в СССР произошло более 10 тыс. выбросов угля, породы и газа [1].

В Донбассе на 108 шахтах разрабатывается 266 опасных и 330 угрожаемых шахтопластов, на которых происходит в среднем 5 выбросов угля и газа в год на один миллион тонн добытого угля. Практически все выбросы приурочены к зонам геологических нарушений и структурной нарушенности угля. Выбросы угля и газа снижают темпы проведения выработок, требуют дополнительных затрат на ликвидацию их последствий и на создание безопасных условий труда, имеют отрицательные социальные последствия. Повышение безопасных условий труда, включающих применение методов прогноза, предотвращения выбросов и контроля их эффективности при разработке выбросоопасных пластов, сдерживается недостаточной разработанностью теоретических представлений о свойствах и состоянии системы «уголь–газ», являющихся следствием геологической истории существования угольных пластов, тектонических воздействий и напряженно-деформированного состояния массива в области влияния горных выработок.

Решение проблемы выбросов угля и газа должно базироваться на исследованиях особенностей свойств и состояния угольных пластов в выбросоопасных зонах на фоне общих закономерностей изменений их структурных

и газодинамических характеристик в процессе метаморфизма в геологической истории существования углевмещающего массива.

В известных гипотезах о метаморфизме угля, происходящем в естественных условиях под воздействием температуры, давления и фактора времени, выделяются два основных этапа - доинверсионный, уровень которого определяется глубиной погружения пласта до начала складкообразования и постинверсионный, происходящий на современной глубине залегания пластов. Причем считается, что направление метаморфизма, заданное на доинверсионном этапе, сохраняется.

Оценка термодинамической устойчивости углей различной степени метаморфизма производится по коэффициенту термической устойчивости  $\chi$ , являющегося функцией внутренней энергии и энтропии угля, определяемого по уравнению:  $\chi = T/C_p$ , кДж/кг·град, где  $T$  – температура, К;  $C_p$  – теплоемкость угля при постоянном давлении.

Расчеты показывают, что он имеет два минимальных значения в диапазонах температур 300–350 К и 670–870 К, характерных для современных глубин залегания пластов и интенсивной активации угля при их нагревании, сопровождающимся потерей массы в виде газообразных продуктов. Поскольку потеря массы углей всех стадий метаморфизма имеет практически существенное значение при температуре 700 К, а максимальные температуры, которым подверглись угли марок Г, Ж, ОС, А на доинверсионной стадии составили 340–360, 370–390, 390–420, 570–620 К соответственно, то указанное несоответствие может быть объяснено с позиций термофлуктуационной модели, при которой активация химических связей с образованием радикалов имеет случайный характер вследствие флуктуации энергии в микрообъеме по длине химической связи [2].

Образующиеся свободные радикалы определяют перестройку угольного вещества, состав и количество газа в замкнутой системе "уголь-газ" в процессе метаморфизма, о чем свидетельствует повышенное содержание легко диффундируемого гелия в составе газов высокометаморфизированных углей при низкой их газоносности. Рассматривая процесс метаморфизма с позиций термофлуктуационной перестройки угольного вещества, основанный на радикальном механизме, было сформулировано основное положение термодинамики системы «уголь-газ», заключающееся в том, что перегруппировка атомов и молекул и перемещение разнообразных комплексов этих молекул приводит их к такому стабильно-равновесному расположению, при котором энергии взаимодействия молекул, образующих рассматриваемую систему, а следовательно, и ее свободная энергия, имеют минимальное значение при соответствующих внешних воздействиях (давление, температура, химическая активность компонентов и т.д.), т.е. состояние массива является термодинамически равновесным, при котором все внутренние параметры (плотность, концентрация, размер структурных элементов и т.д.) есть функция внешних параметров.

На основании изложенного можно заключить, что на глубине максимального погружения угольных пластов в доинверсионный период сформировалась равновесная термодинамическая система, характеризуемая внешними параметрами – температурой, давлением и внутренней структурной организацией на атомном, молекулярном и надмолекулярном уровнях. В процессе инверсии углевмещающего массива и денудации земной поверхности изменяются температура и напряженное состояние угольного пласта от гидростатического до неравнокомпонентного, которые должны сопровождаться структурной перестройкой угля, являющейся регрессивной по отношению к уровню структурной организации, достигнутой на доинверсионном этапе.

Комплексным показателем тенденции к структурной перестройке угольного вещества в зависимости от глубины залегания пластов, является изменение в нем количества разорванных химических связей, т.е. свободных радикалов, определяемых как концентрация ( $N$ ) парамагнитных центров (ПМЦ) на спектре электронно-парамагнитного резонанса [3].

Изменение концентрации ПМЦ, полученной на образцах углей, отобранных из пластов через породный прослой величиной 3 м при их вскрытии полевыми выработками и расчетные значения величин касательных напряжений в зависимости от глубины ведения горных работ совпадают по своему характеру и имеют экстремальные значения на глубинах порядка 500 м.

Величины касательных напряжений, действующих в массиве, рассчитывались с учетом влияния нагрузки на коэффициент Пуассона.

Моделирование воздействия касательных напряжений на структуру угля осуществлялось путем его пластического деформирования через фильеру, диаметр которой определяет степень деформации угля: при малом уровне деформаций концентрация ПМЦ возрастает относительно первоначальной, а при большей (более 25%) – снижается.

В реальных условиях наибольший уровень структурной перестройки угольного вещества достигается в выбросоопасных зонах, приуроченных к геологическим нарушениям. Исследования изменений концентрации ПМЦ в пробах угля, отобранных на различных расстояниях от полостей выброса, показывают, что при приближении к выбросоопасной зоне она возрастает при 10–12 м, достигает максимального значения в интервале 5–7 м, а с двух метров до полости и в выброшенном угле снижается концентрации до 30% относительно максимальных значений [4].

Изменение микроструктуры угля в выбросоопасных зонах обуславливает отклонение выхода летучих веществ угля, что характеризует степень его метаморфизма от среднего по пласту: в выбросоопасных высокометаморфизованных углях уровень метаморфизма ниже, чем в невыбросоопасных, а в выбросоопасных зонах пластов средней и низкой стадии метаморфизма – выше, что позволяет говорить о генерировании углем газа в этих зонах. Так, для угольных пластов с выходом летучих 20–30% отклонение составляет 2%, что в пересчете на метан определяет дополнительное его количество (около 0,03 м<sup>3</sup>/кг угля) выделяющегося из угля [5].

Существующая методика оценки выбросоопасности угольных пластов базируется на определениях критических значений выхода летучих веществ, газоносности и глубины ведения горных работ. Вместе с тем, для угольной промышленности Донбасса известна целая гамма пластов, для которых вышеуказанные параметры превышают критические значения, однако проявление выбросоопасности при ведении на них горных работ отсутствует, несмотря на пересечения геологических нарушений, в которых на соседних пластах имели место выбросы угля и газа. Это свидетельствует о необходимости учета физико-механических свойств угля в формировании выбросоопасных зон, как одного из основных общепринятых показателей, характеризующих выбросоопасность.

Склонность угольных пластов к формированию выбросоопасных зон устанавливалась путем сравнений динамических физико-механических свойств угля выбросоопасных и невыбросоопасных пластов, определение которых проводилось по скоростям распространения в них продольных и поперечных упругих волн, вдоль ( $\parallel$ ) и поперек ( $\perp$ ) естественного напластования, по которым рассчитывались значения динамических модулей упругости ( $E$ ), сдвига ( $G$ ), объемного сжатия ( $K$ ) и коэффициент Пуассона ( $\mu$ ) выбросо- и невыбросоопасных пластов различной степени метаморфизма.

Оценка существенности различия выделенных параметров проводилась по критерию Фишера с надежностью 0,99 и позволила определить группы информативных показателей свойств угля, разделяющих выбросоопасные и невыбросоопасные пласты.

$$V_{daf} > 30\% - K_{\parallel}^{\partial} E_{\parallel}^{\partial} G_{\parallel}^{\partial}$$

$$V_{daf} = 20-30\% - E_{\parallel}^{\partial} G_{\parallel}^{\partial} \mu_{\parallel}^{\partial}$$

$$V_{daf} = 10-20\% - E_{\parallel}^{\partial} G_{\parallel}^{\partial} \mu_{\parallel}^{\partial}$$

В выделенных группах модули упругости выбросоопасных пластов в горизонтальной плоскости меньше, а коэффициент Пуассона больше, чем у невыбросоопасных почти на 30%.

Оценка прочностных свойств угля, показателем которых является характеристическая температура Дебая ( $\theta, ^{\circ}K$ ), определяемая по значениям динамических параметров угля показывает, что склонность угля к разрушению вдоль напластования для выбросоопасных пластов меньше, чем для невыбросоопасных (табл. 1).

Таблица 1

Vdaf, %	Значение $\theta$ для углей	
	Выбросоопасных пластов	Невыбросоопасных пластов
> 30	168	168
20-30	176	230
10-20	136	150

При выходе летучих  $V_{daf} = 10\text{--}20\%$  значения характеристической температуры для выбросоопасных пластов приближается к  $\theta$  графита в межслоевой плоскости (91 К), обладающей наименьшей прочностью.

Таким образом, пониженные значения модулей упругости, сдвига и повышенный коэффициент Пуассона выбросоопасных угольных пластов свидетельствуют об их повышенной склонности к разрушению в плоскости напластования.

Угольные пласты, склонные к газодинамическим проявлениям, являются высокогазоносными, в которых газ физически связан с углем, т.е. находится в сорбированном состоянии. Для установления особенностей состояния газа и его воздействия на скелет угля использованы основные положения теорий флуктуационного электромагнитного поля (дисперсионные силы) и капиллярных явлений [6]. Из условия равенства химических потенциалов свободного ( $\varphi_{св}$ ) и сорбированного газа ( $\varphi_{сорб}$ ), полученных соответственно из термодинамических и дисперсионных представлений установлено, что равновесная толщина сорбированного слоя газа зависит от температуры и давления (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ) на толщину сорбированного слоя метана ( $CH_4$ ) и углекислого газа ( $CO_2$ )**

$P$ , МПа	Толщина сорбированного слоя газа, Å, при температуре $T$ , К											
	T = 300		T = 290		T = 280		T = 270		T = 250		T = 230	
	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
0,1	8,17	8,66	8,29	8,86	8,41	9,08	8,54	9,33	8,85	9,96	9,18	–
1,0	9,27	10,56	9,44	11,00	9,61	11,55	9,80	12,25	10,25	14,80	10,84	–
2,0	9,80	11,82	9,99	12,57	10,20	13,64	10,44	15,34	11,00	–	11,77	–
3,0	10,19	13,08	10,40	14,36	10,65	16,67	10,93	24,70	11,60	–	12,57	–
4,0	10,52	14,60	10,77	17,07	11,04	27,95	11,36	–	12,15	–	13,35	–
5,0	10,85	16,78	11,09	24,71	11,40	–	11,75	–	12,68	–	14,16	–
6,0	11,10	21,25	11,39	–	11,74	–	12,14	–	13,22	–	15,05	–

При перекрытии сорбированных слоев газа возникает расклинивающее давление (эффект Дерягина), обуславливающее деформацию набухания при газонасыщении, составляющую в среднем по 35 выбросоопасным шахтопластам  $1,16 \cdot 10^{-3}$  отн.ед. В стесненных условиях расклинивающее давление газа в углях вызывает дополнительные внутренние напряжения (напряжения «набухания»), величина которых, определенная по методу изменения электросопротивления, достигает 35,0 МПа при давлении газонасыщения 3,0 МПа. Влияние давления газонасыщения на величину напряжений набухания имеет практически существенное значение до 2,5 МПа.

На цилиндрических образцах, приготовленных путем прессования угольной фракции из этих же углей и имитирующих разрушенный и спрессованный уголь в зонах геологических нарушений, деформации набухания соста-

вили  $1,31 \cdot 10^{-2}$  отн.ед., что более, чем на порядок превышает деформации ненарушенного угля. При этом модули деформаций набухания ( $\alpha$ ), определяемые как отношение деформаций набухания к давлению газонасыщения, составляют  $0,58 \cdot 10^{-3}$  и  $0,65 \cdot 10^{-2}$  МПа<sup>-1</sup> соответственно для ненарушенных и нарушенных углей. Исходя из единства природы и механизма выбросов газоносных углей и песчаников были проведены исследования модулей упругости выбросо- и невыбросоопасных песчаников, которые оказались соответственно равными  $2,15 \cdot 10^4$  МПа и  $4,83 \cdot 10^4$  МПа [7].

Газонасыщение выбросоопасных песчаников также сопровождается уменьшениями модуля упругости ( $E$ ), деформации объема ( $\epsilon_V$ ) и увеличением напряжений набухания (табл. 3).

Таблица 3

Физико-механические характеристики песчаника	Давление газонасыщения, МПа								
	0	0,6	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	12,5	13,5
$E, 10^4$ МПа	2,15	1,8	1,75	1,85	1,74	1,98	1,51	1,53	1,51
$\epsilon_V, 10^5$ МПа	124	115	114	100	92	81	73	67	58
Напряжения набухания, МПа	0	5,8	11,7	16,9	22,5	23,0	23,0	–	–

Основываясь на полученных результатах, а также учитывал особенности свойств и состояния массива в выбросоопасных зонах и проявляющихся в незначительных размерах отжатого и дегазированного участков пласта в области влияния выработок, отсутствии конвергенции вмещающих пород, автором выдвинуто понятие об «эффекте самоэкранировки выбросоопасных зон», заключающемся в том, что до достижения сил горного давления в призабойной части пласта уровня напряжений набухания в системе «уголь-газ», величина которых обуславливается нарушением угля и его газоносностью, воздействие вмещающих пород на пласт не проявляется, а деформируемость угля определяется его упругим восстановлением в выработанное пространство с образованием разгруженной зоны.

Моделирование процессов деформирования газонасыщенных горных пород при разгрузке проводилось на специальных стендах, которые позволяли изменять напряженно-деформированное состояние газонасыщенных образцов угля и породы путем снятия одной компоненты напряжений с одновременной регистрацией деформации. Изучалось влияние напряженного состояния, газонасыщенности и динамики изменения нагрузки на величину деформаций по направлению снятия напряжений. Установлено, что разгрузка сопровождается появлением растягивающих деформаций, величина которых возрастает с повышением напряженного состояния и давления газонасыщения. Скорость разгрузки позволяет регулировать величину деформаций растяжения от критических, сопровождающихся разрушением угля и породы при динамическом сбросе напряжений до величины, соответствующей их упругому восстановлению при плавном снятии нагрузки.

В реальных условиях переход выбросоопасных пластов в состояние, характерное для призабойной части выработок, сопровождается появлением деформаций в сторону выработанного пространства и в общем случае определяется суммарными значениями упругой, пластичной и остаточной деформациями.

Поскольку с течением времени имеет место непрерывный переход упругих деформаций в остаточные вследствие релаксационных процессов, то разгруженный массив характеризуется остаточными деформациями растяжения, определяющими разрыхление массива и его дегазацию, т.е. формирование в призабойной части пласта разгруженной зоны, безопасной по газодинамическим проявлениям.

Комплексным показателем термодинамических процессов, происходящих в системе «уголь-газ», является температура, как показатель тепловых эффектов при ее деформации и дегазации. Конечная температура угля при переходе из объемно-напряженного состояния в состояние полной разгрузки в общем случае подчиняется зависимости:  $T = T_0 + \Delta T_\sigma + \Delta T_x$ , где  $T_0$  – геостатическая температура массива на глубине залегания пласта; а  $\Delta T_\sigma$ ,  $\Delta T_x$ , – приращения температур при механическом деформировании и дегазации соответственно [8]. Поскольку практически весь газ в угольном пласте находится в сорбированном состоянии (до 95 %), то изменение температуры вследствие дегазации определяется процессом десорбции и описывается уравнением:

$$\Delta T_x = Q(X_0 - X_{\text{ост}})/C_y\gamma,$$

где  $Q$  – интегральная теплота десорбции метана из угля;  $C_y$  – теплоемкость угля;  $\gamma$  – объемный вес угля;  $X_0$ ,  $X_{\text{ост}}$  – природная и остаточная газоносность пласта соответственно.

Экспериментальными определениями теплоты десорбции метана из углей различных стадий метаморфизма установлено, что она является практически постоянной величиной равной  $\approx 20$  кДж/моль для углей с  $V_{\text{daf}} = 9\text{--}30\%$  в интервале давлений от 0,1 до 5 МПа, что обуславливает снижение температуры угля на 9 К относительно начальной.

Механическое нагружение дегазированных образцов угля вплоть до его разрушения сопровождается изменением его температуры в пределах от  $2 \cdot 10^{-2}$  до 2 К.

Переход массива из естественно-напряженного состояния в состояние полной разгрузки на поверхности забоя в основном определяет изменение температуры вследствие десорбции газа. Абсолютные значения температуры угля будут определяться разницей между начальной и остаточной газоносностью пласта, т.е. количеством десорбированного метана. Процесс дегазации угля характеризуется газокинетическими параметрами, тесно связанными со структурными особенностями его строения. Поскольку, в общем случае, остаточная газоносность угля может быть определена по уравнению

$$X_{\text{выд}} = X_0 - X_{\text{ост}},$$

где  $X_{\text{ост}} = X_0 \exp(-t/\tau)$ ;  $t$  – время от начала процесса десорбции, с;  $\tau$  – кинетический параметр десорбции, с, то относительное изменение количества выделившегося газа будет определяться временем и кинетическим параметром.

Для определения кинетического параметра десорбции разработан оперативный метод, заключающийся в том, что образец угля насыщается газом под давлением 5,0 МПа при непрерывном контроле концентрации ПМЦ.

Взаимодействие молекул газа с радикалами угля приводит к снижению концентрации ПМЦ, Уравнение изменения концентрации ПМЦ за время наблюдения 10–12 мин имеет вид:  $N = N_k + (N_0 - N_k) \exp(-t/\tau)$ , где  $N$ ,  $N_0$ ,  $N_k$  – текущее, начальное и конечное значения концентрации ПМЦ соответственно.

Значения кинетического параметра десорбции, полученные для более 100 шахтопластов Донбасса, изменяются в пределах от 160 до 1000 сек. Расчетное относительное количество десорбированного газа составляет от 70 до 95% от природной газоносности. При этом установлено, что по мере приближения к выбросоопасной зоне (шахта им.газеты Социалистический Донбасс, пласт h10, 5-й западный конвейерный штрек), значение кинетического параметра десорбции снижается от 223 до 170 сек при одновременном увеличении иодного показателя степени нарушенности угля ( $\Delta J$ ) с 2,0 до 3,9 мл/г.

Установление газокинетических параметров угля позволяет с одной стороны объяснить проявление так называемых «запоздалых» выбросов, а с другой стороны регламентировать скорость подвигания горных выработок по выбросоопасным пластам (время последовательной выемки угля при челноковой схеме разработки должно составлять не менее трех часов после окончания очередного цикла работ).

Взаимосвязь тепловых эффектов с кинетическими параметрами и структурной нарушенностью угля предопределяет возможность использовать изменения температуры угольных пластов для контроля их значений в зонах различной выбросоопасности.

Общепринято, что в призабойной части пласта можно выделить области предельно-напряженного состояния, включающие зону отжима и упругого состояния угля, характеризующиеся воздействием напряжений от максимальных до пластовых. В области предельно-напряженного состояния происходит разрушение угля, поскольку уровень напряжений превышает предельно допустимую нагрузку. Разрушение на границе областей интенсифицируется к поверхности забоя и сопровождается трением по поверхностям трещин, которое инициирует дальнейшее местное растрескивание (дробление) угля и дегазацию массива

Термодинамический анализ указанных процессов позволил установить: разрушение угля и внутреннее трение обуславливают выделение тепла; упругая разгрузка угля, дегазация массива, включающая десорбцию газа, его адиабатическое расширение и фильтрацию, сопровождается снижением температуры угля. В зависимости от существенности влияния каждого из указанных факторов изменяется температура угля в призабойной части пласта.



Бурение контрольного шпура, оказывающего возмущающее воздействие на массив, сопровождается выходом штыба, температура которого по длине шпура отражает газодинамическое и напряженное состояние массива в призабойной части пласта и характеризуется следующей закономерностью: от груди забоя в глубину массива температура штыба возрастает, достигает максимума, а затем снижается. Практическая апробация данного способа проводилась на особо выбросоопасных пластах h7, h8, h10 в очистных и подготовительных выработках шахт ПО «Донецкуголь». Температура проб штыба с 0,5-метрового участка шпура является информативным показателем и позволяет устанавливать влияния: защитной отработки - температура по длине шпура практически не изменяется; бутовых полос - максимальное значение температуры достигается на глубине до 2-х метров и превышает ее значение на груди забоя на 1,5 К; снижение температуры на 3-х метровой глубине составляет примерно 1 К, на общем фоне повышенной (более чем на 1,5 К) температуры по сравнению с центральной частью лавы. В выбросоопасных зонах снижение температуры штыба составляет до 5 К, а ее максимум достигается на глубине до 1,5 метров.

Сравнение характера изменений температуры проб штыба по длине шпура с нормативным способом определения размеров зоны разгрузки по динамике начальной скорости газовыделения свидетельствует об их идентичности и о возможности использования способа определения зоны разгрузки по динамике температуры проб штыба, а именно - за величину зоны разгрузки принимается расстояние от груди забоя до интервала, на котором рост температуры проб штыба сменяется падением. Аналогичный характер изменения имеет температура стенок шпура, определяемая поинтервально, однако способ по динамике температуры штыба предпочтителен, так как он менее трудоемок и более оперативный [9].

Комплексным показателем изменения температуры поверхности забоя вследствие газодинамических процессов с учетом влияния структурных изменений в угле является его радиационная температура, подчиняющаяся закону Стефана-Больцмана и регистрируемая по интенсивности инфракрасного излучения (ИК – излучения).

Для угольных пластов в зонах, склонных к выбросам угля и газа и характеризующихся нарушенной структурой, установлено изменение параметров, определяющих интенсивность ИК-излучения:

- электрофизических – при переходе от нарушенных участков угля к ненарушенным концентрация парамагнитных центров, обуславливающих изменение диэлектрических свойств возрастает;
- коллекторских – угли с нарушенной структурой характеризуются повышенной пористостью и просветностью;
- газодинамических - начальная скорость газоотдачи в углях с нарушенной структурой выше, чем в ненарушенных, т.е. процесс десорбции газа протекает более интенсивно;

– геодинамических - в выбросоопасных зонах, приуроченных к участкам угольного массива со структурной нарушенностью, отсутствует конвергенция вмещающих пород, что приводит к разрушению призабойной части пласта от деформаций упругого восстановления.

Совокупное и однонаправленное изменение указанных свойств и состояния массива позволило научно обосновать возможность использования теплового (ИК) излучения забоя угольного пласта для контроля его структурной нарушенности. Для углей различной степени нарушенности, т.е. различной склонности к выбросоопасности, изменение интенсивности ИК-излучения относительно ненарушенных участков пласта превышает 5 %. С учетом изменения абсолютной температуры поверхности угольного пласта в выбросоопасных зонах вследствие десорбции газа снижение интенсивности ИК-излучения достигает 15 %, что предопределяет его использование в качестве самостоятельного комплексного параметра при оценке состояния призабойной части выбросоопасных пластов [10].

На основании выполненных исследований были определены исходные требования к средствам измерений радиационной температуры забоев угольных пластов (ИК – пирометры) для прогноза зон геологических нарушений и параметров контроля их структурной нарушенности, из которых основными являются: диапазон контролируемых отклонений температуры  $\pm 5^\circ\text{K}$ ; погрешность – 4 %; время срабатывания – не более 10 с; продолжительность непрерывной работы – 6 ч. Пирометр позволяет определять радиационную температуру забоя угольного пласта с расстояния до 1,5 м от него с поверхности забоя площадью 0,3 м<sup>2</sup>. Время проведения контроля состояния массива по длине 250-метровой лавы составляет менее 2 ч.

Температура окружающей среды, существенно изменяющаяся по длине горных выработок, является основным фактором, влияющим на радиационную температуру. В качестве показателя, определяющего радиационную температуру угля, было выбрано отклонение температуры угля от температуры воздуха в выработке в точке измерения. Взаимосвязь между отклонениями абсолютной и радиационной температуры угля от температуры воздуха определяется выражением:

$$\Delta T_{\text{абс}} = 0,98\Delta T_{\text{рад}} + 0,96,$$

где:  $\Delta T_{\text{абс}}$ ,  $\Delta T_{\text{рад}}$  – отклонения абсолютной и радиационной температур угля от температуры воздуха, К, соответственно.

Определение отклонений радиационной температуры по длине очистной выработки проводится через 3–5 метров. При наличии геологического нарушения в лаве устанавливают зону его влияния по пониженным значениям радиационной температуры. Для дизъюнктивных мелкоамплитудных нарушений изменения радиационной температуры в зоне их действия описываются уравнением:  $\Delta T_{\text{рад}} = -1,4 - 0,335/L$ , где  $L$  – расстояние от плоскости сместителя, м, при этом влияние нарушения на структурную нарушенность угля может достигать 20 м.

Определение размеров зоны влияния геологических нарушений на выбросоопасных пластах позволяет целенаправленно применять противовыбросные мероприятия.

Прогноз геологических нарушений по радиационной температуре осуществляется путем анализа результатов изменений в последовательных циклах выемки. Устойчивое снижение радиационной температуры на исследуемых участках свидетельствует о приближении к геологическому нарушению, прогнозирование мелкоамплитудных геологических нарушений по радиационной температуре забоя позволяет устанавливать их наличие с расстояния до 12 метров [11].

В подготовительных выработках на значения радиационной температуры забоя существенное влияние оказывает воздушная струя, омывающая забой и определяющая неравномерность распределения температуры по его поверхности. Для исключения неравномерности обдува производят измерения радиационной температуры угля и вмещающих пород в смежных точках над- или под угольным пластом через 0,5–0,6 м, по их разности устанавливают значения отклонений радиационной температуры, которые усредняют и принимают за окончательное значение радиационной температуры в данном цикле проходки. Установлено, что значения радиационной температуры коррелируют с газоносностью  $X$  и величиной зоны разгрузки  $\ell_{з.р.}$ :

$$\Delta T_{\text{рад}} = 0,86 - 6,87 \cdot 10^{-2} X / \ell_{з.р.} \quad (\mathfrak{R} = 0,825)$$

При внедрении в выбросоопасную зону значения радиационной температуры снижаются более, чем на  $1^\circ\text{K}$ , в неопасных зонах снижение температуры отсутствует.

### **Выводы.**

1. Созданы научные основы релаксационной термодинамики газонасыщенных угольных пластов, заключающиеся в том, что перестройка угольного вещества в геологической истории существования горного массива (с учетом инверсии угольных пластов, денудации земной поверхности, тектонических воздействий) определяется радикальным термофлуктуационным процессом на отдельных химических связях с созданием равновесной системы «уголь-газ» при соответствующих внешних воздействиях - горное давление, температура, фактор времени. Если на доинверсионном этапе геологической истории существования массива на максимальной глубине погружения пластов основным фактором, определяющим структурную перестройку угля, являлась температура, то в процессе инверсии пластов в зону влияния земной поверхности и на современных глубинах, структурная перестройка угля определяется наличием касательных напряжений в массиве горных пород.

Направленность структурных преобразований в зоне влияния касательных напряжений является регрессивной по отношению к уровню структурной организации системы «уголь-газ», достигнутому на глубине максимального погружения пластов.

2. Доказано, что в зонах геологических нарушений и структурной нарушенности угля, формирующих выбросоопасность, структурные преобразования определяют уменьшение степени метаморфизма в углях с выходом летучих веществ менее 15 %, а в углях средней и низкой степени метаморфизма ( $V_{daf} > 15 \%$ ) – увеличение. Переход от неопасных к выбросоопасным участкам пласта определяется непрерывным изменением структурных преобразований, заключающемся в том, что под действием касательных напряжений возрастает нарушенность угля, которая достигая критической величины, формирует вследствие рекомбинации разорванных связей новую, динамически неустойчивую, систему.

3. Созданы способы контроля величины зоны разгрузки в призабойной части выбросоопасных угольных пластов, базирующиеся на определении начальной скорости газовыделения, определяемой при поинтервальном ее измерении в призабойной части пласта, и на измерении температуры проб штыба на каждом интервале бурения, позволяющие устанавливать разгруженную и дегазированную зону по динамике их изменения, при этом рост или стационарность указанных показателей сменяется падением, что свидетельствует о внедрении контрольного шпура за пределы зоны разгрузки.

4. Созданы научные основы методов прогноза мелкоамплитудных геологических нарушений и участков структурной нарушенности угля по радиационной температуре забоя угольного пласта, базирующиеся на изменениях излучательной способности и абсолютной температуры.

5. Разработаны средства и метод измерения радиационной температуры забоев в условиях изменения температуры воздушной струи по длине горных выработок. Проведены промышленные испытания серийных образцов измерителя радиационной температуры, результаты которых одобрены и утверждены в установленном порядке.

6. Разработан способ прогноза геологических нарушений и зон их влияния по длине очистного забоя по радиационной температуре, который позволяет устанавливать их наличие впереди забоев выработки на расстоянии до 12м. Способ прошел промышленные испытания. Результаты испытаний положительные и утверждены Межведомственной комиссией.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошин Н.Е., Вайнштейн Л.А., Брюханов А.М., и др. Выбросы угля, породы в шахтах Донбасса в 1906–2006 гг. (Справочник). – Донецк: СПД Дмитренко, 2007. – 908 с.
2. Маевский В.С. Термодинамическая устойчивость выбросоопасных угольных пластов, I // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. трудов. Макеевка–Донбасс. – МакНИИ. – 1986. – С. 64–69.
3. Маевский В.С. Термодинамическая устойчивость выбросоопасных угольных пластов II // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. трудов. Макеевка–Донбасс. – МакНИИ. – 1987. – С. 33–39.

4. Маевский В.С. , Поляшов А.С. Термодинамическая устойчивость выбросоопасных угольных пластов, III // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах: Сб. научн. трудов. Макеевка–Донбасс. – МакНИИ. – 1990. – С. 92–100.
5. А.С. 1082970 СССР, МКИ Е 21F5/00. Способ определения выбросоопасности зон угольных пластов / Большинский М.И., Маевский В.С., Тимофеев Э.И. – Оpubл. 1984. – Бюл. № 12.
6. Маевский В.С. К вопросу о фазовых превращениях в порых ископаемых углей // Снижение травматизма при взрывных работах в угольных шахтах. – Сб. научн. трудов. Макеевка–Донбасс. – МакНИИ. – 1990. – С. 75–79 (ДСП).
7. Маевский В.С., Большинский М.И. Влияние газонасыщения на физико–механические свойства горных пород // Способы и средства безопасного ведения взрывных работ, совершенствование проветривания угольных шахт: Сб. научн. трудов. Макеевка–Донбасс. – МакНИИ. – 1980. – С. 62–66.
8. А.с. 648742 СССР, МКИ Е21F5/00. Способ определения зоны разгрузки угольного пласта/Маевский В.С., Николин В.И., Большинский М.И., Рубинский А.А., Воронков Н.И. – Оpubл.1979. – Бюл. № 7.
9. А.с. 972142 СССР, МКИ Е21F5/00. Способ контроля выбросоопасности угольного пласта / Маевский В.С., Самойленко О.Н. – Оpubл. 1982. Бюл. № 41.
10. А.с. 1114797 СССР, МКИ Е21F5/00. Способ контроля выбросо – опасности при выемке угля / Маевский В.С., Николин В.И., Большинский М.И., Рубинский А.А., Воронков Н.И. – Оpubл.1984. Бюл.№ 35.
11. Маевский В.С. Термодинамика выбросоопасных угольных пластов и тепловые методы контроля их газодинамического состояния и структурной нарушенности: Автореф. дисс... докт. техн. наук: 05.15.11 / Институт проблем комплексного освоения недр АН СССР. – Москва. – 1991. – 35 с.