

С.А. КАЛЯКИН (д-р техн. наук, проф. ДонНТУ)
В.К. КОСТЕНКО (д-р техн. наук, проф. ДонНТУ)

ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ И НАНОЧАСТИЦ ПЫЛИ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ УГОЛЬНЫМ ВЕЩЕСТВОМ, И БОРЬБА СО ВЗРЫВАМИ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

В статье изложены материалы исследований взрывоопасности горючих газов и угольной пыли с учетом давления воздуха и содержания в нем кислорода. Установлены зависимости кислородного индекса (КИ) горючих газов и наночастиц угольной пыли от их нижнего концентрационного предела взрываемости. Разработаны основы положений взрывобезопасности горных технологий при разработке газоносных выбросоопасных горных массивов. Определены параметры взрывозащиты забоев горных выработок при вентиляции их обедненным воздухом.

Ключевые слова: взрывоопасность, воспламенение, горючие газы, взрывобезопасность, взрывозащита, кислородный индекс, метан, обедненный воздух.

Введение. Взрывы горючих газов и угольной пыли на угольных шахтах очень часто приводят к катастрофам с большим числом человеческих жертв. Это указывает на то, что взрывобезопасность угольных шахт не соответствует техническим требованиям и стандартам охраны труда шахтеров. Во многом это связано с недостаточной изученностью геомеханохимических процессов, происходящих в угольных пластах на больших глубинах, и неправильной оценкой взрывоопасности горючих газов и наночастиц угольной пыли, генерируемых угольным веществом при его разрушении.

Анализ последних исследований и публикаций показал, что при разрушении угольных пластов происходит генерация горючих газов и образование большого числа наночастиц угольной пыли, которые способны образовывать взрывоопасные смеси с воздухом. Условия воспламенения таких взрывчатых смесей пока точно не определены, а достоверная оценка их взрывоопасности затруднена из-за большого числа факторов, влияющих на образование смесей, возникновение источников воспламенения и механизм горения и взрыва их в горной выработке. Это вызывает необходимость исследования этих факторов для надежной оценки взрывоопасности атмосферы и выбора эффективных средств и способов взрывозащиты в выработках угольных шахт.

Целью данной работы является изучение взрывоопасности горючих газов и наночастиц угольной пыли в смеси с воздухом с учетом влияния различных геомеханохимических факторов, возникающих при разрушении угольных пластов и влияющих на процесс генерации горючих газов угольным веществом, и механизма воспламенения и взрыва образовавшихся смесей.

Материалы исследований. Решение вопроса об оценке взрывоопасности атмосферы в горных выработках шахт сводится к установлению концентрационных пределов взрываемости горючих газов и наночастиц угля, генерируемых при разрушении угольных пластов. Типичная зависимость предельной концентрации горючего газа от содержания кислорода и инертного компонента в смеси хорошо известна [1]. Любая смесь «горючее – окислитель – инертный компонент» характеризуется верхним концентрационным пределом взрываемости – $C_{в.к.п.}$, нижним концентрационным пределом взрываемости – $C_{н.к.п.}$ и мысом области взрываемости, зависящим от предельного содержания инертного компонента в смеси – J_{np} и минимального содержания (концентрации) в ней кислорода Y_O . Эти три характерные точки образуют так называемый треугольник взрываемости газозвушной смеси, вершины которого соответствуют нижнему и верхнему пределам взрываемости горючего газа и пику мыса взрываемости газа в трехкомпонентной системе «горючее

– окислитель – инертный компонент» [2]. В общем виде условие взрывоопасности горючего газа в зависимости от его концентрации в воздухе – C_z можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} C_{в.к.л.} \geq C_z \geq C_{н.к.л.}, \\ C_0 \geq Y_O \end{cases}, \quad (1)$$

где C_0 – фактическая концентрация кислорода в трехкомпонентной смеси.

В работах [3, 4] показана зависимость концентраций $C_{в.к.л.}$ для метана и C_0 для кислорода от давления газовой смеси, концентрация же $C_{н.к.л.}$ для всех горючих газов от давления не зависит. Достоверность и обоснованность критических условий взрывоопасности горючих газов (1) подтверждены экспериментально для нормальных условий их воспламенения и взрыва. Вместе с тем, с увеличением давления возрастают верхний предел взрываемости метана и концентрация кислорода во взрывчатой смеси, что приводит к расширению области треугольника взрываемости. Ставя под сомнение адекватность зависимости вершин треугольника взрываемости горючих газов от концентрационных пределов при нормальном (атмосферном) давлении газовой смеси и избыточном ее давлении, находим новый метод оценки взрывоопасности горючих газов.

В сфере геомеханики подземной разработки угольных месторождений параметр давления газовой смеси, находящейся в выработке или трещинах нарушенного горного массива, функционально связан с глубиной горизонта – h , горным давлением – P_z и напряженным состоянием массива пород σ .

Земное тяготение и тепловое движение молекул газа приводят к некоторому стационарному состоянию, при котором давление газа растет с увеличением глубины разработки. Известно распределение Больцмана на случай поведения молекул газа в силовом поле Земли на глубине h :

$$\frac{dP}{dh} = \frac{mq}{kT} \cdot P. \quad (2)$$

При $P(h=0) = P_0$ (атмосферное давление) и учитывая, что $k = \frac{m}{\mu} \cdot R$, из уравнения (2) и уравнения состояния идеального газа получим зависимости для давления в газовой смеси:

$$P(h) = P_0 \exp\left(\frac{\mu \cdot q \cdot h}{RT}\right) \quad (3)$$

и концентрации кислорода в воздухе в зависимости от глубины горизонта:

$$C_k(h) = C_0 \exp\left(\frac{\mu \cdot q \cdot h}{R \cdot T}\right), \quad (4)$$

где μ – молекулярная масса для воздуха, $\mu = 0,029$ кг/моль;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура, $^{\circ}\text{K}$.

Для газовой смеси, находящейся в трещинах массива, на границе раздела «полость выработки – горный массив» давление в газовой смеси зависит не только от глубины горизонта, но и от горного давления:

$$P(h) = P_z + P_0 \exp\left(\frac{\mu \cdot q \cdot h}{R \cdot T}\right), \quad (5)$$

а в полости пласта – и от напряженного состояния горного массива:

$$P(h) = f(\sigma). \quad (6)$$

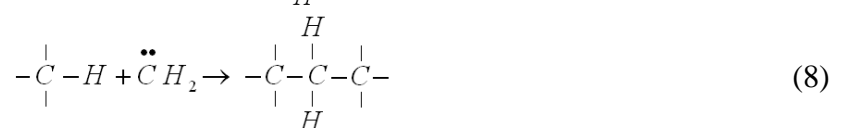
Оценим давление воздуха и концентрацию кислорода в нем в шахте на глубине 1400 м. На этой глубине в настоящее время ведутся горные работы на шахтах им. А.А. Скочинского и А.Ф. Засядько. По уравнениям (3) и (4) получим:

$$P(h) = 1,02 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{0,029 \cdot 9,81 \cdot 1400}{8,314 \cdot 303}\right) = 1,195 \cdot 10^5 \text{ (Па)},$$

$$C_0(h) = 20,95 \exp\left(\frac{0,029 \cdot 9,81 \cdot 1400}{8,314 \cdot 303}\right) = 24,54 \text{ (\%)}. \quad (7)$$

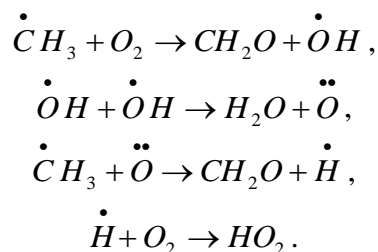
Расчет показывает, что на данной глубине давление примерно на 17% выше атмосферного и содержание кислорода в воздухе возрастает примерно до 24,5%. Следовательно, область треугольника взрываемости горючих газов существенно увеличивается. Не менее важен и анализ уравнений (5) и (6). Согласно работам, выполненным в МакНИИ, давление газа в шпурах и трещинах горного массива может достигать нескольких десятков атмосфер, а в зонах ПГД, характеризующих напряженное состояние массива, нескольких сотен атмосфер. Все это указывает на сложную газодинамику истечения газовой смеси из газоносного горного массива при его разрушении и на изменчивость состава газовой смеси. Происходит это не только за счет объема генерации газов угольным веществом, но и вследствие роста концентрации горючих газов и кислорода в результате действия давления и возникающих при этом неравновесных процессов истечения газа через трещины массива и инъекции воздуха по трещинам вовнутрь горного массива.

Не менее важна роль фактора горного давления и на запуск процесса механохимической активации разложения угля в горном массиве. Такая активация возникает в результате неравновесного состояния газоносного горного массива и действия в нем сжимающего и растягивающего напряжений, вызывающих сложную деформацию угля, приводящую к разрушению и разложению угольного вещества. В зонах деформации генетического взрыва, разгрузки и отжима пласта угольного вещества в горном массиве макромолекулы угля разрушаются и в результате механоактивации и разрыва химических связей перестраиваются в активные формы макромолекул угля. Разрыв химических связей в макромолекулах угля приводит также и к генерации угольным веществом предельных и непредельных углеводородов (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2), водорода, оксидов углерода, воды и наночастиц углерода. Последние обладают большой поверхностной энергией, благодаря которой на их поверхности возможны цепные реакции и образование большого числа активных промежуточных продуктов, из которых наиболее устойчив метилен – $\overset{\cdot\cdot}{C}H_2$, представляющий собой радикал двухвалентного углерода. Поэтому в зонах механохимической активации угольного вещества возможны реакции метилена с макромолекулами угля и между собой с образованием взрывоопасного ацетилена и крайне горючего водорода. В макромолекулах угля взаимодействие метилена с углеродом идет по механизму «реакции внедрения» по связям C-H и C-C:



В результате образуются молекулы активного угольного вещества, которые формируют зоны метастабильного состояния. Эти молекулы способны самопроизвольно разла-

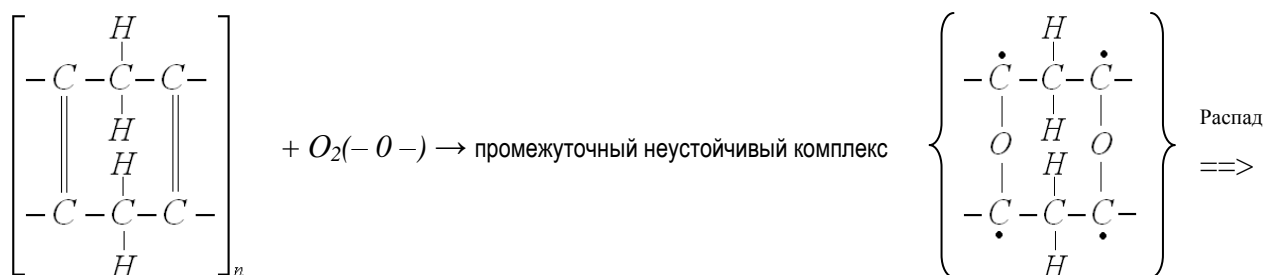
гаться, поэтому при наличии атомов кислорода наночастицы угольной пыли пирофорно воспламеняются. Образование в макромолекулах угля метильных групп CH_3 приводит к тому, что при распаде молекул угля происходит образование метил радикалов $\dot{C}H_3$. Эти радикалы при наличии воздуха легко вступают в цепные реакции с кислородом воздуха:



Далее сложный радикал HO_2 спонтанно распадается на радикалы \ddot{O} и $\dot{O}H$, происходит разветвление цепи, которое обеспечивает размножение радикалов и интенсивное, вплоть до взрывного, самовоспламенение продуктов распада угля в газовой фазе. Этот процесс протекает без каких-либо тепловых источников, только при наличии кислорода в местах его контакта с угольным веществом.

Реакция (8) обеспечивает перестройку макромолекул угля в графеновые комплексы, которые образуют газовые клатраты с газообразными продуктами разложения угля при его механохимической активации.

Газовые клатраты могут быть устойчивыми только при высоком горном давлении в зонах напряженного состояния горного массива. При уменьшении горного давления в зонах отжима и разгрузки пластов газовые клатраты распадаются, образуя весьма активные полупродукты распада и горючие газы. Эти продукты распада угля могут вступать в реакции как с кислородом, находящимся в газовой фазе смеси продуктов распада и воздуха, так и с кислородом эфирных связей, имеющихся в молекулах угольного вещества. При этом образуются метастабильные комплексы угля и газа, легко распадающиеся с выделением большого количества горючих газов. На практике такой механизм называют «внезапным выделением» метана и горючих газов. В его основе лежат реакции кислорода с продуктами полураспада макромолекул угля. Например:



Этот неустойчивый комплекс спонтанно распадается и образует $2nCO + 3nC + nCH_4$. Следовательно, при распаде угольного вещества выделяется большое количество горючих газов, очень быстро образующих с воздухом взрывоопасные смеси.

Таким образом, механохимическая активация угля под действием горного давления и сам фактор давления в горючих смесях, образующихся как в выработке, так и в трещинах горного массива, ставят под сомнение эффективность мониторинга взрыво- и пожаробезопасности ситуации в забое при технологических процессах добычи угля и проведения горных выработок. В основе такого мониторинга лежит контроль концентрации горючего газа. При этом предполагается, что после взрывных работ и внезапных выбросов газа рост концентрации метана в выработке подчиняется линейной зависимости [5]. Учитывая изложенное выше, необходимо признать спорность такого подхода к описанию процесса загазования горной выработки и оценке взрывоопасности среды в ней по нижнему концентрационному пределу взрываемости горючего газа. С чем это связано? Прежде всего с

тем, что при принятой линейной возрастающей зависимости $C(t) = C_n + b \cdot t$ начальная концентрация метана – C_n предполагается равной допустимой ПБ, то есть менее 1%. В этой зависимости постоянный коэффициент – b определяет скорость изменения концентрации метана во времени, t – период времени, в течение которого принимается решение по взрывозащите в горной выработке, пока не достигнуто равенство $C(t) = C_{н.к.п.}$. Согласно работе [6], датчики метана системы АГЗ достаточно точно и достоверно определяют его концентрацию в диапазоне от 0 до 4%, а при концентрации метана более 4,2% в их работе начинаются сбои.

При многокомпонентной газовой среде и большом количестве в ней горючих газов датчики метана зачастую выдают информацию с большей долей погрешности, чем для чистого метана. В свете изложенного материала это означает, что при внезапных и крайне быстрых процессах генерации горючих газов углем, когда в выработке непосредственно у забоя их начальная концентрация достигает практически 100%, информации с датчиков системы АГЗ о газовом контроле нет. Соответственно, нельзя оценить и взрывчатость шахтного воздуха в забое в этих условиях. Данный процесс может длиться несколько десятков минут, пока концентрация горючих газов не снизится до нижнего концентрационного предела взрываемости горючих газов. Из этого следует, что в интервале концентрации горючих газов от $C_{в.к.п.}$ до $C_{н.к.п.}$ в забое выработки всегда существует взрывоопасная среда. Эта среда может самовоспламениться по вышеизложенному механизму или взорваться в результате действия на нее ударных волн и источников высокой температуры, образованных при взрывном распаде ацетилена [7]. Это потребовало нового подхода в решении вопросов взрывобезопасности технологических процессов добычи угля и проведения горных выработок, разработке новых средств взрывозащиты и мониторинге взрывоопасности шахтного воздуха. Данная разработка базируется на следующих положениях теории горения и взрыва.

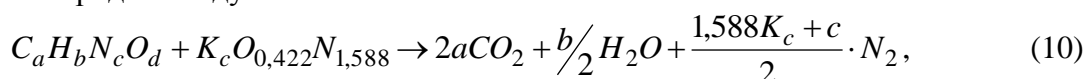
В теории горения горючих газов отмечается, что их нижний концентрационный предел не изменяется при замене в горючей смеси кислорода на инертный компонент, например, азот. Эта закономерность соблюдается практически вплоть до смесей горючих газов, соответствующих мысу области взрываемости. При этом концентрация кислорода в смесях, флегматизированных азотом у мыса взрываемости, мало отличается от эквивалентного содержания кислорода в горючем газе на его нижнем пределе взрываемости. Это положение позволяет находить расчетным путем концентрацию кислорода в крайней точке мыса взрываемости горючего газа:

$$Y_O = K_c \cdot C_{н.к.п.}, \% \quad (9)$$

где K_c – стехиометрический коэффициент реакции полного окисления кислородом горючего газа.

Таким образом, по уравнению (9) можно вычислять значение Y_O для горючих газов, генерируемых углем при его разрушении, а также определять критическое значение концентрации кислорода для многокомпонентных смесей с помощью их нижнего концентрационного предела. Для этого можно использовать имеющиеся термохимические данные реакций окисления горючих газов. Расчет предельной концентрации кислорода в мысе взрываемости газа позволяет перейти к критической концентрации кислорода в смеси, при меньшем значении которой горение газа и твердых горючих типа угля и его пылевидных фракций не возможно. Критическая концентрация кислорода, при меньшем значении которой отсутствует горение твердого горючего, называют кислородным индексом $KИ$. Учитывая физическую однозначность Y_O и $KИ$, можно для всех горючих в предельном случае сделать допущение $Y_O \approx KИ$. Тогда обе характеристики позволят одновременно оценить как взрывоопасность смесей воздуха с горючими газами, так и пожаро- и взрывоопасность частиц отложившейся и взвешенной в воздухе угольной пыли. Критическая концентрация кислорода, равная кислородному индексу ($Y_O = KИ$), позволит охарактеризовать в целом взрывобезопасность технологических процессов в угольных шахтах.

В общем виде для горючих веществ с брутто-формулой $C_aH_bN_cO_d$ при их горении и взрыве можно предложить следующую стехиометрическую реакцию окисления углерода и водорода кислородом воздуха:



стехиометрический коэффициент определяется по формуле:

$$K_c = \frac{2a + b/2 - d}{0,422}. \quad (11)$$

С помощью стехиометрических реакций окисления кислородом воздуха горючих газов с известным $C_{н.к.п.}$, можно установить вид эмпирической зависимости (9) кислородного индекса от произведения $K_c \cdot C_{н.к.п.}$. Известные термодинамические данные и $C_{н.к.п.}$ взрываемости горючих газов и паров углеводородов, обработанные методами корреляционного анализа с помощью компьютерной программы Curve Expert 1.3, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Нижние концентрационные пределы взрываемости и кислородный индекс для горючих газов и паров углеводородов

№	Химическая формула углеводорода, спирта, эфира	$C_{н.к.п.}$, %	Стехиометрический коэффициент, K_c	Произведение $K_c \cdot C_{н.к.п.}$, %	Кислородный индекс, $KИ = Y_O$, %
1.	CH ₄	5,3	9,479	50,239	12,1
2.	C ₂ H ₆	3,1	16,588	51,422	11,0
3.	C ₃ H ₈	2,2	23,697	52,133	11,4
4.	C ₄ H ₁₀	1,9	30,806	58,531	12,1
5.	C ₅ H ₁₂	1,5	37,915	56,872	12,0
6.	C ₆ H ₁₄	1,2	45,024	54,028	11,9
7.	C ₇ H ₁₆	1,0	52,133	52,133	11,8
8.	C ₈ H ₁₈	0,95	59,242	56,279	12,0
9.	C _{7,2} H _{12,85}	1,1	49,348	54,283	11,9
10.	C ₃ H ₆	2,0	21,237	42,654	11,5
11.	C ₄ H ₈	1,7	28,436	48,341	11,6
12.	C ₆ H ₆	1,4	35,545	49,763	11,2
13.	CH ₄ O	6,72	7,109	47,773	10,3
14.	C ₃ H ₆ O	3,00	18,957	56,872	13,0
15.	C ₂ H ₄	2,75	14,218	39,10	10,0
16.	CO	12,5	2,37	29,621	6,5
17.	H ₂	4,0	2,37	9,48	5,0
18.	C ₂ H ₂	2,1	11,848	24,882	6,2
19.	C ₄ H ₆ O	1,7	23,697	40,284	10,4

В результате обработки данных получены эмпирические зависимости кислородного индекса от произведения $K_c \cdot C_{н.к.п.}$. Для горючих газов и паров

$$Y_O = 12,94 - 8,718 \exp\left[-0,00011(K_c \cdot C_{н.к.п.})^{2,4803}\right], \%, \quad (12)$$

для предельных и непредельных углеводородов $CH_4 \dots C_6H_{14}$ и C_2H_4 , C_2H_2 , C_3H_6 , C_4H_8 , C_6H_6

$$Y_O = 12,176[1 + 18,5506 \cdot \exp(-0,1187 \cdot K_c \cdot C_{н.к.п.})]^{-1}, \%, \quad (13)$$

для метана:

$$Y_O = 17,13 - \frac{252,82}{K_c \cdot C_{н.к.п.}}, \%. \quad (14)$$

Эти эмпирические уравнения позволяют проанализировать степень взрывоопасности всех горючих газов, в том числе и генерируемых угольным веществом в смесях с воздухом. Однако в уравнениях (10) и (11) состав воздуха определен, исходя из нормальных концентрационных пределов атмосферы и давления в ней. А, как видно из уравнения (4), с ростом давления растет и концентрация кислорода в воздухе. Она также зависит и от состава воздуха, в основном от содержания в нем азота и других инертных газов. Следовательно, коэффициент 0,422 получен для кислорода при нормальных условиях атмосферы и составе воздуха. Однако он существенно изменится при изменении содержания в воздухе инертных газов (азот, аргон, углекислый газ) или давления, связанного с глубиной шахты и горным давлением массива пород. Чтобы учесть изменения состава воздуха и концентрации в нем кислорода, вводим кислородный коэффициент воздуха – A_0 , который для атмосферного давления и нормального состава воздуха при $C_0 = 21,0\%$ равен 0,422. Тогда в зависимости от глубины горизонта шахты h и концентрации кислорода C_0 получаем уравнение:

$$A_0 = (0,020213C_0 - 0,00184) \cdot \left[\exp\left(\frac{\mu \cdot q \cdot h}{R \cdot T}\right) \right]. \quad (15)$$

Используя уравнение (14), проверим, как изменяется кислородный индекс метана в метано-воздушной смеси (МВС) в зависимости от кислородного коэффициента воздуха, определяемого по уравнению (15). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Кислородный индекс метана в зависимости от A_0

№	$C_0, \%$	A_0	K_c	$K_c \cdot C_{н.к.п.}, \%$	$KИ$ и $Y_O, \%$
1	13,0	0,261	15,330	81,248	14,02
2	14,0	0,281	14,228	75,407	13,78
3	15,0	0,301	13,273	70,349	13,54
4	17,0	0,342	11,703	62,026	13,05
5	19,0	0,384	10,415	55,202	12,55
6	21,0	0,422	9,479	50,239	12,10
7	24,54	0,494	8,107	42,969	11,25

График зависимости $KИ$ (Y_O) метана от C_0 в воздухе показан на рис. 1, а эмпирическая зависимость, полученная методами корреляционного анализа, имеет следующий вид:

$$KИ (Y_O) = 17,151 - 0,241 C_0, \%. \quad (16)$$

Решение уравнения (16) при $KИ = Y_O$ позволяет найти безопасное значение концентрации кислорода в воздухе: $C_0 = 13,82\%$. На рис. 1 темным цветом показана область негорючей и невзрывчатой МВС с концентрацией кислорода в воздухе, равной кислородному индексу метана. Нужно отметить, что подобная закономерность зависимости горючести и взрывчатости метана от концентрации O_2 в воздухе будет соблюдаться и для любого другого горючего газа. Однако вопрос о воспламенении и взрыве угольной пыли в воздухе до настоящего времени не достаточно изучен. Имеются только достоверные экспериментальные данные по ее взрывчатости в воздухе в нормальных условиях опытного штрека. Исследование состава угля марки Ж пласта ℓ_1 шахты им. А.Ф. Засядько дано в работе [7]. Так же, как для горючих газов, можно и для угля определить термохимические коэффициенты при его окислении и $KИ$ с помощью нижнего предела взрывчатости пыли. Определим зависимость взрывчатости угольной пыли марки Ж пласта ℓ_1 от $KИ$.

На основании многочисленных экспериментальных взрывов пылевоздушной смеси (ПВС) в опытном штреке МакНИИ была получена зависимость нижнего концентрационного предела взрывчатости угольной пыли от ее параметров:

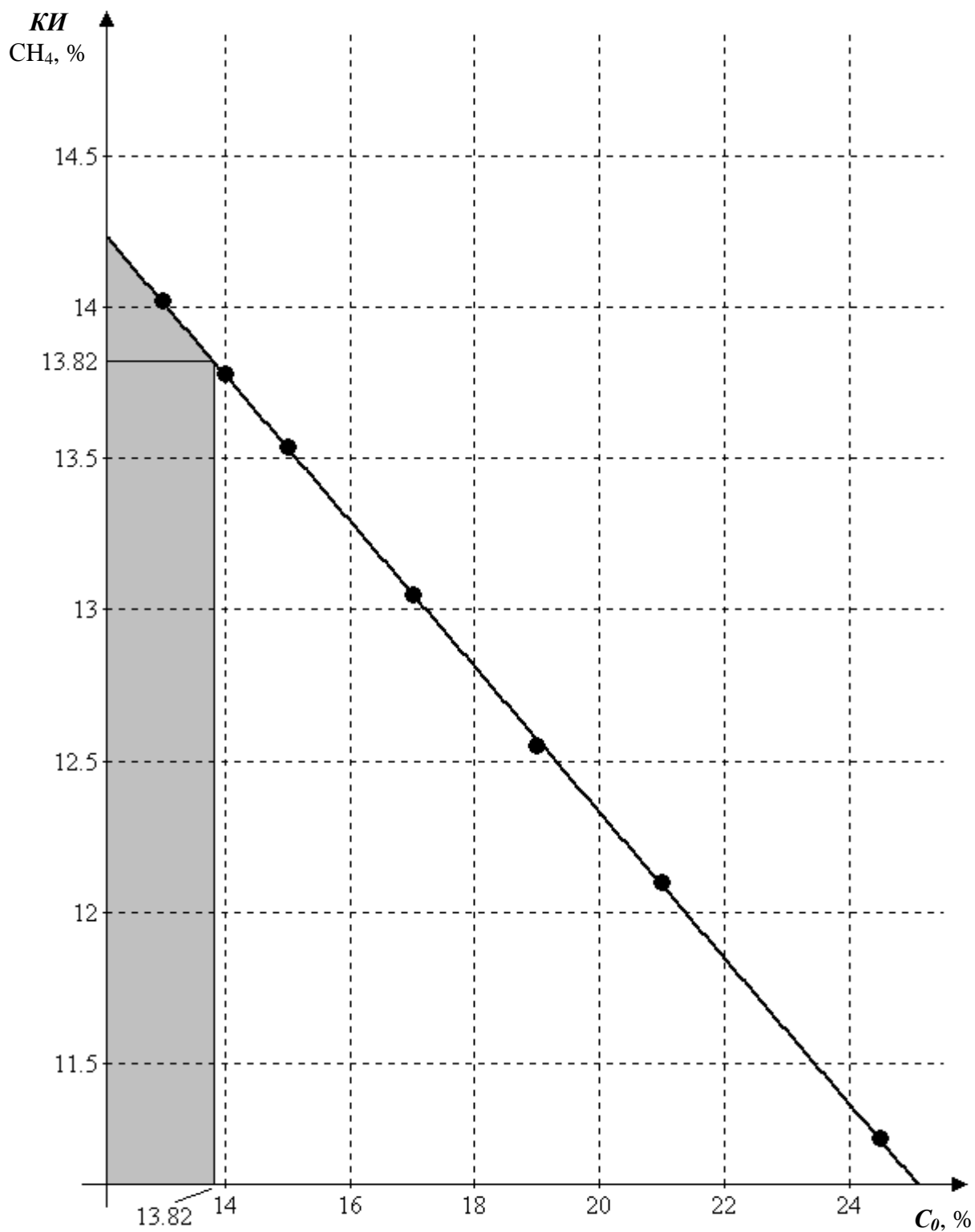
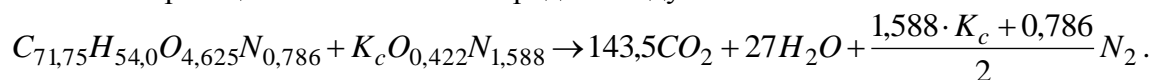


Рис. 1. График зависимости KI метана в МВС от концентрации кислорода в воздухе

$$C_{н.к.п.} = 53,3 \exp(-0,045V_2) + 1,4 \exp(-0,032V_2) \cdot Z_y, \text{ г/м}^3, \quad (17)$$

где V_2 – выход летучих продуктов (газов) из угля, %;
 Z_y – зольность угля, %.

Подставим в уравнение (17) значения параметров, характерных для угля марки Ж пласта ℓ_1 шахты им. А.Ф. Засядько: $V_2 = 34,0\%$ и $Z_y = 7,0\%$, получим $C_{н.к.п.} = 14,84 \text{ г/м}^3$. При нормальных условиях взрыва в опытной штольне с плотностью воздуха $1,2 \text{ кг/м}^3$ $C_{н.к.п.} = 1,23\%$, а в условиях шахты на глубине 1400 м, где плотность воздуха около $1,35 \text{ кг/м}^3$, $C_{н.к.п.} \approx 1,1\%$. Сделаем расчет стехиометрического коэффициента K_c для пыли угля по уравнению его реакции окисления кислородом воздуха:



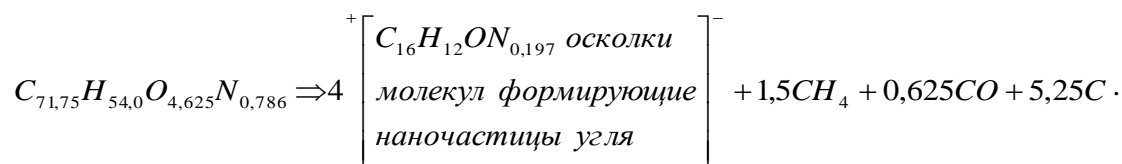
Тогда

$$K_c = \frac{143,5 + 27 - 4,625}{0,422} = 393,0 \text{ для нормальных условий,}$$

$$K_c = \frac{143,5 + 27 - 4,625}{0,494} = 335,78 \text{ для глубины горизонта 1400 м.}$$

При разрушении угля происходят его деструкция и частичное разложение и разрыв химических связей, это способствует образованию наночастиц, которые наряду с частицами исходного угольного вещества образуют взрывчатую ПВС.

Рассчитаем термодинамические величины для пыли угольного вещества и наночастиц частично преобразованного угля в результате его поэтапного разложения в процессе механоактивации:



По уравнению (12) рассчитаем $KИ$ для обычной угольной пыли и наночастиц пыли, полученных при распаде комплекса макромолекул угольного вещества. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Кислородный индекс для угольной пыли и наночастиц

№	Химическая формула угля	C_0 , %	A_0	K_c	$C_{н.к.п.}$, %	$K_c \cdot C_{н.к.п.}$, %	$KИ(Y_0)$, %
1	$C_{71,75}H_{54}O_{4,624}N_{0,786}$	21,0	0,422	393,07	1,23	483,47	12,94
2	$C_{71,75}H_{54}O_{4,624}N_{0,786}$	24,54	0,494	335,78	1,1	369,57	12,94
3	$[C_{16}H_{12}ON_{0,197}]$	21,0	0,422	87,68	1,23	107,84	12,94
4	$[C_{16}H_{12}ON_{0,197}]$	24,54	0,494	74,899	1,1	82,39	12,92

Расчеты показывают, что $KИ$ угля слабо зависит от условий взрывания пыли, то есть от содержания кислорода в воздухе и вида частиц угольной пыли. Даже у сверхактивной угольной пыли $KИ$ всего на 0,02% меньше, чем у обычной мелкодисперсной пыли. Также необходимо отметить, что $KИ$ угля лишь на немного больше, чем у метана, примерно на 8,3%. Это говорит о том, что угольная пыль не намного труднее метана воспламеняется и сравнительно легко окисляется при взрыве. Поэтому при расчете пределов взрываемости среды в выработке необходимо учитывать пределы взрываемости как мелкодисперсных частиц угольной пыли, так и выделяющихся из угля горючих газов. Кислородный индекс угольной пыли принимается равным критической концентрации кислорода в мысе взрываемости для пылевоздушных смесей. Как правило, взрывоопасная среда в выработках представляет собой сложную смесь из многих горючих газов с воздухом и угольной пылью. Поэтому важное значение имеет решение вопроса об оценке взрывчатости смеси газов и пыли с воздухом с учетом их $KИ$ и C_0 . Проведенные исследования поз-

воляют сформулировать условия невзрывчатости смеси горючих газов и угольной пыли с воздухом при любом их разбавлении воздухом. Смесь газов невзрывчата, если при содержании в ней горючих газов, соответствующем нижнему концентрационному пределу взрываемости, концентрация кислорода в смеси будет меньше или равна $KИ$ для смеси этих газов. Это условие можно записать в математическом виде, полученном из неравенства Ле-Шателье:

$$\left\{ C_0 - \frac{C_0}{\frac{C_1}{C_{1н.к.п.}} + \frac{C_2}{C_{2н.к.п.}} + \frac{C_3}{C_{3н.к.п.}} + \dots} \right\} \leq \frac{C_1 + C_2 + C_3 + \dots}{\frac{C_1}{KИ_1} + \frac{C_2}{KИ_2} + \frac{C_3}{KИ_3} + \dots}, \quad (18)$$

где C_1, C_2, C_3, \dots – концентрации горючих газов и наночастиц пыли, %.

Для смеси горючих газов, состоящей из метана, этана, ацетилена, наночастиц угольной пыли, водорода, оксида углерода и других газов в табл. 4 предложены рассчитанные значения $KИ$ как для нормальных условий воспламенения смеси, так и для условий воспламенения на горизонте 1400 м при повышенной концентрации кислорода в воздухе.

Таблица 4 – Значения $KИ$ и $C_{н.к.п.}$ для горючих газов, образующих взрывчатые смеси в угольных шахтах

№	Горючий газ	$C_{н.к.п.}, \%$	$KИ, \%$	
			нормальные условия, $h = 0$	$h = 1400$ м
1	Метан – CH_4	5,3	12,1	11,25
2	Водород – H_2	4,0	5,0	4,39
3	Оксид углерода – CO	12,5	6,5	6,5
4	Этан – C_2H_6	3,1	11,0	11,0
5	Ацетилен – C_2H_2	2,1	6,2	4,89
6	Угольная пыль	1,23	12,94	12,94
7	Угольные наночастицы	1,1	12,94	12,92
8	Сероуглерод – CS_2	1,0	4,89	4,68
9	Сероводород – H_2S	4,3	7,81	6,85

При определении взрывоопасности среды неравенство (18) имеет некоторый запас надежности, поскольку в качестве инертного газа рудничной атмосферы учитывался только азот, как составная часть воздуха. В реальных условиях в атмосфере шахт присутствуют пары воды и углекислый газ, которые могут увеличить $KИ$ любого горючего газа в смеси с воздухом. Однако содержание в смеси продуктов разложения угля паров H_2O и CO_2 не очень велико и составляет, как правило, несколько процентов. Поэтому не следует ожидать значительного (в разы) возрастания $KИ$ для горючих газов при содержании во взрывчатой смеси определенного количества паров воды и CO_2 .

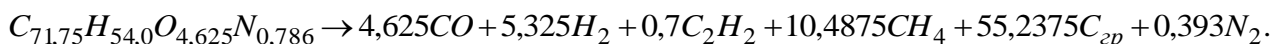
Важным следствием неравенства (18), которое определяет как условия взрывоопасности смеси горючих газов и угольной пыли с воздухом, так и безопасность этой смеси при изменении ее состава, является то, что с его помощью можно выбрать конкретные направления осуществления взрывозащиты в шахтах и определить надежный мониторинг взрывчатости исходящего из забоев шахтного воздуха.

Действительно, если добиться, чтобы концентрация кислорода в шахтном воздухе была не больше кислородного индекса горючих газов и угольной пыли ($C_0 \leq KИ$), то в забоях горных выработок будет создана автоматическая постоянно действующая взрыво- и пожарозащита. Для этого нужно перейти на интенсивную, обязательно нагнетательную, вентиляцию забоев выработок обедненным воздухом, в котором содержание кислорода

всегда удовлетворяет такому неравенству. Поставленная цель достигается с помощью систем вентиляции нагнетательного типа, в которых используют термомагнитные сепараторы воздуха для обогащения его азотом до пределов, когда концентрация кислорода в обедненном воздухе не станет меньше или равна $KИ$ для смеси горючих газов и угольной пыли с воздухом. Определим основные параметры такой взрывозащиты забоев выработок и условия обеспечения в шахтах необходимой жизнедеятельности шахтеров.

Для данного случая взрыво- и пожарозащиты возьмем наиболее опасные условия в забое, например при газодинамических явлениях, когда в забой выбрасывается большое количество горючих газов и наночастиц угольной пыли.

Для угля марки Ж выбросоопасного пласта ℓ_1 шахты им. А.Ф. Засядько получено уравнение разложения угольного вещества при внезапном выбросе:



Данное уравнение взято за основу в расчетах газовой обстановки в забое горной выработки при разрушении угольного пласта. Оценка взрывоопасности смеси продуктов разложения угля с воздухом при выбросе дается с учетом глубины разработки пласта $h = 1400$ м и наличия наночастиц угольной пыли в количестве $300 \dots 400$ г/м³.

Будем считать, что примерно 50% угольного вещества при выбросе разлагается по предложенному выше уравнению. Это предположение соответствует выделению горючих газов при выбросе угольного пласта в количестве примерно 240 м³/т, что достаточно часто имеет место на глубоких шахтах Донбасса. Тогда предполагаемые концентрации продуктов выброса угля в выработке следующие: угольная пыль – 20,59%, CO – 10,74%, H_2 – 12,37%, C_2H_2 – 1,62%, CH_4 – 24,35%, N_2 – 0,91%. Делаем расчет левой части неравенства (18):

$$24,54 - \frac{24,54}{\frac{20,59}{1,1} + \frac{10,74}{12,5} + \frac{12,37}{4,0} + \frac{1,62}{2,1} + \frac{24,35}{5,3}} = 23,665$$

и правой его части:

$$\frac{20,59 + 10,74 + 12,37 + 1,62 + 24,35}{\frac{20,59}{12,94} + \frac{10,74}{6,5} + \frac{12,37}{4,39} + \frac{1,62}{4,89} + \frac{24,35}{11,25}} = 8,14.$$

Видно, что неравенство не выполняется, то есть продукты разложения угля в смеси с воздухом образуют взрывчатые смеси. Находим граничное условие взрывобезопасности данных смесей, когда выполняется равенство C_0 и $KИ$ горючих газов. Это $C_0 = 8,44\%$.

Аналогично можно получить значение C_0 для безопасной выемки выбросоопасного пласта в лавах. В этом случае предполагаем, что разлагается примерно 10% вынимаемого комбайном угля, что соответствует газовыделению примерно 50 м³ горючих газов на 1 т угля и концентрации наночастиц пыли, выделяемых углем при работе комбайна, примерно 50 г/м³. Для этих условий при вентиляции забоя обедненным воздухом концентрация O_2 в нем согласно неравенству (16) должна быть не больше 10% ($C_0 \leq 10,0\%$).

Определим C_0 для взрывных работ в особо опасных условиях угольных шахт, где запрещено применение простых предохранительных аммонитов III-IV класса для взрывания по нарушенному газоносному массиву, в котором возможно образование в трещинах массива концентрации метана вплоть до его верхнего предела взрываемости (61,2%). При применении ПВВ III-IV класса в данных условиях необходима нагнетательная вентиляция трещиноватого забоя обедненным воздухом с содержанием O_2 не более 12,3%.

Таким образом, практически во всех самых опасных условиях шахты, где ведутся горные работы на глубине 1400 м, удается вентиляцией обедненным воздухом обеспечить постоянно действующую взрывозащиту в забоях выработок. Для этого нужны сепаратор-

ные или мембранные газоразделительные установки, обогащающие воздух для вентиляции забоев азотом до соответствующей безопасной концентрации кислорода, который, в свою очередь, в смеси с горючими газами обеспечивает взрывобезопасность.

Весьма важным является то, что вместо сложной и ненадежной системы АГЗ и газоанализаторов мониторинга взрывоопасной концентрации метана можно применять датчики определения концентрации кислорода в выработках. Тогда в забой горных выработок по вентиляционным скважинам подается бедный кислородом воздух, а нормальный воздух подается по принятой системе вентиляции. На определенном расстоянии от забоя на исходящей струе происходит их смешение и достигается приемлемая для нахождения людей концентрация кислорода в воздухе, примерно 14...19%. На этом участке выработки не возможно образование горючих газов или имеется принудительная система взрывозащиты, основанная на распылении ингибиторов реакций окисления горючих газов.

Таким образом, осуществляя мониторинг концентрации кислорода в забоях горных выработок, можно обеспечить приемлемую для человека газовую обстановку и атмосферу, значительно увеличить эффективность вентиляции и подачу охлажденного обедненного воздуха, тем самым снизить температуру в забоях, обеспечив при этом надежную взрыво- и пожарозащиту горных выработок и выработанного пространства угольных шахт на глубоких горизонтах.

Выводы

1. Установили, что на глубоких горизонтах угольных шахт (1400 м) при вентиляции забоев горных выработок нормальным воздухом концентрация кислорода в нем составляет 24,54%, что повышает взрывоопасность горючей пылегазовой среды. На такой глубине угольное вещество при высоком давлении горного массива самопроизвольно разлагается, образуя опасные промежуточные продукты, которые могут самовоспламениться и способствовать «внезапному выделению» горючих газов в выработку.

2. Существующая система газовой защиты и контроля состава воздуха несовершенна и на больших глубинах при внезапном выделении горючих газов и наночастиц угольной пыли в выработку не обеспечивает достоверной информации об их взрывчатости. Это приводит к бездействию и не принятию мер по борьбе с газом.

3. Установили безопасные значения кислородного индекса для всех горючих газов и наночастиц угольной пыли, образующихся при разложении угольного вещества.

4. Установили, что смесь горючих газов и угольной пыли с воздухом будет невзрывчатой, если содержание в ней горючих газов и угольной пыли соответствует нижнему концентрационному пределу взрываемости, а концентрация кислорода будет не больше ее кислородного индекса.

5. Установили параметры надежной взрывозащиты на технологических участках добычи угля и проведения горных выработок за счет использования нагнетательной системы вентиляции обедненным воздухом. При этом концентрация кислорода в нем при выбросах угля и газа должна быть не более 8,4%, при очистных работах – не более 10,0% и при производстве взрывных работ с применением ПВВ III-IV класса – не более 12,3%.

6. Предложили проводить мониторинг взрыво- и пожаробезопасности угольных шахт путем измерения и контроля датчиками содержания кислорода в забоях горных выработок, в выработанном пространстве и на исходящей струе в местах нахождения людей.

Библиографический список

1. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами / А.И. Розловский. – М.: Химия, 1972. – 368 с.

2. Зинченко И.Н. Аналитический метод оценки взрывоопасности рудничного воздуха / И.Н. Зинченко, Б.И. Топчиенко // Безопасность труда в промышленности. – М.: Недра, 1983. - № 10. – С. 34-35.
3. Калякин С.А. Взрывоопасность горючих газов при разрушении газоносных горных массивов / С.А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2009. – Вып. № 2 (24). – С. 34-43.
4. Калякин С.А. Оценка взрывобезопасности забоев горных выработок при выбросах и сотрясательном взрывании / С.А. Калякин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2009. – Вып. № 2 (22). – С. 39-55.
5. Брюханов А.М. Развитие теории и совершенствование практики предупреждения и локализации взрывов в глубоких шахтах: автореферат дисс. на соиск. научн. степени доктора технических наук: спец. 05.26.01 «Охрана труда» / А.М. Брюханов. – Днепропетровск, 2007. – 36 с.
6. Медведев В.Н. Повышение достоверности информации при многокомпонентном контроле шахтной атмосферы / В.Н. Медведев, Е.В. Беляева, А.Л. Скляр, С.Ф. Типоченков // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2009. – Вып. № 2 (22). – С. 81-88.
7. Калякин С.А. Предотвращение взрывов метана и пыли на угольных шахтах / С.А. Калякин // Безопасность труда в промышленности. – М.: Недра, 2008. - № 12. – С. 24-29.

У статті викладені матеріали досліджень вибухонебезпечності горючих газів і вугільного пилу з урахуванням тиску повітря і вмісту в ньому кисню. Встановлено залежності кисневого індексу (КІ) горючих газів і наночастинок вугільного пилу від їх нижньої концентраційної межі вибуховості. Розроблено основи положень вибухобезпеки гірських технологій при розробці газоносних викидонебезпечних гірських масивів. Визначено параметри вибухозахисту вибоїв гірничих виробок при вентиляції їх збідненим повітрям.

Ключові слова: вибухонебезпечність, займання, горючі гази, вибухобезпечність, вибухозахист, кисневий індекс, метан, збіднений повітря.

The article presents research material explosion of combustible gases and coal dust, taking into account air pressure and oxygen content in it. The dependences of the oxygen index (OI), combustible gases and coal dust nanoparticles from their lower explosive limit of the concentration. The fundamentals of the provisions of the explosion of mining technology in the development of gas-bearing outburst of mountain ranges. The parameters of the explosion faces of mine workings for ventilation of their depleted air.

Keywords: explosion, ignition, combustion gases, explosion-particular, explosion, oxygen index, methane, depleted air.