

*В.К. Костенко, д.т.н., проф., Т.В. Костенко (ДонНТУ, Донецк, Украина), Л. Штрох, Л. Мокош, М. Флейшингер (АО (ВВУУ) Радванице, Острава, Республика Чехия)*

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВЗРЫВООПАСНЫХ СВОЙСТВ ГАЗОВЫХ ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ

Представлено теоретическое обоснование методики для определения взрывчатых свойств флегматизированных смесей воздуха и горючих газов, подтвержденное экспериментальными данными

**Ключевые слова:** флегматизированные смеси воздуха, горючие газы

В горноспасательном деле для прогнозирования взрывоопасности шахтной газовой среды принято использовать так называемый «треугольник взрываемости» (диаграмма взрываемости) [1, 2], плоскую фигуру, построенную в координатах «окислитель-горючее». Ее вершинами являются нижний и верхний пределы взрываемости данной смеси и пик ее воспламенения.

Нижним и верхним пределами взрываемости называют такие концентрационные соотношения горючих газов и воздуха ниже и выше которых смеси не способны воспламениться и распространять взрыв [2]. Исходя из определения, понятия взрываемости и горючести газовых смесей являются синонимами, а интенсивность сгорания газозвушной смеси оценивают субъективно, исходя из скорости горения и объема скопления, как «вспышка», «хлопок», «взрыв».

При наличии в составе смеси нескольких горючих компонентов, определение нижнего и верхнего пределов взрываемости смеси горючих газов производят по известной формуле Лешателье, учитывающей долю каждого компонента и его предел взрываемости, %,

$$L = 100 / (p_1/L_1 + p_2/L_2 + p_3/L_3), \quad (1)$$

где  $L$  – предел взрываемости (нижний или верхний) суммы горючих газов, %;  $p_1, p_2, p_3$  – содержание каждого компонента в смеси горючих газов, %, определяемое по формулам:  $p_1 + p_2 + p_3 = 100, \%$ ;  $p_1 = C_1 100 / (C_1 + C_2 + C_3), \%$ ;  $p_2 = C_2 100 / (C_1 + C_2 + C_3), \%$ ;  $p_3 = C_3 100 / (C_1 + C_2 + C_3), \%$ , где  $C_1, C_2, C_3$  – содержание горючих компонентов в атмосфере аварийного участка по результатам анализа проб воздуха, %;  $L_1, L_2, L_3$  – соответственно нижние или верхние пределы взрываемости каждого компонента смеси, %.

Значения интервалов горючести (взрываемости) для некоторых газов приведены в табл. 1. В горных выработках угольных шахт доминируют метан, оксид углерода и водород.

Таблица 1

**Значения интервалов горючести газозвушных смесей [2]**

Газы	Границы области горючести, %	
	Нижняя, $L_n$	Верхняя, $L_v$
Водород	7,12	66,0
Оксид углерода	12,8	75,0
Метан	5,0	15,0
Пропан	2,4	9,5
Бутан	1,86	8,4
Пентан	1,45	6,5
Аммиак	15,5	27,0

Пиком воспламенения называют такую концентрацию смеси горючих газов, для предотвращения взрыва которой необходимо максимальное снижение содержания кислорода в атмосфере аварийного участка [1]. Координаты пика воспламенения газозвушных смесей определяют из следующих выражений:

$$Cre = \frac{100}{\frac{p_1}{L_1} + \frac{p_2}{L_2} + \frac{p_3}{L_3} + \dots + \frac{p_i}{L_i}}, \% \quad (2)$$

где:  $Cre$  – концентрация горючих газов в пике воспламеняемости, %:

$$p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i = 100, \%;$$

$$p_1 = \frac{C_1 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%; \quad p_2 = \frac{C_2 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%;$$

$$p_3 = \frac{C_3 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%; \quad p_i = \frac{C_i 100}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \%;$$

$$Coe = \frac{C_1 Coe_1 + C_2 Coe_2 + C_3 Coe_3 + \dots + C_i Coe_i}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_i}, \% \quad (3)$$

где:  $Coe_1, Coe_2, \dots, Coe_i$  – безопасное содержание кислорода в пике воспламенения каждого горючего газа при применении конкретного флегматизатора, %.

Таблица 2

Значения пиков воспламенения газозвушных смесей [1]

Горючие компоненты смеси	Пределы взрываемости, %		Пик воспламенения (%) при флегматизации:			
			азотом		диоксидом углерода	
	$L_n$ , нижний	$L_v$ , верхний	$Coe$ , по $O_2$	$Cre$ , по данному газу	$Coe$ , по $O_2$	$Cre$ , по данному газу
$CH_4$	4,3	13,5	10,2	13,5	13,5	5,75
$H_2$	4,0	75,0	5,0	5,9	5,9	5,00
CO	12,5	74,0	5,6	13,5	5,9	15,00

Сравнение данных таблиц 1 и 2 показывает, что в зависимости от условий проведения испытаний диапазоны взрывчатости смесей воздуха и горючих газов могут несколько смещаться. Так, согласно [1] интервал взрывчатых концентраций метана в воздухе составляет 4,3...13,5%, согласно [2] – 5,0...15,0 %, это же можно отметить и для других горючих газов. Можно утверждать, что такие разночтения незначительны и, в первом приближении ими можно пренебречь.

Таким образом, при наличии полученных в лабораторных условиях или с помощью полевого хроматографа типа «Поиск» результатов анализа газовых проб, существует техническая возможность, используя выражения (1-3), определить вершины треугольника взрываемости и оценить опасность взрыва газозвушной смеси в аварийных горных выработках.

В связи с поступлением на оснащение горноспасательных подразделений технических средств газового тушения подземных пожаров (например, мембранных газоразделительных установок) возникла необходимость скорректировать существующую методику оценки взрывчатости газозвушных смесей, учесть влияние инъекций флегматизаторов. Особенно важно иметь такую оценку при тушении пожаров способом изоляции в период закрытия проемов в изолирующих сооружениях, когда вследствие переходных вентиляционных процессов возможно образование взрывчатых облаков вблизи очага горения.

Для предотвращения осложнений пожара взрывом, нормативными документами предусмотрено заполнять изолируемый участок сети горных выработок парогазовой смесью, что довольно дорого, усложняет технологию аварийных работ и увеличивает их продолжительность. Зачастую производительности мембранных средств достаточно, чтобы обеспечить безопасные условия изоляции пожара, однако определить это не представляется возможным из-за отсутствия соответствующей методики.

Таким образом, для обеспечения безопасности аварийных работ актуальным является вопрос оценки взрывоопасности флегматизированных газоздушных смесей. В настоящей статье рассмотрены теоретические подходы к усовершенствованию методики оценки взрывчатости смесей воздуха, горючих газов и флегматизаторов.

Удобно рассматривать газовую смесь, образующуюся вблизи очага горения, как трехкомпонентную систему, которая состоит из: окислителя, горючего, флегматизатора. Окислителем является, как правило, кислород. Горючим – метан, оксид углерода, водород, их комбинированные смеси, а также добавки других горючих газов. Флегматизаторы – азот, диоксид углерода, водяной пар, их смеси. При этом компоненты системы находятся во взаимосвязи:

$$C_o + C_g + C_\phi = 100, \% \quad (4)$$

где  $C_o$ ,  $C_g$ ,  $C_\phi$  – соответственно суммарные концентрации окислителя, горючих и флегматизирующих газов, %.

Геометрически такую газовую трехкомпонентную систему можно представить в декартовой системе трех координат «окислитель–горючее–флегматизатор» как плоскость, пересекающую координатные оси в точках 100% (рис.1). Каждому сочетанию компонентов газовой смеси соответствует точка на этой плоскости. Область взрывчатых смесей заключена внутри треугольника  $L_n i, L_v i, E$ , где величины  $L_n i$  и  $L_v i$  соответственно нижний и верхний пределы взрываемости смеси горючего и кислорода,  $E$  – пик воспламенения. Эти значения известны по результатам лабораторных исследований смесей горючих газов [1,2].

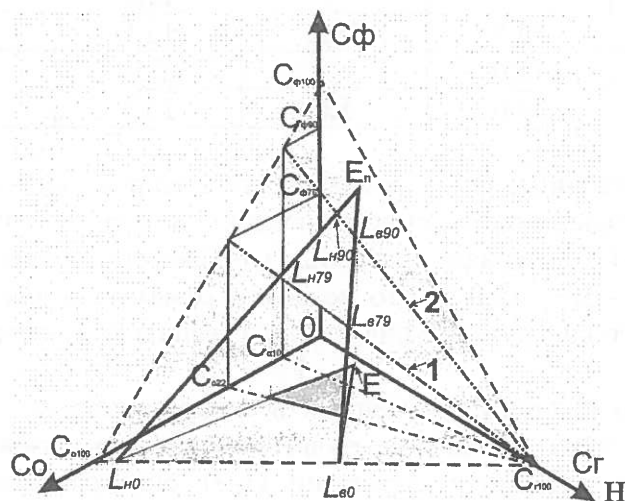


Рис.1. Схема определения области взрывчатости трехкомпонентных газовых смесей:

$C_{oi}$ ,  $C_{gi}$ ,  $C_{\phi i}$  – концентрации в составе смеси соответственно окислителя, флегматизатора, горючего;

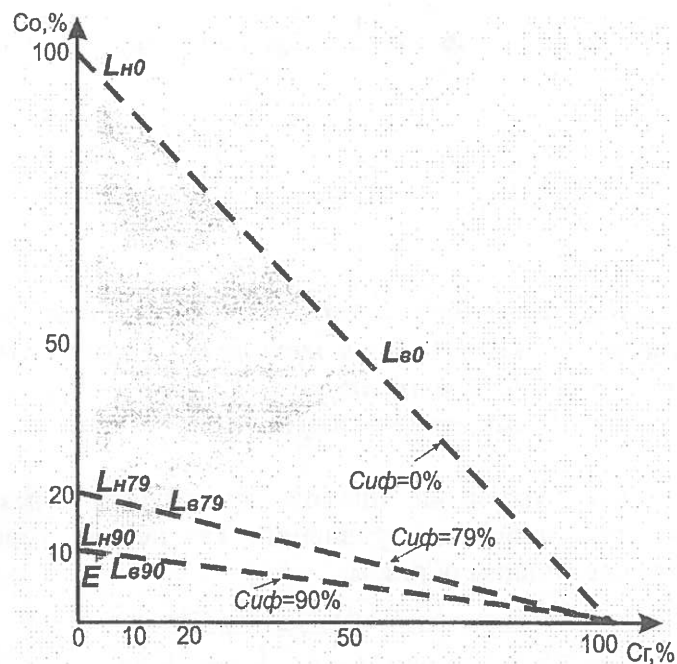
$L_{ni}$ ,  $L_{vi}$  – соответственно нижний и верхний пределы взрываемости газовой смеси, где  $i$  – процентное содержание флегматизатора в составе смеси;  $E_n$  – пик воспламеняемости смеси по кислороду;

1,2 – линии, характеризующие газовые среды с содержанием флегматизатора соответственно 79 и 90%.

Если к газокислородной смеси добавлять флегматизатор, то величина треугольника будет уменьшаться. Так для смесей с содержанием флегматизатора 79% (воздух) и 90% будут получены треугольники  $L_{n79}, L_{v79}, E_n$  (выделен цветом) и  $L_{n90}, L_{v90}, E_n$ . Динамика изменений

смесей окислителя и флегматизатора, при разбавлении их горючим может быть охарактеризована линиями  $C_{079} - L_{H79} - L_{B79} - C_{2100}$  и  $C_{090} - L_{H90} - L_{B90} - C_{2100}$  (см. рис.1). При этом внутри интервала  $L_{ni} - L_{vi}$  газовая смесь является взрывчатой. Традиционный треугольник взрываемости является проекцией построенного нами  $\Delta L_{ni}, L_{vi}, E_n$  на горизонтальную плоскость, координаты ее осей - «окислитель-горючее» (рис.2).

Анализируя характер изменения интервала взрывчатости смесей с различным содержанием флегматизирующих газов, следует отметить следующую важную особенность. С увеличением доли инертных газов в составе смеси интервал взрывчатости существенно сокращается. При этом нижний предел взрываемости изменяется медленно, динамика обусловлена изменением, в основном, верхнего предела.



**Рис.2. Диаграмма формирования взрывчатых газовых смесей при подаче флегматизаторов в аварийные горные выработки:**

*C<sub>иф</sub> – содержание флегматизирующих газов в составе подаваемого в выработки воздуха; остальные обозначения как на рис.1*

Динамика изменения составов подаваемых к очагу горения газовых смесей (изображены на рис. 2 пунктирными линиями), при выполнении условия (4), в общем виде могут быть представлены следующим уравнением:

$$\frac{Cr}{100} + \frac{Co}{100 - C_{иф}} = 1 \quad (5)$$

где  $Cr$ ,  $Co$ ,  $C_{иф}$  - содержание соответственно горючего, окислителя и флегматизатора в составе поступающей к очагу горения газовой смеси.

Однако пользоваться традиционной диаграммой для расчета взрывчатости флегматизированных смесей невозможно, так как при этом не соблюдается выражение (4). Для обоснования расчетного алгоритма следует рассмотреть представленный на рис.3 фрагмент  $\Delta L_{ni}, L_{vi}, E_n$  примыкающий к вершине  $E$  (см.рис.1).

Стороны треугольника  $\Delta L_{ni}, L_{vi}, E_n$  можно описать математическими зависимостями прямых линий, проходящих через две точки. Вместе с выражением (4) они образуют систему из линейных алгебраических уравнений с тремя неизвестными. Решение такой системы уравнений не вызывает существенных затруднений.

$$\begin{cases} \frac{C_G - C_{GH1}}{C_{GH2} - C_{GH1}} = \frac{C_O - C_{OH1}}{C_{OH2} - C_{OH1}} = \frac{C_\Phi - C_{\Phi H1}}{C_{\Phi H2} - C_{\Phi H1}} \\ \frac{C_G - C_{GB1}}{C_{GB2} - C_{GB1}} = \frac{C_O - C_{OB1}}{C_{OB2} - C_{OB1}} = \frac{C_\Phi - C_{\Phi B1}}{C_{\Phi B2} - C_{\Phi B1}} \\ \frac{C_G}{100} + \frac{C_O}{100} + \frac{C_\Phi}{100} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

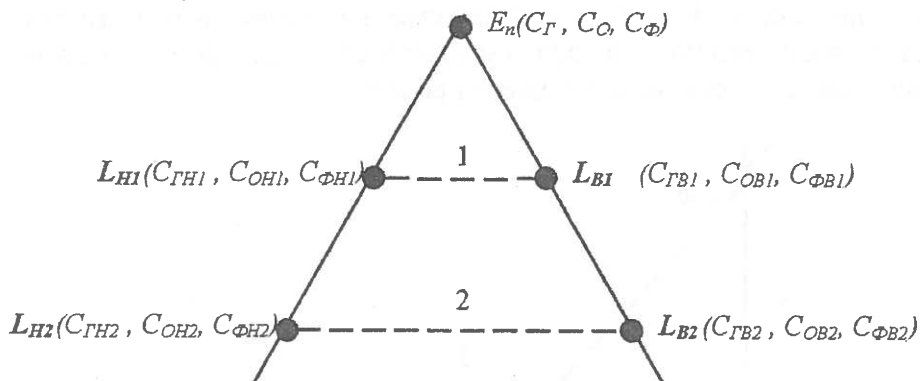


Рис.3. Фрагмент  $\Delta L_{H1}, L_{B1}, E_n$ ; 1,2 – отрезки, характеризующие диапазоны взрывчатости газовых смесей, имеющих нижние  $L_{H1}, L_{H2}$  и верхние  $L_{B1}, L_{B2}$  пределы взрываемости с соответствующими значениями концентраций горючего -  $C_{Г1}$ , окислителя -  $C_{О1}$ , флегматизатора -  $C_{Ф1}$

В свою очередь, каждое уравнение прямой, проходящей через две точки, можно преобразовать в систему двух линейных уравнений. Так первое выражение системы (6) может быть преобразовано следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{C_G - C_{GH1}}{C_{GH2} - C_{GH1}} = \frac{C_O - C_{OH1}}{C_{OH2} - C_{OH1}} = \frac{C_\Phi - C_{\Phi H1}}{C_{\Phi H2} - C_{\Phi H1}} = \\ = \begin{cases} (C_G - C_{GH1})(C_{OH2} - C_{OH1}) = (C_{GH2} - C_{GH1})(C_O - C_{OH1}) \\ (C_G - C_{GH1})(C_{\Phi H2} - C_{\Phi H1}) = (C_{GH2} - C_{GH1})(C_\Phi - C_{\Phi H1}) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

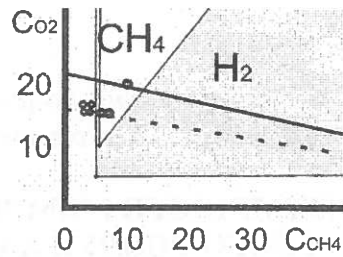
Аналогично второе выражение трансформируется:

$$\begin{aligned} \frac{C_G - C_{GB1}}{C_{GB2} - C_{GB1}} = \frac{C_O - C_{OB1}}{C_{OB2} - C_{OB1}} = \frac{C_\Phi - C_{\Phi B1}}{C_{\Phi B2} - C_{\Phi B1}} = \\ = \begin{cases} (C_G - C_{GB1})(C_{OB2} - C_{OB1}) = (C_{GB2} - C_{GB1})(C_O - C_{OB1}) \\ (C_G - C_{GB1})(C_{\Phi B2} - C_{\Phi B1}) = (C_{GB2} - C_{GB1})(C_\Phi - C_{\Phi B1}) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, решение задачи о взрывоопасных свойствах метановоздушной смеси сведено к определению координат концов и длины отрезков 1 или 2 (см. рис. 3), заключенных между линиями (7) и (8).

Для практической реализации системы уравнений (6) можно использовать известные из лабораторных исследований сведения о пике взрываемости - точка  $E_n$  (см. табл.2), верхнем и нижнем пределах взрываемости газовых комбинаций с воздухом (выражение 1 и табл.1).

Правильность теоретических результатов была проверена экспериментально в лаборатории научно-исследовательского института ВВУУ (Острава-Радванице, Чешская республика). На рис.4 изображены горизонтальная проекция теоретически определенного треугольника взрываемости смеси метана, кислорода и азота. Светлыми кружочками на ней обозначены результаты испытаний невзрывчатых, а затемненными - взрывчатых составов. Как следует из экспериментов, их результаты полностью совпали с теоретическими расчетами.



**Рис.4. Сопоставление теоретических и экспериментальных исследований:**  
 кружочки результаты воспламенения экспериментальных газовых составов, залиты теоретически  
 рассчитанные диаграммы смесей метана и водорода с кислородом и азотом; линии:  
 сплошная метановоздушная смесь, пунктир – кислород разбавлен азотом до 15...17%

Проведенные исследования позволили обосновать важный практический вывод. Нижний предел взрывчатости для всех видов горючих газов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ ) примерно одинаков, он находится на уровне 4...5%. Верхний - у  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  значительно, в 4...5 раз, выше чем у метана. Из этого следует парадоксальный вывод о том, что при высоком, более 15%, содержании в изолированном пространстве водорода ( $\text{H}_2$ ) и оксида углерода ( $\text{CO}$ ), сузить диапазон взрывчатости газовых смесей представляется возможным путем подачи за изолирующие сооружения метана, например из системы дегазации угольной шахты.

В итоге можно сделать вывод о том, что обоснованы теоретические подходы к усовершенствованию методики оценки взрывчатости смесей воздуха, горючих газов и флегматизаторов. Лабораторные эксперименты подтвердили правильность теоретических положений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шевцов Н. Р. Взрывозащита горных выработок / Н. Р. Шевцов // Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. Донецк: «Норд-пресс», 2002. – 280 с. ISBN 966-8085-140 / Шевцов Николай Романович/
2. Руководство по изоляции пожаров в шахтах опасных по газу / Утв. управлением ВГСЧ Минуглепрома СССР 18.11.1969. – М. : «Недра», 1977. – 216 с.

*В.К. Костенко, д.т.н., проф., Т.В. Костенко, Л. Штрох, Л. Мокош, М. Флейшингер*

#### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГАЗОВИХ ГОРЮЧИХ СУМІШЕЙ

Представлено теоретичне обґрунтування методики для визначення вибухових властивостей флегматизованих сумішей повітря і горючих газів

Ключові слова: флегматизовані суміші повітря, горючі гази

*V.K. Kostenko, Doctor of Science (Engineering), Professor, T.V. Kostenko, L. Shtrokh, L. Mokosh, M. Fleyshenher*

#### AN IMPROVEMENT OF ESTIMATION METHODS OF HIGHLY-EXPLOSIVE FEATURES OF GAS COMBUSTIBLE MIXTURES

The article deals with the theoretical methods for definition of combustible peculiarities of retarded mixtures of air and inflammable gases experimentally confirmed.

Key words: retarded mixtures of air, inflammable gases