

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

Факультет молекулярной и химической физики

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ШАХТНОГО ГАЗА

Миннуллина Гузель
3 курс, группа 643
г. Долгопрудный, 2019

Аннотация

Взрывы шахтного газа представляют серьезную угрозу безопасности в мировой горнодобывающей промышленности. На регулярной основе шахтеры должны получать пробы воздуха из подземной атмосферы, причем мониторинг и отслеживание проб воздуха должны быть своевременными, чтобы избежать возможных взрывов и пожаров. Все эти работы могут предоставить очень важную информацию, чтобы помочь операторам шахты хорошо понять атмосферное состояние шахты и ее тенденции. Кроме того, при столкновении с самовозгоранием угля, событиями, связанными с горением или другими химическими реакциями, связанными с авариями на шахтах, определение взрывоопасности является, безусловно, важной работой для безопасности шахтеров и персонала по спасению в шахтах, особенно при планировании и реализации любых стратегий по спасению шахт. В течение многих лет горные инженеры и исследователи разработали ряд методов для оценки взрывоопасности воздушно-газовой смеси. Результаты их исследований служат основой для оценки взрывоопасности шахтного газа и определения степени изменений. В этой статье представлены и рассмотрены основные популярные и типичные методы, используемые в горнодобывающей промышленности для определения взрывоопасности шахтного газа. Также показаны примеры для каждого метода, которые можно использовать, чтобы научить читателей понимать, как их применять. Наконец, краткое обсуждение существующих методов представлено и некоторые предварительные предложения также перечислены для дальнейших улучшений в будущих исследованиях.

1 Введение

Взрывы шахтного газа представляют серьезную угрозу безопасности в горнодобывающей промышленности. Они не только приводят к гибели людей, но и приносят производственные потери и огромные финансовые трудности для горнодобывающих компаний. 19 марта 2007 года на шахте "Ульяновская" у города Новокузнецк в результате взрывов метановоздушной смеси и угольной пыли погибли 110 человек. 25 февраля 2016 года на шахте "Северная" рядом с городом Воркута на глубине 780 м произошел внезапный выброс метана и два взрыва, повлекшие обрушение породы. В этот момент под землей находились 111 человек. 9 февраля 2005 года в результате взрыва метановоздушной смеси на шахте "Есаульская" в Кемеровской области погибли 25 человек - 8 горняков и 17 горноспасателей; тела троих погибших так и не были найдены. Авария произошла во время ликвидации пожара в отработанной части пласта, когда резко повысилась концентрация метана. В ходе расследования выяснилось, что штаб по ликвидации пожара пользовался недостоверными сведениями при расчете безопасного расстояния для работы спасателей.

Согласно статистическим данным от Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны в угольной промышленности основные предпосылки возникновения ЧС обусловлены высокой концентрацией газов и нарушением систем пылевзрывозащиты в шахтах, незначительными пространствами горных выработок в местах проведения работ. При таких условиях высока вероятность образования пожаро-, взрывоопасной концентрации пылегазовой смеси вследствие нарушения проветриваемости горных выработок и нарушения систем пылевзрывозащиты, кото-

рая может привести к взрыву и пожару в подземных выработках. Различные внешние или внутренние факторы, как изменения атмосферного давления, низкотемпературное окисление угля, могут также влиять на составы в герметичной зоне шахты, в объеме, регулируемом граничными условиями. Они могут вызывать массовые обмены между герметичной зоной и активными выработками, которые могут создавать взрывоопасную смесь газов, вызывающих усиление минных пожаров. Следовательно, в нормальных условиях добычи на угольном месторождении взрывоопасность атмосферы шахты, особенно для запечатанного участка, должна постоянно контролироваться. Необходимо тщательно следить за критическим временем, когда успевают накопиться метан или другие горючие газы, способные вызвать потенциальный взрыв. Срочно необходимо выполнять соответствующее принудительное управление в таких обстоятельствах, чтобы избежать несчастных случаев. Кроме того, при возникновении аварии на шахте определение взрывоопасности также является важной работой по планированию или реализации любых стратегий по спасению шахты или мер по ликвидации последствий аварии.

Фундаментальные исследования взрываемости газовых смесей проводились многими исследователями. Кондо, Такидзава, Такахаша и Токухаси (2006) разработали расширенное уравнение Ле-Шателье для калибровки пределов воспламеняемости топливных смесей с учетом эффектов разбавления углекислым газом. Кондо, Такидзава, Такахаша, Токухаси и Секия (2008) также изменили уравнение Ле-Шателье для калибровки пределов воспламенения для топливных смесей, когда азот используется в качестве единственного инертного газа. Наряду с этим был проведен ряд исследований, описывающих влияние давления окружающей среды на пределы воспламеняемости органических газов, в которых предлагается ряд подходящих уравнений для идентификации их взаимосвязей. Температура, как еще один важный параметр окружающей среды, также оказывает большое влияние на пределы воспламеняемости. Кроме того, исследователи применяют эти рекомендации для определения взрывоопасности шахтного газа. Джейкобс и Портер (1998) предложили свои алгоритмы для создания контрольной диаграммы, отображающей изменения в процентах горючих веществ, нижних и верхних пределов взрываемости в текущей атмосфере, которые можно применить к практическим проблемам в отрасли.

2 Методы определения взрывоопасности атмосферы шахты

В закрытой зоне шахты составляют атмосферу закрытой шахты газы, выбрасываемые из исходных угольных пластов, таких как CH_4 , CO_2 , H_2 . Метан является горючим газом в подземной атмосфере, а также представляет собой наиболее высокую опасность при подземной добыче существующих осадочных минералов, таких как уголь, троны, калий, известняк, сланец и соль. Метан имеет взрывоопасный диапазон от 5% до 15%, а при концентрации 9,5% происходит наиболее сильный взрыв. Другие подземные газы являются в основном побочными продуктами процесса углеобразования, это продукты химических реакций в подземной шахте, включая низкотемпературное окисление угля, сгорание или взрывы газа. Большинство из них представляют собой углеводородные газы ряда алканов (C_nH_{2n+2}), алкенов (C_nH_{2n}) или алкинов (C_nH_{2n-2}). Следующие атмосферные газы могут быть найдены в пробе окружающего воздуха. Почти 99% из них состоят из азота и кислорода, в остат-

ках очень мало аргона и углекислого газа. Последний инертный газ, N_2 или CO_2 , впрыскиваемый в герметичный объем для тушения пожаров на шахте или сведения к минимуму риска потенциальных взрывов. Как правило, так называемый шахтный газ на самом деле представляет собой смесь вышеуказанных газов. В следующих разделах будут обсуждаться методы определения взрывоопасности шахтного газа.

2.1 Третичная диаграмма

Чтобы представить различные комбинации трех газовых составов, была разработана третичная диаграмма для оказания помощи в графической демонстрации. Дунайер и соавторы (2003) представили диаграмму для определения взрывоопасности топливно-воздушно-инертных смесей. На Рис.9 а) показана третичная диаграмма со смесью водорода, кислорода и азота. Верхняя вершина диаграммы представляет 100% водорода, а основание треугольника представляет 0% водорода, так же как кислород и азот. Следовательно, диаграмма может использоваться для представления любого соотношения водорода, кислорода и азота в условиях окружающей среды. Например, представляет 30% водорода. То же самое для линии *B* (30% кислорода) или линии *C* (30% азота). Соответственно, примерная точка *D* на линии *A* состоит из 30% водорода, 27% кислорода и 43% азота, а точка *E* может рассматриваться как чистый воздух (0% водорода, 21% кислорода и 79% азота).

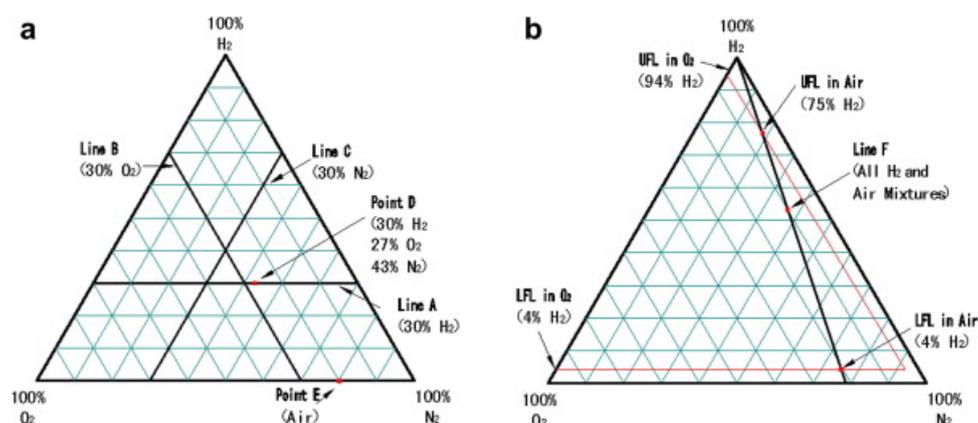


Рис. 1: Третичная диаграмма для водорода, кислорода и азота:
а) - без огнеопасной оболочки, б) - с огнеопасной оболочкой.

На Рис. 9 б) представлена полная третичная диаграмма для смеси водорода, кислорода и азота, включая огнеопасную оболочку для условий окружающей среды. Если образец газа находится внутри оболочки, это означает, что он взрывоопасен. Взрывы могут иметь место после того, как возникает пламя. Линия *F* проходит от воздуха (точка *E* на Рис.9 а) до 100% водорода, и поэтому любая смесь водорода и воздуха в отдельности должна лежать на линии *F*. Две точки пересечения, которые образованы линией *F* и огнеопасная оболочка, фактически нижний предел воспламенения (НПВ) и верхний предел воспламенения (ВПВ) для водорода в воздухе, соответственно.

Очевидно, что самый большой недостаток третичной диаграммы состоит в том, что она может иметь дело только с газовой смесью максимум из трех газов. Однако,

как и в предыдущем утверждении, в реальной атмосфере шахты существует множество горючих газов. Следовательно, третичная диаграмма не является совершенным и точным методом определения взрывоопасности шахтного газа из-за данного ограничения. Кроме того, создание огнеопасной огибающей на диаграмме также является трудоемкой и сложной работой, необходимо провести много экспериментов или теоретических расчетов для определения огибающей перед использованием.

2.2 Метод Ле Шателье

Границы легковоспламеняющихся сложных газов, которые представляют собой смесь нескольких горючих газов, могут быть определены с помощью правила Ле Шателье. Это правило основано на предположении, что отдельные легковоспламеняющиеся композиции не вступают в реакцию с другими и не оказывают каталитического влияния друг на друга.

Для смесей сложных газов с воздухом и инертными разбавителями необходимо учитывать влияние отношения инертного газа к горючему газу на пределы воспламеняемости. На Рис.2 показаны эти пределы для водорода, оксида углерода и метана, разбавленных азотом или углекислым газом при смешивании с воздухом. Верхний и нижний пределы смесей сложных газов с инертными газами разбиты на более простые смеси, каждая из которых содержит только один легковоспламеняющийся газ. Смесей определяются по графикам, подобным Рис.2. P_n - объемный процент рассеченных смесей, N_n - предел воспламенения для каждой рассеченной смеси и результирующий предел воспламеняемости L для всех смесей сложных и инертных газов при смешивании с воздухом можно рассчитать также на основе принципов Ле Шателье:

$$L = \frac{100}{\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \dots + \frac{P_n}{N_n}} \quad (1)$$

Этот метод показал достаточную точность для смесей водорода, монооксида углерода и метана с азотом и диоксидом углерода и поэтому может использоваться для горючих газов.

2.2.1 Пример 1

Образец, взятый из запечатанного участка, дает состав смеси следующим образом: CH_4 (10%), CO_2 (5%), N_2 (75%), O_2 (10%). Проведем анализ взрывоопасности газовой смеси.

- Рассчитаем избыток азота:

$$P_{N_2} - \left(\frac{79.04}{20.93} \times P_{O_2} \right) = 75\% - \left(\frac{79.04}{20.93} \times 10\% \right) = 37\% \quad (2)$$

Где P_{N_2} и P_{O_2} - объемные проценты для азота и кислорода соответственно.

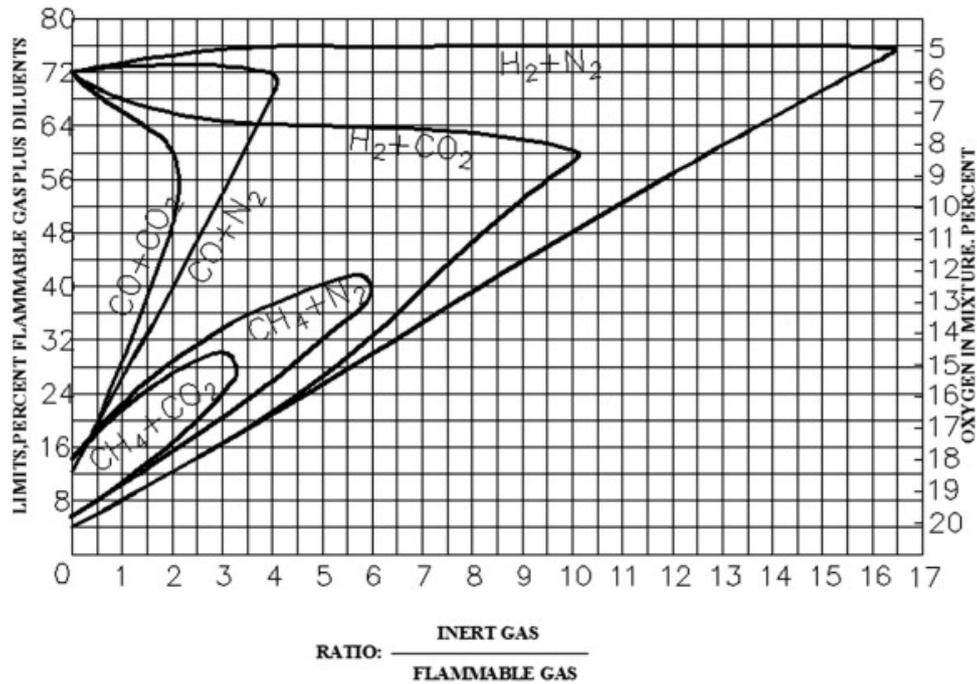


Рис. 2: Пределы воспламеняемости водорода, окиси углерода и метана, содержащих различные количества углекислого газа и азота.

- Разделим горючие газы с инертными газами на компоненты (Таблица1): 3.

Таблица 1: Простые смеси.

	Первая группа	Вторая группа
Горючий газ	CH_4 10%	CO 5%
Избыток азота	N_2 20%	N_2 17%
	Воздух	Воздух
	$\frac{P_{V_i}}{V_c} = 2$	$\frac{V_i}{V_c} = 3.4$.

Где P_i и P_c - объемные проценты для горючих и инертных газов соответственно.

- Определим «мнимые» объемные проценты воздуха, необходимые для достижения и для групп газовых смесей.

Для группы 1 пределы воспламеняемости можно определить, как показано на Рис.2. НПВ($CH_4 + N_2$) = 16% и ВПВ($CH_4 + N_2$) = 29,5%

$$0.16 = \frac{P_c + P_i}{P_c + P_i + P_{AL}} = \frac{10 + 20}{10 + 20 + P_{AL}} \quad (3)$$

$$0.295 = \frac{P_c + P_i}{P_c + P_i + P_{AU}} = \frac{10 + 20}{10 + 20 + P_{AU}} \quad (4)$$

Где P_{AL} и P_{AU} - это «воображаемые» объемные проценты воздуха, необходимые для достижения НПВ и ВПВ соответственно. После расчетов $P_{AL} = 157,5\%$ и $P_{AU} = 71,7\%$.

Для группы 2 может применяться та же процедура, поэтому: $НПВ(CO + N_2) = 60\%$ и $ВПВ(CO + N_2) = 73\%$

$$0.6 = \frac{P_c + P_i}{P_c + P_i + P_{AL}} = \frac{5 + 17}{5 + 17 + P_{AL}} \quad (5)$$

$$0.73 = \frac{P_v + P_i}{P_c + P_i + P_{AU}} = \frac{5 + 17}{5 + 17 + P_{AU}} \quad (6)$$

После расчетов $P_{AL} = 14,7\%$ и $P_{AU} = 8,137\%$.

- Определим общий «мнимый» объемный процент необходимого воздуха:

$$\sum P_{AL} = 157.5\% + 14.7\% = 172.2\% \quad (7)$$

$$\sum P_{AU} = 71.7\% + 8.137\% = 79.8\% \quad (8)$$

- Нормализуем и определим $ВПВ(UFL)$ и $НПВ(LFL)$ для газовой смеси:

$$\sum (P_C + P_i) = 10\% + 5\% + 37\% = 52\% \quad (9)$$

$$\sum (P_C + P_i) + \sum P_{AL} = 52\% + 172.2\% = 224.2\% \quad (10)$$

$$LFL = \frac{\sum (P_C + P_i)}{\sum (P_C + P_i) + \sum P_{AL}} = \frac{52\%}{224.2\%} = 23.2\% \quad (11)$$

$$\sum (P_C + P_i) + \sum P_{AU} = 52\% + 79.8\% = 131.8\% \quad (12)$$

$$LFL = \frac{\sum (P_C + P_i)}{\sum (P_C + P_i) + \sum P_{AU}} = \frac{52\%}{131.8\%} = 39.4\% \quad (13)$$

Общее количество горючего газа составляет 15% ($CH_4 + CO$), и он находится вне пределов взрывоопасности ($23,2-39,4\%$). Поэтому образец газовой смеси можно считать невзрывоопасным.

2.3 Анализ максимально допустимого содержания кислорода (МДСК)

Количество кислорода, необходимое для распространения пламени (поэтому максимально допустимое), зависит от относительного количества метана, окиси углерода и водорода в зоне пожара на шахте. Когда концентрация кислорода в смеси ниже указанного максимального значения кислорода, смесь не является взрывоопасной (Забетакси, Шталь и Уотсон, 1959). Следовательно, анализ максимально допустимого содержания кислорода может быть использован для анализа состояния шахтной атмосферы.

Чтобы использовать этот метод, соотношение R должно быть рассчитано с использованием следующего уравнения:

$$R = \frac{P_{CH_4}}{P_{CH_4} + P_{H_2} + P_{CO}} \quad (14)$$

Где P_{CH_4} , P_{H_2} и P_{CO} - объемные доли CH_4 , H_2 и CO .

Затем значение максимально допустимое содержание кислорода (обозначим буквой M) может быть определено на основе соответствующего значения R со ссылкой на Рис.3 или с помощью вычисления следующего уравнения:

$$M = 5.0 + 7.0R \quad (15)$$

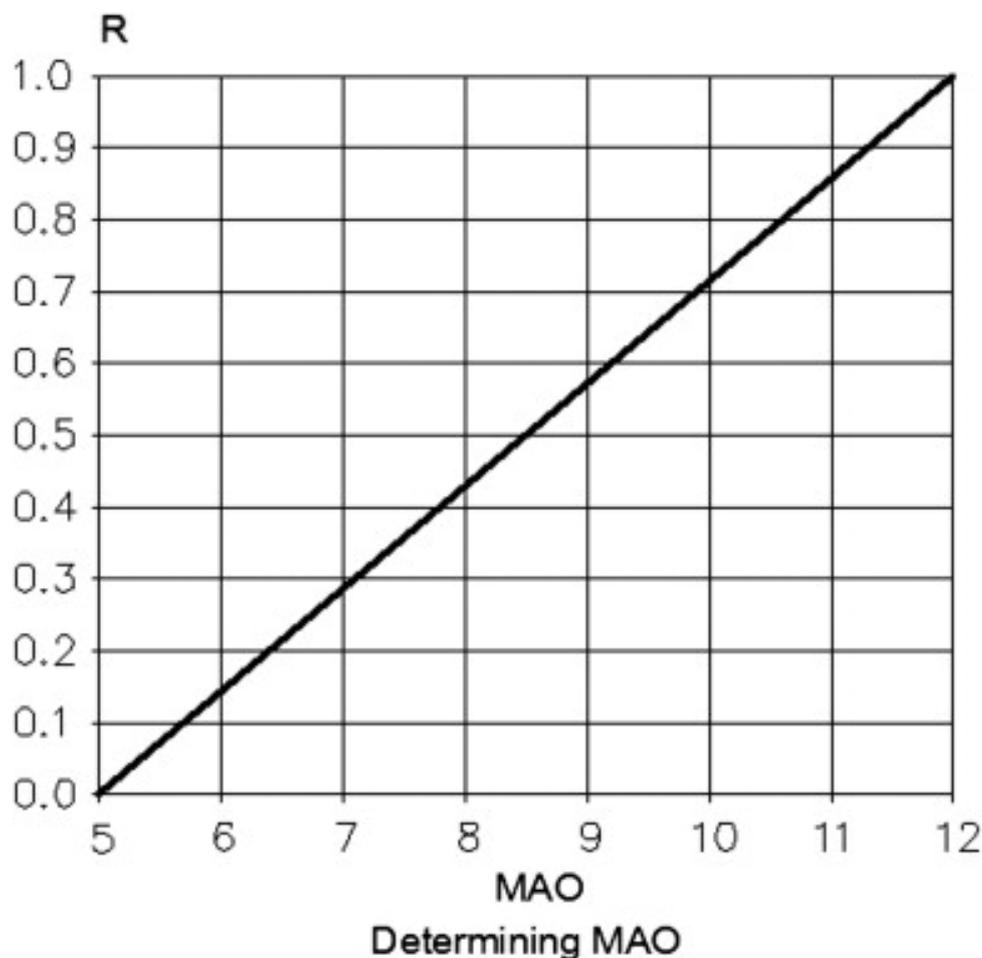


Рис. 3: Диаграмма взрывоопасности для смесей метан-азот-воздух при 25 °С и атмосферном давлении.

Если фактическая измеренная концентрация кислорода меньше значения M , атмосфера не может воспламениться в своем нынешнем состоянии. И наоборот, это может быть взрывоопасно. Анализ значения M предоставляет простой и простой способ оценить состояние герметичной атмосферы. Но, как уже говорилось ранее, недостаток заключается в сложности определения того, является ли атмосфера взрывоопасной, если измеренное значение кислорода больше, чем значение M . Поэтому, когда используется только значение M , шахтеры должны уделять больше внимания полученным результатам, поскольку невзрывоопасная атмосфера может стать взрывоопасной при смешивании с воздухом. В таких условиях настоятельно рекомендуется использовать другие методы взрываемости для проведения комплексного анализа.

Другой альтернативный метод для вычисления значения максимально допустимого количества кислорода был откалиброван двумя китайскими исследователями. Их уравнение может учитывать более горючие газы. Соответственно, результаты являются более точными (Лу Хан, 1991).

$$M = \frac{12 \times P_{\text{CH}_4} + 6 \times P_{\text{CO}} + 5 \times (P_{\text{H}_2} + P_{\text{C}_m\text{H}_n})}{P_T} \quad (16)$$

Где P_T - общее процентное содержание горючего газа, а C_mH_n обозначает различные

углеводородные газы.

2.3.1 Пример 2

Используем данные из первого примера для определения состояния атмосферы. Нужное значение R можно рассчитать как:

$$R = \frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{CH}_4} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{CO}}} = \frac{10}{10 + 5} = 0.67 \quad (17)$$

И значение M определяется из рис. 3 или уравнения. (15) это:

$$M = 5.0 + 7.0R = 5.0 + 7.0 \times 0.67 = 9.7 \quad (18)$$

Поскольку концентрация кислорода составляет 10%, а она больше 9,7%, следует использовать другие методы взрываемости, чтобы помочь в результате анализа допустимого значения количества кислорода.

2.4 Диаграмма взрываемости

Забетакси представила упрощенный графический метод определения взрывоопасности шахтных атмосфер в условиях шахтных пожаров по данным о составе атмосферы. (Забетакси и др., 1959). Этот метод также называется диаграммой взрываемости. Это популярный метод, широко используемый в горнодобывающей промышленности с зарубежных странах.

На Рис.4 приведена схема, разработанная Забетакси. Эта диаграмма показывает, что смесь метан-воздух-инертный газ подпадает под одну из трех категорий: (A) взрывоопасная, (B) взрывоопасная при смешивании с воздухом или (C) невзрывоопасная, в зависимости от процентного содержания метана и процентного содержания «эффективного инертного материала». (Киссел, 2006) . Эффективный инертный материал может быть получен из процентного содержания избыточного азота и диоксида углерода. Стрелки на диаграммах означают, как движется точка композиции, если добавить больше метана, воздуха или инертного газа. Это простой метод определения взрывоопасности смеси газов. Вкратце, диаграмма взрываемости для определения взрывоопасности шахтного газа может включать следующие этапы.

Нужно проанализировать атмосферу шахты, определить процентное содержание по объему двуоксида углерода (CO_2), кислорода (O_2), оксида углерода ((1)) (CO), метана (CH_4), водорода (H_2) и азота (N_2).

• Далее следует вычислить процент избытка азота (E_{N_2}) и "эффективный инертный материал" (E_{Inert}) следующим образом:

$$E_{N_2} = P_{N_2} \text{ in sample} - P_{N_2} \text{ in normal air} \quad (19)$$

Где:

$$P_{N_2} \text{ in sample} = 100\% - (P_{CO_2} + P_{O_2} + P_{CO} + P_{CH_4} + P_{H_2}) \quad (20)$$

$$P_{N_2} \text{ in normal air} = 100\% - 3.8 \times P_{O_2} \text{ in sample} \quad (21)$$

(Коэффициент 3,8 представляет собой объемное отношение N_2 к O_2 в нормальном воздухе).

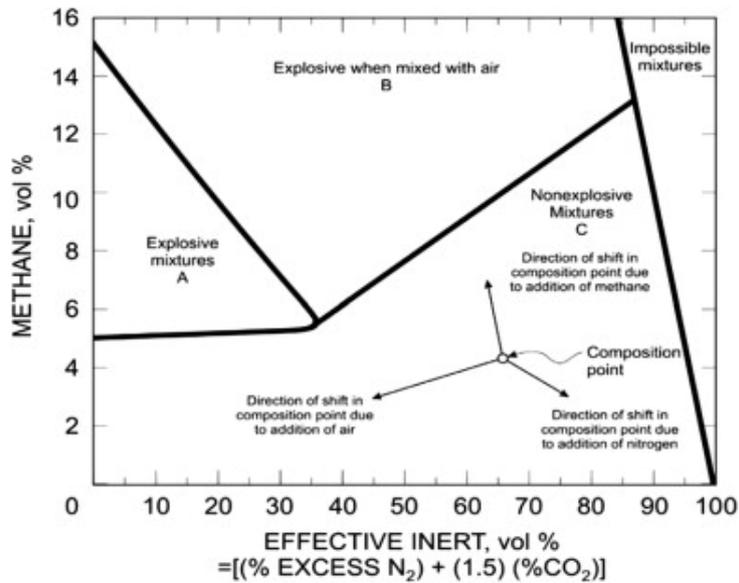


Рис. 4: Диаграмма взрывоопасности для смесей метан-азот-воздух при 25 °C и атмосферном давлении.

$$E_{N_2} = P_{N_2} \text{ in sample} - P_{N_2} \text{ in normal air} \quad (22)$$

- Рассчитать процент эффективного горючего ($E_{Combustible}$) следующим образом:

$$E_{Combustible} = CH_4\% + 1.25 \times H_2\% + 0.4 \times CO\% \quad (23)$$

(Коэффициенты 1,25 и 0,4 являются соотношениями нижних пределов взрываемости CH_4 и H_2 и CO).

- Рассчитайте значение R, чтобы определить кривую взрываемости, которая будет использоваться на Рис.5.

$$R = \frac{P_{CH_4}}{P_{CH_4} + P_{H_2} + P_{CO}} \quad (24)$$

Затем на основе выбранного треугольника взрываемости и положения точки газовой смеси (координируемой процентами эффективного горючего и эффективного инертного вещества) можно определить статус взрываемости.

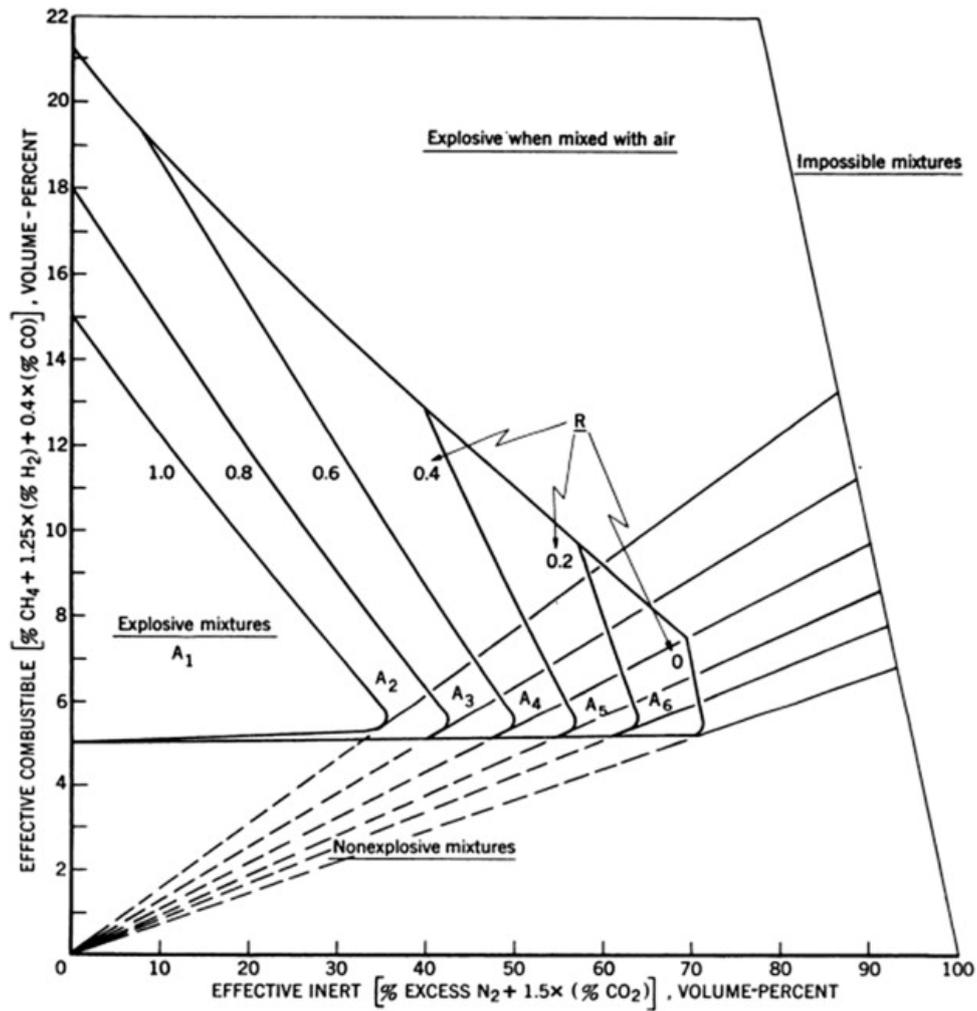


Рис. 5: Диаграмма взрывоопасности для смесей метан-водород-азот-монооксид углерода-диоксид углерода-воздух при 25 °C и атмосферном давлении

2.4.1 Пример 3

Следующий анализ газа был получен после пожара на шахте: CH_4 (1,1%), CO (2,9%), N_2 (74,7%), O_2 (7,3%), H_2 (3,1%) и CO_2 (10,9%). После выполнения расчета диаграмма взрывоопасности может быть построена как на рис. 6.

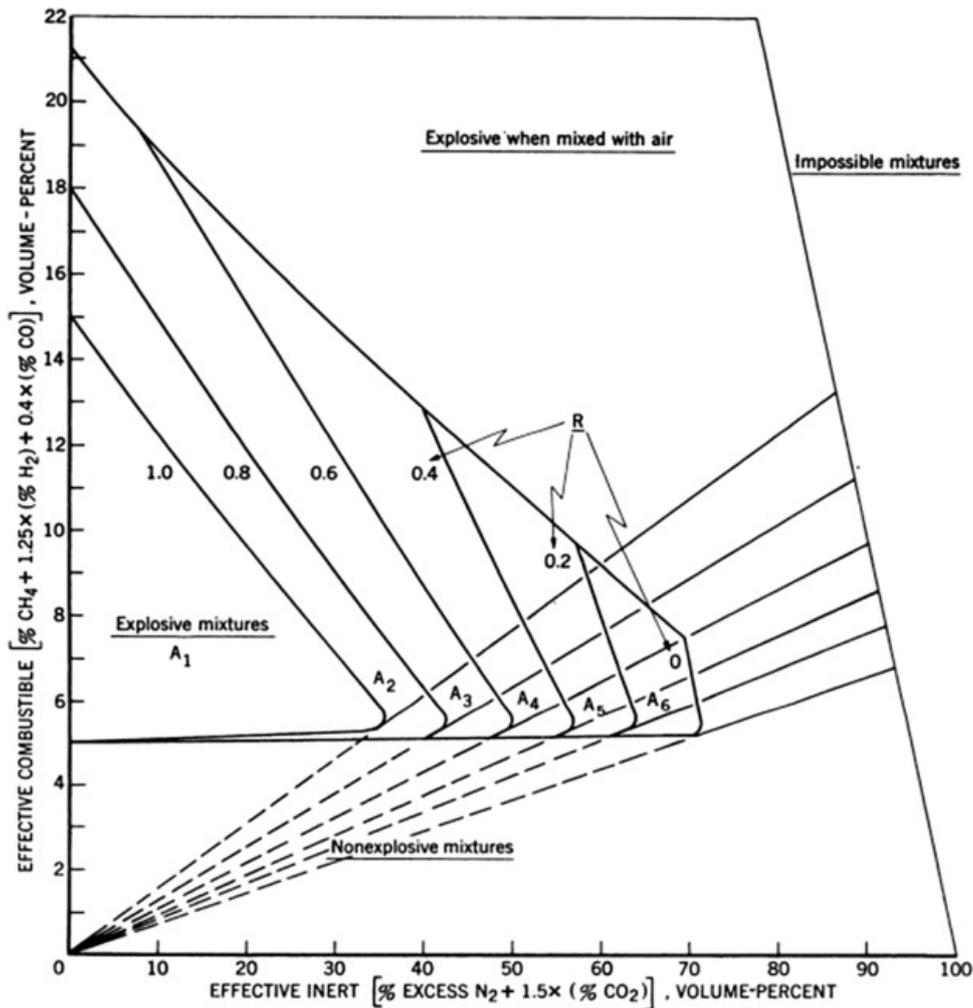


Рис. 6: Определение взрывоопасности методом диаграмм

Из Рис.6 видно, что точка состояния находится только во взрывоопасной области для кривой горючего горючего вещества 0,15 от общего количества метана. Поэтому его можно считать взрывоопасным. Добавление воздуха и горючего газа сохранит взрывоопасность газовой смеси; однако добавление инертного газа приведет к сдвигу точки во взрывоопасной зоне.

В последние годы был произведен ряд действий по расширению и калибровке метода диаграмм, в первоначальную версию было добавлено больше горючих газов. Уравнение (21) теперь пересматривается как:

$$E_{\text{Combustible}} = P_{\text{CH}_4} + 1.25 \times P_{\text{H}_2} + 0.4 \times P_{\text{CO}} + 0.6 \times P_{\text{C}_2\text{H}_6} + 0.5 \times P_{\text{C}_2\text{H}_4} \quad (25)$$

И уравнение вычисления R-значения (22) пересматривается как:

$$R = \frac{P_{\text{CH}_4}}{P_{\text{CH}_4} + P_{\text{H}_2} + P_{\text{CO}} + P_{\text{C}_2\text{H}_6} + P_{\text{C}_2\text{H}_4}} \quad (26)$$

Обратите внимание, что метод диаграмм недопустим, если $CO > 3,0\%$ и $H_2 > 5\%$.

2.5 Взрывоопасный треугольник

Взрывоопасный треугольник считается быстрым и простым способом определения взрывоопасности смеси воздуха и горючих газов. Он рассматривает только три горючих газа (CH_4 , CO и H_2). Когда три горючих газа смешиваются с обычным воздухом, взрывоопасность смеси зависит от процента горючих газов и кислорода. На Рис.6 показаны отдельные взрывчатые треугольники для трех горючих газов. Каждый из треугольников взрываемости определяется тремя характерными точками: нижним и верхним пределами взрываемости и предельным пределом минимальной концентрации кислорода для поддержки взрыва. Характерные точки для трех горючих газов перечислены в таблице 3. Треугольник взрываемости для горючего газа делит площадь участка на пять отличительных зон. Взяв газ в качестве примера на рис. 7, зона, расположенная над линией AE , является зоной, в которой невозможно сформировать газоздушную смесь. Область под линией AE является невзрывоопасной зоной, также известной как зона абсолютной безопасности. Треугольный COD - это зона с потенциалом взрыва. Смесь воздуха и газа в треугольнике AOC не взрывоопасна. Тем не менее, он может стать взрывоопасным, если будет добавлено больше CO . Зона $ODBE$ является невзрывоопасной, но может стать причиной появления большего количества свежего воздуха.

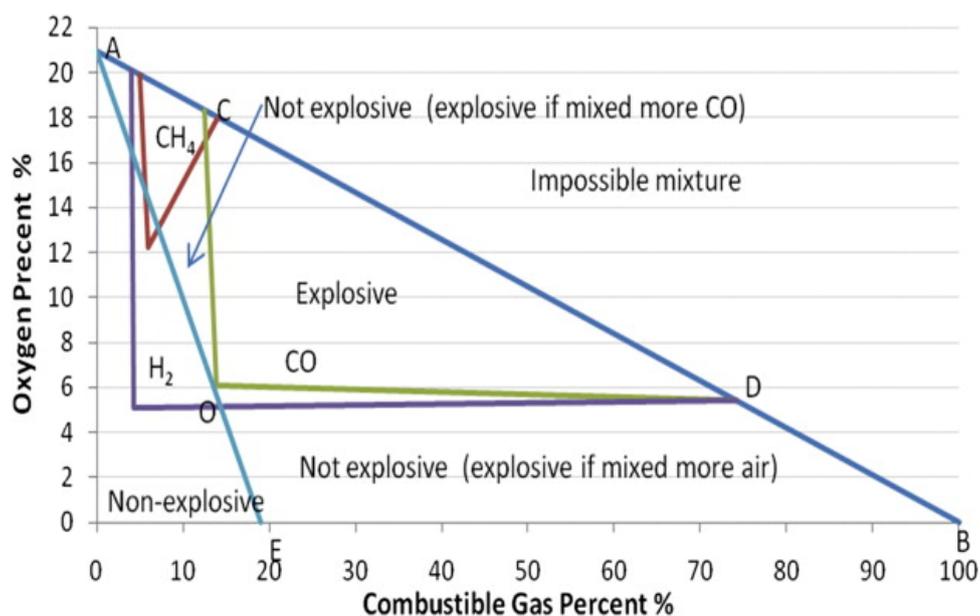


Рис. 7: Взрывоопасные треугольники для метана, окиси углерода и водорода.

3.

Таблица 2: Вершины взрывоопасных треугольников (проценты).

Газ	Нижний предел воспламенения	Верхний предел воспламенения	Вершина газа	Вершина O_2	N_2 для погаш. смеси $(N+m^3(N_2)m^3)$
CH_4	5.00	14.00	5.90	12.20	6.07
H_2	4.00	74.20	4.30	5.10	4.13
CO	12.50	74.20	13.8	6.10	16.59

Для этих трех горючих газов процедура генерации результирующего треугольника описывается следующим образом (Макферсон, 1993):

- Определим общий процент горючих веществ. Если объемные проценты трех горючих газов равны P_{CH_4} , P_{CO} и P_{H_2} , соответственно, общий процент горючих газов:

$$P_T = P_{CH_4} + P_{H_2} + P_{CO} \quad (27)$$

- Определить воспламеняемость газа.

Принцип Ле Шателье в форме уравнения (26) используется для определения верхней, нижней и чувствительной воспламеняемости смешанных газов. Чтобы применить это уравнение для нижнего предела взрываемости смеси (L_{mix}), нижние пределы трех газов заменяются в местах L_1 , L_2 и L_3 . То же самое можно сделать для верхнего и чувствительного пределов.

$$\frac{P_T}{L_{mix}} = \frac{P_{CH_4}}{L_{CH_4}} + \frac{P_{CO}}{L_{CO}} + \frac{P_{H_2}}{L_{H_2}} \quad (28)$$

- Определим необходимый избыток азота.

Эффективный способ превращения воздушно-газовой смеси в невзрывоопасный состоит в том, чтобы ввести избыточный объем азота (N_{ex}) в смесь, как показано в формуле. 27. В этом уравнении L_n - воспламеняемость в чувствительной зоне смешанных газов, N_+ - объемы избыточного азота, которые необходимо добавить для того, чтобы воспламеняющиеся газы погасли (коэффициент инертности). В таблице 2 также представлен избыточный азот, если содержание горючих веществ состоит только из одного газа.

$$N_{ex} = \frac{L_n}{P_T} \left(N_{CH_4}^+ P_{CH_4} + N_{CO}^+ P_{CO} + N_{H_2}^+ + P_{H_2} \right) \quad (29)$$

- Определим процентное содержание кислорода в пределе чувствительности (O_n).

$$O_n = 0.2093(100 - N_{ex} - L_n) \quad (30)$$

Используя данные, полученные из этих уравнений, можно построить треугольник взрываемости для газозвушной смеси, а точку состояния (т.е. концентрации кислорода и общих горючих газов) можно построить на той же диаграмме. Относительное положение между треугольником взрываемости и точкой состояния показывает состояние взрываемости газозвушной смеси в текущем состоянии и потенциал при изменении состояния.

2.6 Пример 4

Образец газа дает следующие составы: CH_4 (98%), CO (5%), N_2 (78%), O_2 (6%) и H_2 (3%). Следуя уравнению (25), (26), (27), (28), диаграмма взрывной способности строится как рисунок 8.

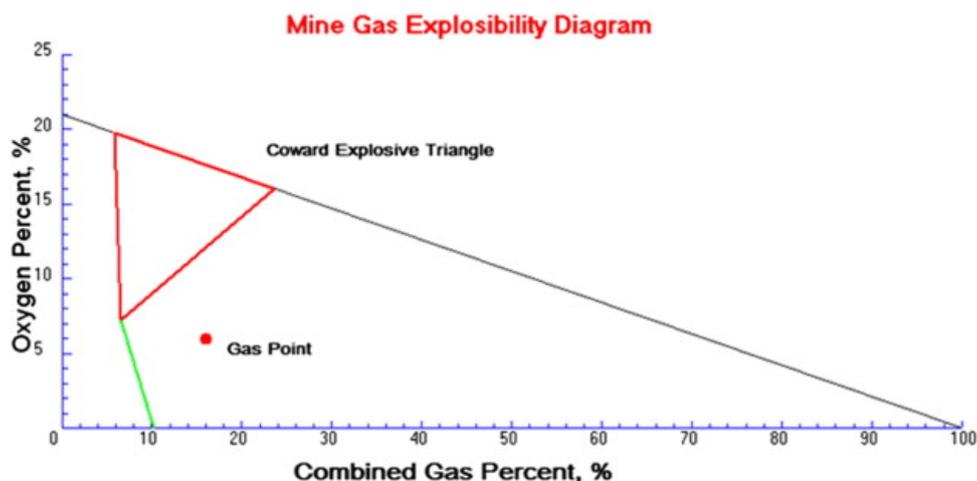


Рис. 8: Результат вычисления метода взрывного треугольника.

Фактическая точка газовой смеси находится вне взрывоопасного треугольника, и ее можно рассматривать как не взрывоопасную. Но диаграмма также показывает, что, хотя сейчас она не взрывоопасна, она станет взрывоопасной, если в зону попадет больше воздуха.

Следует отметить, что низкотемпературное окисление древесины и угля может происходить в закрытых областях. В таком случае различные углеводородные газы могут существовать в герметичном объеме, и их концентрация может быть даже выше, чем концентрации CO и H_2 . Из-за большого диапазона взрывоопасности для некоторых из этих углеводородных газов их присутствие может существенно изменить взрывоопасность смеси воздух-газ. Несмотря на то, что оригинальный метод треугольников имеет дело только с тремя типичными горючими газами (CH_4 и H_2), его можно легко расширить, включив в него больше горючих газов, если известны характерные точки этих горючих газов. Таким образом, метод треугольника для рисования треугольника взрываемости может быть расширен за счет включения этих общих горючих газов в дополнение к CH_4 и H_2 в его первоначальной форме. В горючих газах, связанных с пожаром на угольной шахте, к исходному методу треугольника могут быть добавлены три углеводородных газа: ацетилен (C_2H_2), этилен (C_2H_4) и этан (C_2H_6), чтобы результирующий треугольник взрываемости был более точным. Пределы воспламеняемости для дополнительных горючих газов приведены в Таблице 3.

Таблица 3: Вершины взрывоопасных треугольников (проценты).

Газ	Нижний предел воспламенения	Верхний предел воспламенения	Вершина газа	Вершина O_2	N_2 для погашения смеси ($(N+m^3(N_2)m^3)$)
C_2H_4	2.75	28.60	2.89	6.06	15.60
C_2H_6	3.00	12.50	3.12	8.41	12.80
C_2H_2	2.50	80.00	2.67	5.07	28.91

2.7 Метод Кукучки

Польский ученый Кукучка проанализировал состав газа угольной шахты и создал уникальный метод определения взрывоопасности. Основная идея этого метода заключается в преобразовании сложного горючего содержимого в один газ (CH_4) посредством математического преобразования для калибровки положения точки смеси газов. Затем, нанеся на одну и ту же диаграмму как взрывной треугольник CH_4 , так и точку состояния газовой смеси, относительное положение между треугольником и точкой может показать состояние взрываемости газовой смеси в текущем состоянии.

Процедура метода может быть описана следующим образом (Kukuczka, 1982, Yu, 1992):

- Определить взрывоопасный треугольник

В системе координат диаграммы взрываемости Кукучки ось X обозначает концентрацию метана, а ось Y обозначает концентрацию кислорода. В отличие от взрывного треугольника, взрывной треугольник в методе Кукучки является фиксированным и может быть определен тремя характерными точками: нижним пределом взрываемости (5,00, 19,88) и верхним пределом взрываемости (15,00, 17,79) и критическим предел (5.18, 9.47) для метана.

- Определить фактор влияния « α » для предела воспламенения из-за существующего углекислого газа

$$\alpha = \frac{P_{CO_2} - 0.03}{P_{CO_2} + P_{N_2} - 3.778 \times P_{O_2}} \quad (31)$$

- Определить общий процент горючих веществ.

$$P_T = P_{CH_4} + P_{CO} + P_{H_2} + P_{C_2H_2} + P_{C_2H_4} + P_{C_2H_6} + P_{C_3H_6} + P_{C_3H_8} \quad (32)$$

- Определить фактор влияния « β » для каждого горючего газа из-за существующего углекислого газа

$$\beta_i = \frac{20.93 - (P_{O_2} + 0.2093P_T)}{a_i - b_i\alpha} \quad (33)$$

Примечание. Если значение « β » превышает 1, оно должно быть сброшено как 1.

- Определить положение фактической точки смешанного газа

Ур. (31) может использоваться для вычисления координат X (процентное содержание горючего газа)

$$X = \sum_{i=1}^n (c_i + d_i P_T + e_i P_{O_2} + \alpha \beta_i f_i) \times \frac{P_i}{P_T} \quad (34)$$

Ур. (32) может использоваться для вычисления координат Y (процентное содержание кислорода)

$$Y = \sum_{i=1}^n (c'_i + d'_i P_T + e'_i P_{O_2} + \alpha \beta_i f'_i) \times \frac{P_i}{P_T} \quad (35)$$

Где P_i - это объемный процент определенного горючего газа, $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, c'_i, d'_i, e'_i, f'_i$ - соответствующие коэффициенты для разных горючих газов и их значения приведены в таблице 5.

	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	c'_i	d'_i	e'_i	f'_i
Methane (CH_4)	10.376	3.016	0	1	0	-0.78	0	0	1	-2.852
Hydrogen (H_2)	14.918	3.533	4.643	0.140	-0.010	-0.107	5.401	0.116	0.698	-2.435
Carbon monoxide (CO)	13.039	3.396	3.117	0.161	-0.007	-0.400	3.622	0.133	0.797	-2.619
Ethylene (C_2H_4)	14.269	3.526	4.121	0.385	-0.009	-0.216	4.849	0.072	0.729	-2.519
Ethane (C_2H_6)	11.872	2.909	1.937	1.052	-0.005	-0.724	2.233	-0.037	0.875	-2.391
Propene (C_3H_6)	12.869	3.383	2.934	1.098	-0.006	-0.429	3.442	-0.061	0.808	-2.637
propane (C_3H_8)	12.105	3.294	2.164	1.382	-0.005	-0.538	2.537	-0.110	0.858	-2.710
Acetylene (C_2H_2)	15.308	3.577	4.901	0.127	-0.011	-0.045	5.719	0.115	0.680	-2.415

Рис. 9: Значения разных коэффициентов.

Относительное положение между взрывным треугольником и точкой состояния показывает состояние взрываемости газозвушной смеси в текущем состоянии и потенциал при изменении условий.

2.8 Пример 5

Образец газа дает следующие составы: CH_4 (4,50%), CO (1,00%), C_2H_4 (0,30%), C_2H_6 (0,05%), C_3H_6 (0,00%), C_3H_8 (0,00%); C_4H_{10} (0,00%), C_2H_2 (0,00%), N_2 (65,25%), O_2 (9,00%), H_2 (0,70%) и CO_2 (19,20%) в соответствии с уравнениями. (29), (30), (31), (32), (33), диаграмма Кукучки изображена на рис. 9.

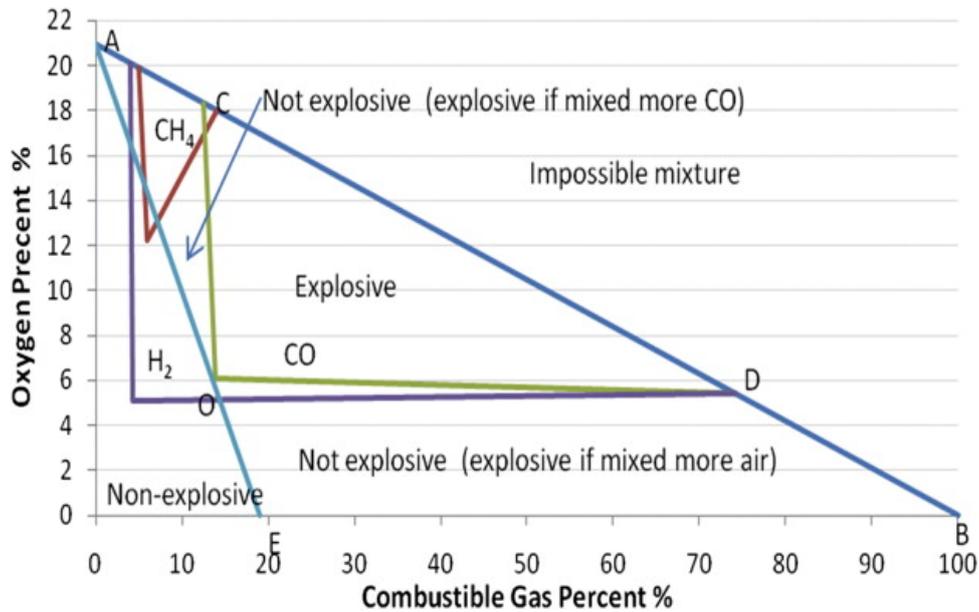


Рис. 10: Результат расчета по методу Кукучки.

Пробу газа можно считать невзрывоопасной, но она станет взрывоопасной, если будет добавлено больше свежего воздуха.

3 Обсуждение

Ввиду важности проблемы безопасности, определение взрывоопасности шахтного газа должно быть очень тщательно рассчитано. Только на основании результатов расчета и других соображений может быть установлено и выполнено любое другое управление. Поэтому настоятельно рекомендуется использовать более двух или более методов при анализе взрываемости шахтного газа, чтобы избежать возможных проблем (недостаточной точности и т. д.) При использовании только одного метода. Всесторонний анализ должен быть проведен до начала любых операций, особенно для планирования и реализации стратегии спасения шахты при возникновении любых химических реакций, связанных с авариями на шахте (пожар на шахте, взрыв газа, взрыв пыли и т. д.).

Изучив все известные методы определения взрывоопасности шахтного газа, можно обнаружить, что каждый из этих методов имеет как преимущества, так и недостатки. Например, третичная диаграмма может иметь дело только с тремя газами. Следовательно, определение взрывоопасности газовой смеси, состоящей из нескольких горючих газов, будет затруднительным при использовании этого метода. По сравнению с этим, метод диаграмм, взрывной треугольник Трюда и метод Кукучки преодолели этот недостаток. Они легко справляются с взрывоопасностью, связанной с различными горючими газами. Среди этих трех методов метод треугольника является наиболее простым методом расширения, если известны характерные точки (НПВ, ВПВ и предел чувствительности) других горючих газов. Другим может потребоваться больше времени для проведения экспериментов по определению необходимых параметров. Для анализа допустимых значений количества кислорода, как упоминалось ранее, если измеренное значение кислорода меньше значения допустимого

значения количества кислорода, оно может окончательно считаться невзрывоопасным (абсолютная безопасность). Однако трудно сказать, что атмосфера находится в невзрывоопасном или взрывоопасном состоянии, когда измеренная концентрация кислорода превышает значение максимально допустимого количества кислорода. Таким образом, другие методы взрываемости должны использоваться одновременно для двойной проверки результатов. Для пересмотренного метода Ле Шателье важной и фундаментальной работой является график пределов воспламеняемости для водорода, окиси углерода и метана, разбавленных азотом или углекислым газом при смешивании с воздухом. К сожалению, в этой модели рассматриваются только три горючих газа. Никаких дальнейших исследований по определению предельных кривых воспламенения других газов при смешивании с инертными газами до сих пор не проводилось. Это может сильно ограничить применимость этого метода.

Метод диаграмм и метод взрывного треугольника являются наиболее полезными для отслеживания направлений тренда газовых смесей. Однако, когда становится доступным каждый новый анализ образца, точка состояния на диаграммах перемещается, и взрывные треугольники также меняют свою форму и положение. Это аналогично стрельбе по движущейся цели (Макферсон, 1993). Холдинг (1992) попытался вручную преобразовать результаты, рассчитанные как методом диаграмм, так и методом Кауарда, в временную диаграмму. Это может помочь людям понять, что такое статус атмосферы в любой момент времени. Тем не менее, условные процедуры сложны и требуют много времени для завершения. Следовательно, полезно кодировать процедуры расчета и разрабатывать компьютерную программу для последовательного отображения изменений диаграмм и состояния газа на экране компьютера. Это создает сильное визуальное влияние временных трендов.

Другим важным вопросом, существующим в представленных методах, являются значения НПВ и ВПВ, используемые при расчете. Все они получены в стандартных условиях эксперимента (25 °C и атмосферное давление). Однако хорошо известно, что факторы окружающей среды, такие как давление, температура и т. д. Могут значительно изменить НПВ и ВПВ. Поэтому в будущих исследованиях следует тщательно проанализировать эти факторы и интегрировать их в методы взрываемости для точной калибровки параметров.

4 Выводы

Определение взрывоопасности шахтного газа является важной работой, и она должна выполняться на регулярной основе. Тогда атмосфера шахты и ее меняющаяся тенденция должны быть хорошо поняты и контролироваться операторами шахты. Это очень важно для безопасности производства шахты. В этой статье представлен обзор методов определения взрывоопасности газа, используемых в основных странах-производителях угля во всем мире, а также продемонстрировано их применение. Основные рекомендации для методов также обсуждаются в этой статье. Кроме того, путем выявления некоторых недостатков, существующих в этих методах, также обсуждаются и предлагаются некоторые предложения по их улучшению в будущих исследованиях. Следует отметить, что взрывы шахтного газа не только приносят материальный ущерб, но и приводят к гибели горнодобывающих компаний. Поэтому любые решения, связанные с управлением газами угольных шахт, должны быть тщательно продуманы до их реализации, особенно при планировании любых

5 Литература и примечания

1. <https://protivpozhara.com/tipologija/prirodnye/podzemnye-pozhary>
2. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, May 2012.
3. L. Lu, X. Хан. Handbook of coal mine safety (1991).
4. H.F. Coward, G.W. Jones. Limits of flammability of gases and vapors (1952).
5. M. Jacobs, I. Porter. Rapid generation of control charts for analysis of complex gas mixes in crisis situations(1998).
6. S. Kondo, K. Takizawa, A. Takahashi, K. Tokuhashi. Extended Le Chatelier's formula for carbon dioxide dilution effect on flammability limits (2006).
7. M.G. Zabetaksi, R.W. Stahl, H.A. Watson. Determining the explosibility of mine atmospheres (1959).
8. J. Zigmund, B. Janovsky "Vybuchovy trojuhelnik": a software tool for evaluation of explosibility of coal mine atmosphere (2007).