

Исследование характеристик и существенных параметров взрыва в модельных экспериментах, и экстраполяция их результатов на случай реальной шахты.

Чадромцев Н.Д. nick.chadromtsev@gmail.com

Введение.

Взрывы в угольных шахтах приводят к колоссальным потерям. Начиная с огромных экономических убытков, заканчивая утратами человеческих жизней. В большинстве случаев взрывы в угольных шахтах происходят в среде воздух-метан. В этой работе рассматриваются модельные эксперименты, связанные с горением метана, и их экстраполяция на случай шахт. Рассматривать непосредственно взрывы в шахтах не представляется возможным ввиду ограниченности собранных данных.

Существует несколько типов взрывов: дефлаграция, детонация и перетекание из дефлаграции в детонацию. Когда скорость распространения взрыва меньше скорости звука в среде, тип взрыва определен как дефлаграционный. Так как скорость звука возрастает с увеличением температуры, а продукты горения очень горячи, скорость, лимитирующая дефлаграцию, оказывается существенно больше скорости звука при комнатной температуре. Если же скорость взрыва больше скорости звука, взрыв классифицируется как детонационный. При детонационном взрыве перегрузка давления гораздо больше, чем при дефлаграционном. Поэтому важной задачей является поиск методов ограничения скорости распространения пламени.

Взрывоопасные концентрации метана.

Возгорания начинаются в некотором диапазоне концентраций горючего газа, лежащем между нижним и верхним взрывными пределами (Lower and Upper Flammability Limit). Если концентрация метана в воздухе меньше нижнего предела, возгорание не будет происходить из-за недостатка горючего газа, если выше, то концентрация кислорода слишком мала для процесса горения. Когда концентрация входит в этот диапазон, может произойти взрыв от небольшого источника тепла. Было сделано несколько работ, изучавших нижние и верхние взрывные пределы метана [1, 2, 3]. При повышении температуры нижний взрывной предел уменьшает

свое значение, а верхний увеличивает, что, таким образом, повышает вероятность возгорания. Исследования показали, что нижний взрывной предел метана составляет $4.6 \pm 0.3\%$, верхний — $15.8 \pm 0.4\%$ при температуре 293 К и давлении 100 кПа. Самая взрывоопасная концентрация метана $\sim 9.5\%$. В таком случае, взрыв наносит максимальный ущерб.

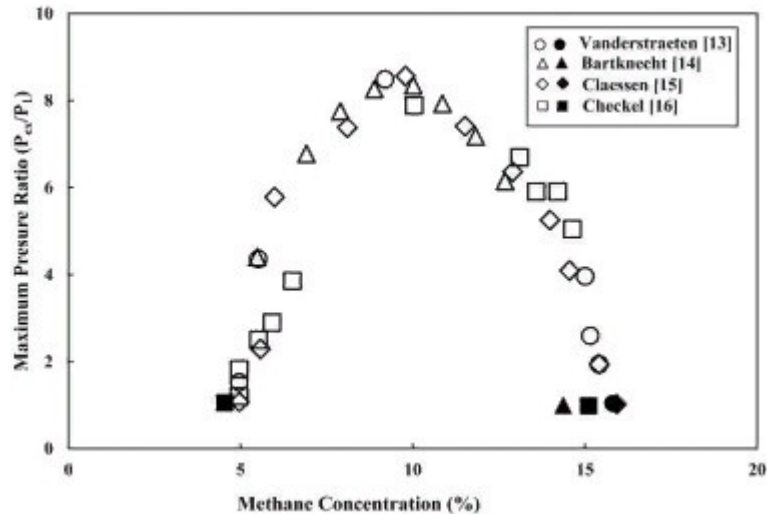


График 1. По оси у — отношение давления к атмосферному, по оси х — концентрация метана в %. Пустые метки — успешно, закрашенные — эксперимент не удался. [4].

Исследования происшествий в шахтах в горе Кембла (Mount Kembla Mine), Булли (Bulli Mine of Australia) и Бенксиху (Benxiyu Colliery Mine of China) показали, что выделения метана из угольной структуры при добыче играют главную роль во взрывах [5].

Для предотвращения таких трагедий необходимо отслеживать концентрацию этого горючего вещества и иметь возможность повлиять на нее. Так как метан существенно легче воздуха, его концентрация увеличивается по мере увеличения высоты. Таким образом можно делать полости накапливающие метан, затем откачивать его с помощью насоса для дальнейшего использования в качестве топлива. Такая технология могла бы уменьшить парниковый эффект и снизить вероятность взрывов в шахтах.

Способы воспламенения.

1) Авто-возгорание.

В таком типе возгорания горючая смесь самовоспламеняется без присутствия какого-либо триггера, как, например, искра или открытое пламя. Минимальная температура для такого процесса называется точкой разжигания (kindling point) или температура авто-воспламенения

(auto-ignition temperature) [6]. Как правило, эта температура принимает значения от 600 до 750°C. Исследования показали, что концентрация метана, минимизирующая значение температуры авто-воспламенения, равна 7%.

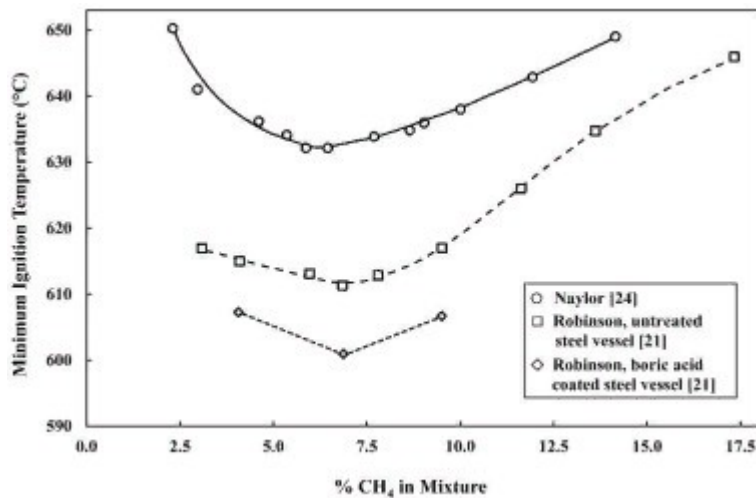


График 2. По оси x — концентрация метана в %, по оси y — минимальная температура авто-воспламенения. [7].

2) В присутствии внешних триггеров.

Если температура окружающей среды меньше температуры авто-воспламенения, то для возгорания необходимо участие каких-то внешних источников энергии (тепло из двигателей, тепло от трения канатов, статический заряд, искры и др.) [8].

Влияние энергии триггера на скорость воспламенения.

В работе [9] была исследована зависимость скорости воспламенения от энергии триггера и концентрации метана. В качестве среды в этой упрощенной модели рассматривалась труба с квадратным сечением с высотой 6 метров и длиной стороны 63.5 миллиметра. К этой трубе была подсоединена другая под некоторым острым углом, инициирующая, с высотой 1.12 метра и с диаметром 50 миллиметров. В качестве изоляции труб друг от друга использовался полиэтилентерефталат, известный своей свето-, водо- и воздухонепроницаемостью. Иницирующая труба заполнялась смесью из водорода и кислорода, концентрация которой определяла энергию триггера:

$$U = \frac{P_f E_c V_i}{2 A_d}, \text{ где } P_f \text{ — давление смеси в атмосферах, } E_c \text{ — полная химическая энергия}$$

на единицу объема при атмосферном давлении, V_i — объем трубы инициатора, A_d — площадь поперечного сечения в области соединения труб.

Если за Q принять теплоту сгорания водорода в Дж/м³, то выражения для энергии триггера принимает следующий вид:

$$U = \frac{P_f Q V_i}{2 A_d}$$

Введем число Маха M — отношение скорости воспламенения к скорости звука в среде. Если число Маха меньше 1, скорость воспламенения дозвуковая, если больше 1 — сверхзвуковая. В ходе эксперимента было выявлено, что при энергии триггера равной 28.2 МДж/м² скорость воспламенения в конце трубы зависит от концентрации метана в ней. Максимальная скорость оказалась при концентрации метана 11%

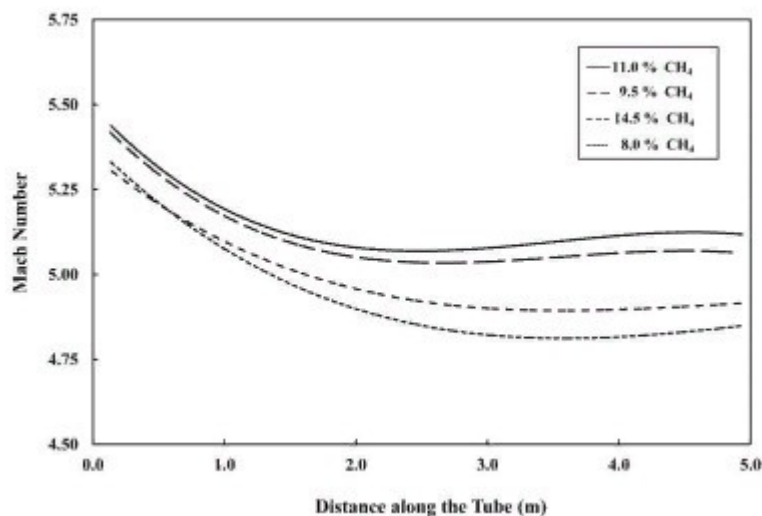


График 3. По оси x — координата трубы в метрах, по оси y — число Маха. Энергия триггера - 28.2 МДж/м². [9].

Также были исследованы зависимости числа Маха от энергии триггера. Интересно, что при достижении некоторой критической энергии, скорость воспламенения почти не менялась. Как видно из графика добавка энергии от 9.45 до 11.8 МДж/м² вносит пренебрежимо малое влияние в изменение скорости распространения взрыва. Иначе же, если энергия не достигает некоторого критического значения, то чем больше энергия триггера, тем более мощный взрыв будет происходить.

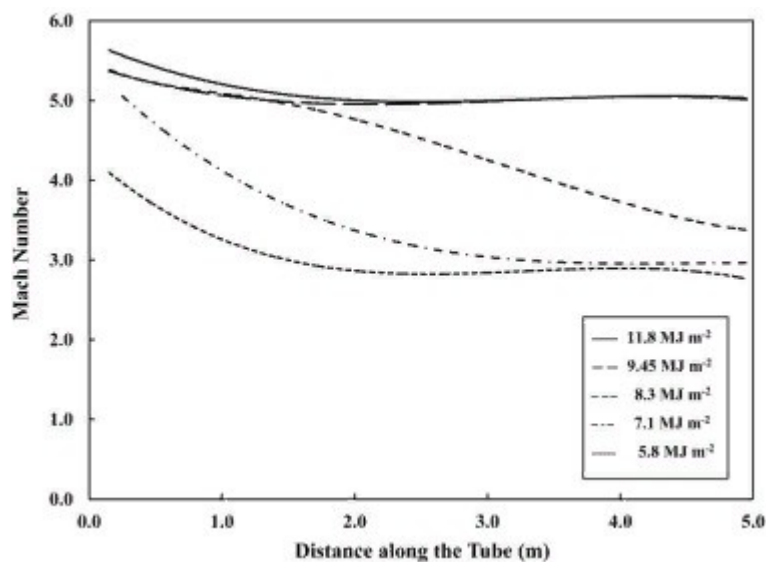


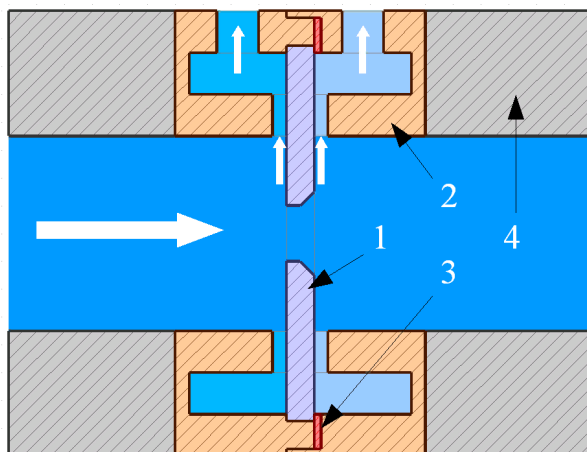
График 4. По оси x — координата трубы в метрах, по оси y — число Маха.

Концентрация метана — 9.5%. [9].

Одними из наиболее опасных возбудителей взрывов в угольных шахтах являются электрические искры, ввиду большого количества энергии сконцентрированного в малом объеме. Поэтому крайне важно в процессе проведения горнодобывающих работ исключить появления оголенных проводов и других источников электрического тока. Так же нельзя сжигать уголь или другие горючие материалы вблизи шахт.

Влияние турбулентности на характеристики взрыва.

Как правило, потоки взрыва не являются однородными. Создаются зоны турбулентности из-за, например, наличия препятствий. Один из модельных случаев — диафрагмы, сужающие поток газа в трубе.

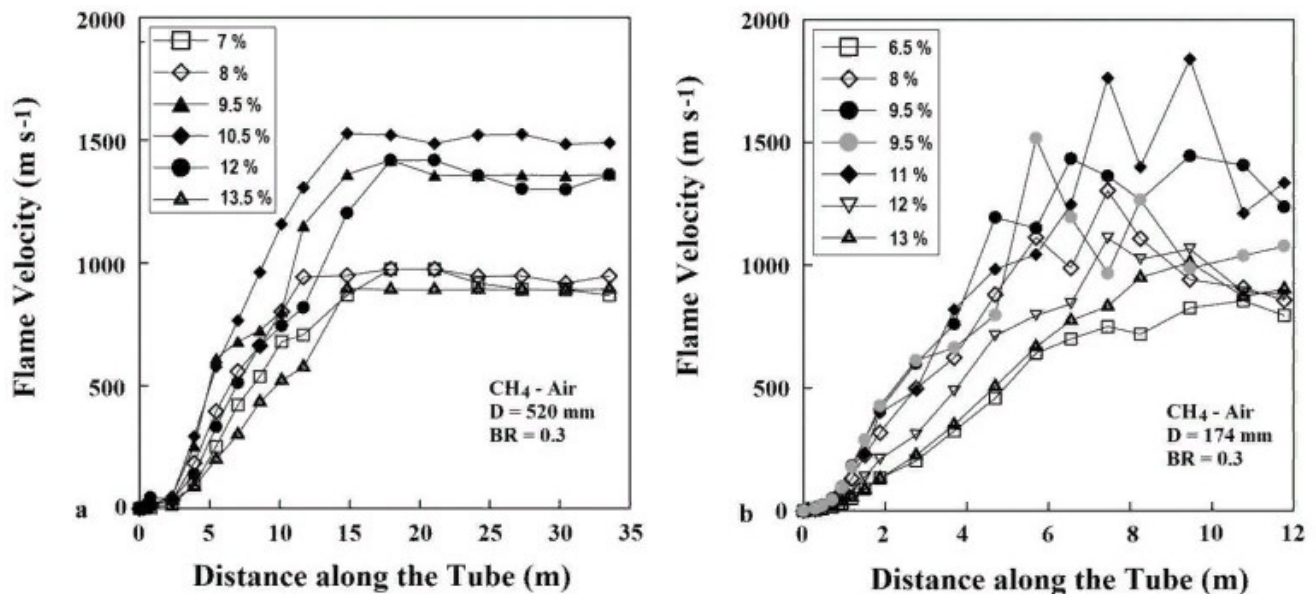


Изображение 1. 1 — диафрагма, 2 — кольцевая камера, 3 — прокладка, 4 — труба.

Стрелки показывают направление газа. Оттенками цвета выделено изменение давления.

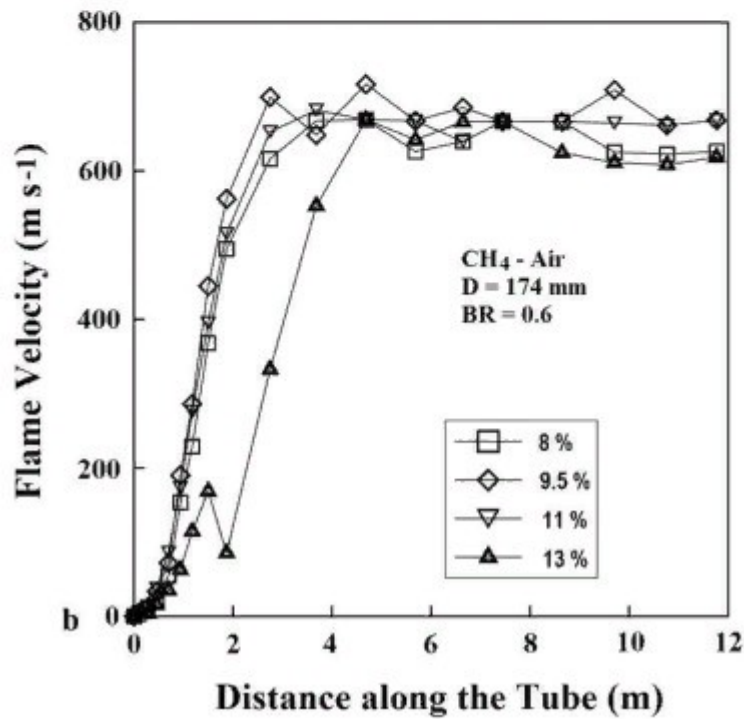
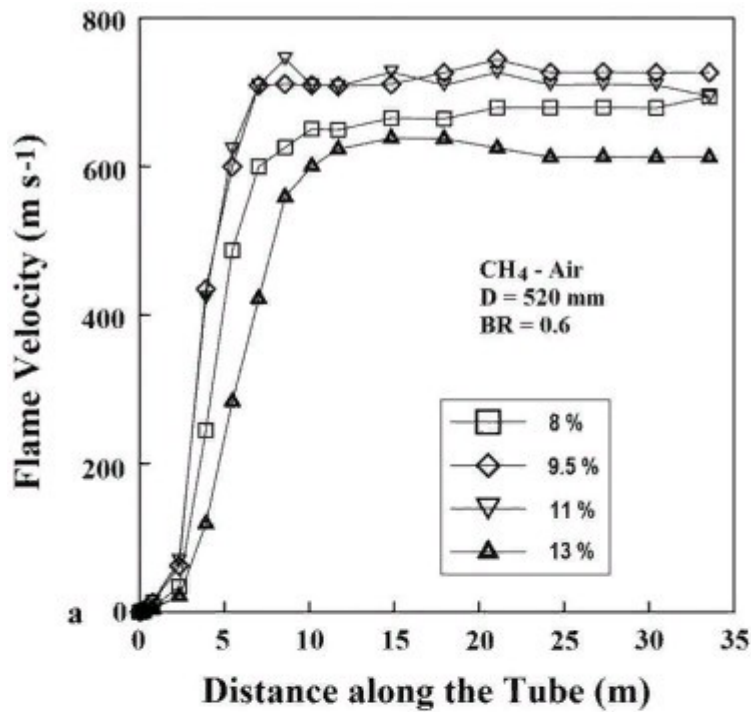
Wikipedia.org.

Основной характеристикой таких диафрагм является отношение закупоривания (blockage ratios – BR). $BR = 1 - (d/D)^2$, где d – диаметр отверстия диафрагмы, D – диаметр трубы. В работе [11] использовались диафрагмы с BR от 0,3 до 0,6 для изучения перехода дефлаграционного возгорания в детонационное. Рассматривались две трубы: длина первой — 12 метров, диаметр — 174 миллиметра, длина второй — 34,5 метра, диаметр — 520 миллиметров. Диаметры диафрагм были подобраны таким образом, чтобы отношение закупоривания BR равнялось 0.3. Квази-детонационное возгорание наблюдалось в первой трубе при концентрациях метана в воздухе равных 9.5, 11%. Во второй — при 9.5, 10.5, 12%.



Графики 4,5. По оси x — координата трубы, по оси y — скорость воспламенения. BR = 0.3. [11].

Ускорение распространения огня уменьшается при увеличении BR. При постановке эксперимента с BR = 0.6 максимальные скорости были существенно меньше, чем в предыдущих условиях.



Графики 6, 7. По оси x — координата трубы, по оси y — скорость воспламенения. BR = 0.6. [11].

Еще одним важным параметром для описания взрывов является размер детонационной клетки λ . Его значения для концентраций метана от 8 до 12% составляют 20-60 сантиметров

[11]. Когда отношение диаметра отверстия к размеру детонационной клетки d/λ больше или равно 1, предполагается детонационный взрыв.

Подводя итоги всех рассмотренных исследований, можно сказать, что чем уже диафрагма, тем больше ускоряется взрыв при ее прохождении.

Чем шире шахта, тем меньшие перегрузки вызовет взрыв. Также следует избегать создания областей в шахте с характерным диаметром 20-60 сантиметров, чтобы снизить вероятность разлома пород.

Также исследования показали, что скорость детонации уменьшается в трубах с неровными стенками [12].

Характеристики взрывов в гладких трубах.

Такие исследования проводятся для исключения влияния геометрии процесса, для того, чтобы заострить внимание исключительно на параметрах взрыва. Так, например, в работе [13] рассматривался закрытый сосуд с диаметром 2 метра и длиной 3.18 метра. Исследователи измеряли давление в различных координатах сосуда (вдоль длины). Максимальное значение давление обнаруживалось при концентрации 9.5% метана в воздухе, что совпадает с рассмотренными ранее экспериментами.

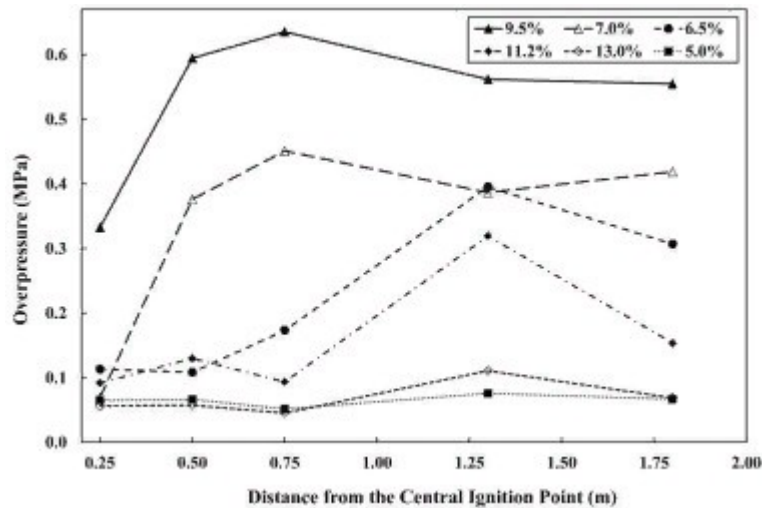


График 8. По оси x — координата сосуда вдоль длины, по оси y — перегрузка давления в мегапаскалях. [13].

В другом исследовании рассматривали трубу длиной 30 метров и внутренним диаметром 0.456 метра, один из концов которой запаян. В предыдущем случае давление сначала возрастает, потом падает. Если же один конец запаян, давление монотонно убывает.

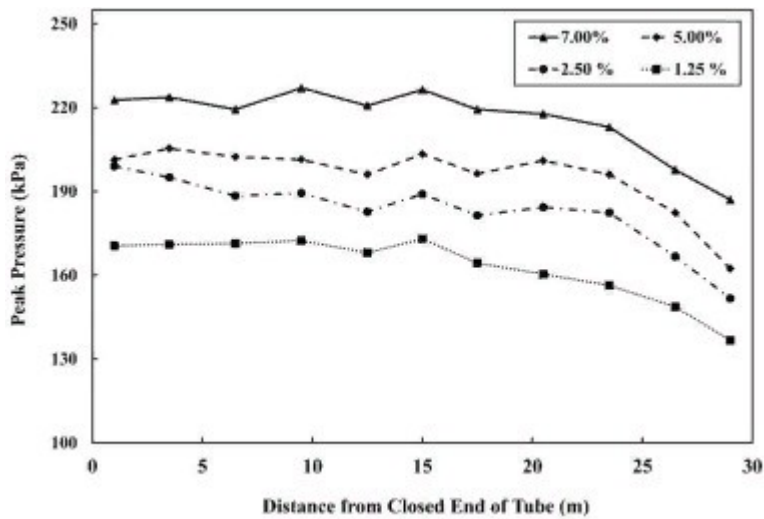


График 9. По оси x — расстояние от запаянного конца в метрах, по оси y — перегрузка давления в мегапаскалях. [14].

Еще один важный эксперимент с похожей геометрией был проведен с 73 метровой трубой диаметром 1.05 метра [14]. В этой работе исследовалась скорость распространения взрыва.

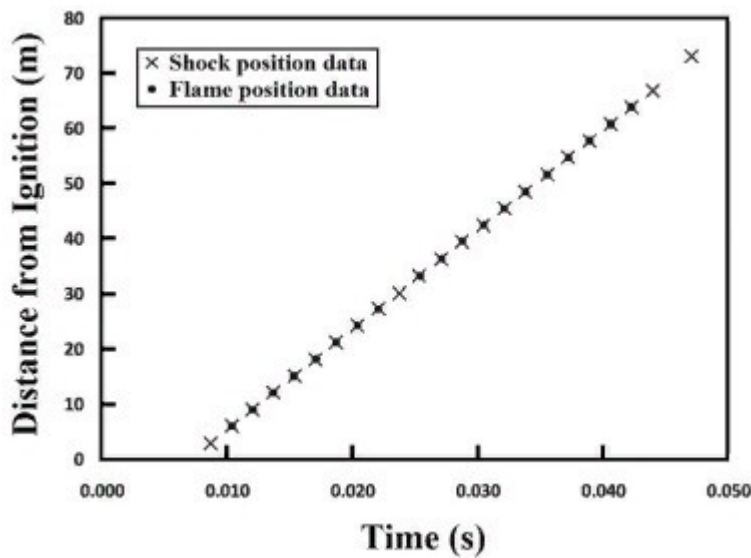


График 10. По оси x — время в секундах, по оси y — расстояние от начала взрыва в метрах. [14].

Как видно из графика скорости пламени и взрывная волна распространяются с одинаковой и постоянной скоростью.

Экспериментально полученная максимальная скорость распространения пламени была достигнута при концентрации метана 10%

По итогам рассмотренных работ можно сделать вывод, что давление тем выше, чем меньше направлений распространения огня. Для увеличения безопасности в шахтах необходимо уделять пристальное внимание вентиляции тоннелей. Для агрегации выделившегося метана, благодаря меньшей его плотности, чем плотность воздуха, можно прогонять воздух вблизи потолков и в дальнейшем использовать газовые смеси в качестве источника энергии.

Обоснованность модели.

В действительности угольная шахта в сотни раз больше, чем рассматриваемые трубки. Поэтому возникает вопрос, насколько применимы рассмотренные эксперименты к действительности. В работе [15] численно решаются уравнения Навье-Стокса и Эйлера для взрыва и распространения ударной волны в трубах с размерами 1:1, 1:10, 1:100. В масштабе 1:1 рассматривается труба с длиной 500 метров с квадратным сечением длиной 2.45 метра. Первые 100 метров трубы в модели были заполнены смесью метан-воздух с концентрацией 10%. В трубе располагались препятствия из стальных балок $10*10$ см², расположенные через метр. Один конец трубы был закрыт. Аналогичные условия были и при других масштабах. Вычисления показали, что увеличение характерных размеров трубы приводит к увеличению перегрузки давления.

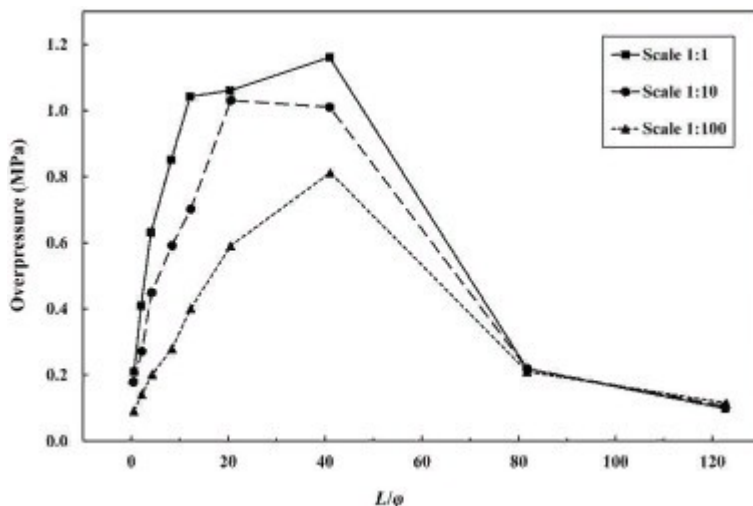


График 11. По оси x — безразмерные параметры L/φ , где L — координата вдоль длины трубы, φ — длина стороны сечения. По оси y — перегрузка давления в мегапаскалях. [15].

Кроме самых больших значений перегрузки давления для полномасштабного случая, скорости распространения пламени также максимальны.

Таким образом, в реальных ситуациях взрывы гораздо мощнее модельных случаев. Поэтому для подведения расчетов, основанных на результатах подобных экспериментов необходимо учитывать влияние размеров.

Выводы.

В данной работе были рассмотрены классификации различных типов взрывов, необходимые для них концентрации. Эксперименты указывают, что наиболее опасная концентрация метана $\sim 9.5\%$. Нижний взрывной предел составляет $4.6 \pm 0.3\%$, верхний — $15.8 \pm 0.4\%$. Сказано о важности измерений концентрации метана и предложен способ ее уменьшения.

Было рассмотрено два способа появления взрыва: авто-воспламенение и в присутствии внешних триггеров. Минимальная температура авто-воспламенения оценивается как $600\text{ }^\circ\text{C}$.

Рассматривались эксперименты с модельными трубами, диафрагмами в качестве препятствий. Обозначено влияние гладкости стенок на скорость распространения взрыва.

Был рассмотрен переход от модельной трубы к реальной шахте с помощью методов математического моделирования. При увеличении масштабов увеличиваются давление перегрузки и скорость распространения взрыва. Экспериментальные данные требуют пересчета для применения в реальных случаях.

Литература:

1. W. Bartknecht

Explosionsschutz, Grundlagen und Anwendung

Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1993)

2. V. Bunev, T. Bolshova, V. Babkin

The nature of the upper laminar flammability limit in methane-air mixtures at high pressures

Dokl. Phys. Chem. (2013), pp. 197-199

3. M. Gieras, R. Klemens, G. Rarata, P. Wolański

Determination of explosion parameters of methane-air mixtures in the chamber of 40 dm³ at normal and elevated temperature

J. Loss Prev. Process Ind., 19 (2006), pp. 263-270

4. B. Vanderstraeten, D. Tuerlinckx, J. Berghmans, S. Vliegen, E. Van't Oost, B. Smit

Experimental study of the pressure and temperature dependence on the upper flammability limit of methane/air mixtures

J. Hazard. Mater., 56 (1997), pp. 237-246

5. B.S. Dhillon

Mine safety: a modern approach

Springer Science & Business Media (2010)

6. Y. Pan, J. Jiang, R. Wang, H. Cao

Advantages of support vector machine in QSPR studies for predicting auto-ignition temperatures of organic compounds

Chemom. Intell. Lab. Syst., 92 (2008), pp. 169-178

7. C. Robinson, D. Smith

The auto-ignition temperature of methane

J. Hazard. Mater., 8 (1984), pp. 199-203

8. J.M. Kuchta

Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining, and fuel-related industries

U. S. Dep. Inter. Bureau Mines, 680 (1985), pp. 9-13

9. P. Wolański, C. Kauffman, M. Sichel, J. Nicholls

Detonation of Methane-air Mixtures, Symposium (International) on Combustion

Elsevier (1981), pp. 1651-1660

10. I. Moen, M. Donato, R. Knystautas, J. Lee

Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles

Combust. Flame, 39 (1980), pp. 21-32

11. M. Kuznetsov, G. Ciccarelli, S. Dorofeev, V. Alekseev, Y. Yankin, T. Kim

DDT in methane-air mixtures

Shock Waves, 12 (2002), pp. 215-220

12. B. Gelfand, A. Bartenev, S. Frolov, S. Tsyganov

Thermal detonation in molten Sn-water suspension

Prog. Astronaut. Aeronaut., 154 (1993), pp. 459-473

13. B. Zhang, C. Bai, G. Xiu, Q. Liu, G. Gong

Explosion and flame characteristics of methane/air mixtures in a large-scale vessel

Process Saf. Prog., 33 (2014), pp. 362-368

14. R.K. Zipf, V. Gamezo, M. Sapko, W. Marchewka, K. Mohamed, E. Oran, D. Kessler, E. Weiss, J. Addis, F. Karnack

Methane-air detonation experiments at NIOSH Lake Lynn Laboratory

J. Loss Prev. Process Ind., 26 (2013), pp. 295-301

15. Q. Zhang, L. Pang, H. Liang

Effect of scale on the explosion of methane in air and its shockwave

J. Loss Prev. Process Ind., 24 (2011), pp. 43-48