

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЗАМКНУТОСТИ ЗАРЯДНОЙ КАМЕРЫ НА ВОСПЛАМЕНЯЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

А. С. Шевцов Н.Р. (ДонИТУ), инж. Калякин С.А. (ООО «Снейк»)

Перед решением данной задачи введем понятие буферной среды – это инертная (невзрывчатая) среда, находящаяся в канале между очагом воспламенения и взрывоопасной смесью.

В работе [1] в результате широкомасштабных экспериментальных исследований получена модель теплообменных процессов между продуктами взрыва и буферной средой.

Если роль буферной среды выполняет безопасная длина забойки ($\ell_{зб}$), то такая длина, которая исключает возможность воспламенения метана и угольной пыли в призабойном участке выработки детонирующим шпуровым зарядом ВВ, то формула будет иметь вид:

$$\ell_{зб} = 80,17 \cdot 10^{-5} \sqrt{a_0} \sqrt{\frac{Q_t}{\eta}} \quad (1)$$

Q_t – тепловая мощность взрыва, Дж/с;

η – относительный показатель теплофизической эффективности веществ (за эталон принят воздух, для которого $\eta = 1$);

a_0 – безразмерный критерий.

Для взрыва свободно подвешенного заряда ВВ в оболочке формула (1)

применяется в виде

$$\delta_k = 5,24 \cdot 10^{-5} \sqrt{a_0} \sqrt{\frac{Q_t}{\eta}}, \quad (2)$$

δ_k – минимальная (критическая) толщина оболочки вокруг заряда ВВ, через которую он при взрыве не воспламеняет газопылевоздушную смесь.

Параметры Q_t и η рассчитываются известными методами, приведенными в работе [1], а именно:

$$Q_t = \frac{Q}{\tau_d} = \frac{Q_v \cdot m_{зар} \cdot D}{\ell_{зар}}, \quad (3)$$

где Q – теплота взрыва, Дж;
 τ_d – время детонации шпурового заряда ВВ, с;
 Q_v – удельная теплота взрыва, Дж/кг;
 $m_{зар}$ – масса шпурового заряда ВВ, кг;
 D – скорость детонации заряда ВВ, м/с;
 $l_{зар}$ – длина заряда ВВ, м.

$$\eta = 2,8 \cdot 10^{-9} \lambda_3^{3/2} \cdot \rho_3, \quad (4)$$

где λ_3 – удельное теплопоглощение забоечного материала, Дж/кг;
 ρ_3 – плотность забойки, кг/м³.

Теплопоглощающие свойства забойки определяются ее теплоемкостью; а для разлагающихся систем – теплотой реакции разложения и теплоемкостью образующихся продуктов. Поэтому удельное теплопоглощение рассчитывается общепринятым методом по стандартным энтальпиям образования соединений или определяется экспериментально [5], если реакция их разложения не известна или сомнительна.

Для многофазных забоечных материалов параметры λ_3 и ρ_3 рассчитываются с учетом весовых долей отдельных компонентов.

В работе [1] установлено, что критерий a_0 зависит от вида локализуемого взрыва и имеет следующие значения: для газовойздушной смеси $a_0 = 0,583$, а для взрыва свободно подвешенного заряда ВВ в воздушной оболочке $a_0 = 0,0091$.

Такая существенная разница (почти на два порядка) объясняется следующим. Продукты взрыва газовойздушной смеси расширяются по законам идеального газа, т.е. по изэнтропе Пуассона ($PV^k = \text{Const}$).

В то же время из гидродинамической теории детонации следует, что процесс расширения продуктов взрыва ВВ описывается двумя сопрягающимися изэнтропами: первая фаза расширения описывается политропой ($PV^n = \text{Const}$), а вторая – изэнтропой Пуассона $PV^k = \text{Const}$. Причем основное охлаждение продуктов взрыва идет на первой стадии расширения за счет передачи энергии в ударную волну (более 95%).

Считалось [2], что длины забойки в шпуре по сравнению с величиной, определяемой по формуле (3), т.е. с увеличением замкнутости зарядной камеры повышается не только эффективность взрывных работ, но и взрывобезопасность взрываемых зарядов, поскольку в этом случае повышается степень охлаждения продуктов взрыва перед выбросом их во взрывоопасную смесь (считалось, что их охлаждение – это единственный критерий, определяющий воспламеняющую способность детонирующего заряда).

В то же время известны факты [3-5], когда, например, наличие песчаной оболочки вокруг заряда приводит к увеличению частоты воспламенения метановоздушной смеси по сравнению со взрывом без оболочки; когда как установили японские исследователи [5], при взрыве в капале стальной мортитры

0,3 кг ВВ S-1 (аналог ВВ IV класса) с подсыпной 10 г породной пыли стехиометрическая метановоздушная смесь не воспламеняется, а при подсыпке в канал 10...150 г песка наблюдается от 50 до 100% воспламенений; когда в канал заряда ВВ в канале mortarы с большим радиальным зазором или свободным пространством у заряда не воспламеняет метановоздушную смесь, а при небольших значениях этих параметров наблюдаются устойчивые воспламенения [5]; когда, как показали опыты ВостНИИ, взрыв электродетонатора в песчаной оболочке оказывается более опасным в отношении воспламенения метановоздушной смеси, чем без оболочки и т.д.

Эти факты свидетельствуют, что критерий α_0 является величиной переменной, каким-то образом зависящей от степени замкнутости зарядной камеры, т.е. от времени между началом детонации шпурового заряда и началом контакта продуктов взрыва со взрывоопасной смесью ($\tau_{зан}$).

Скорость перемещения продуктов взрыва в буферной среде можно рассчитать по следующей формуле [1; 7]:

$$V_3^2 = \frac{P_n \cdot \left(\frac{V_3}{V_k}\right)^K}{\rho_3 \cdot (1 + 0,5 \cdot C_m + K_{тр} + 0,5 \cdot K_p \cdot \frac{\ell_3^2}{S_{ш}})}, \quad (5)$$

P_n – среднее давление продуктов взрыва в зарядной камере (наиболее достоверные данные дает метод расчета через уравнение состояния продуктов взрыва [7]), Па;

$\left(\frac{V_3}{V_k}\right)^K$ – степень изменения зарядной камеры при взрыве (для

аммонита Т-19 равна 0,134; ПЖВ-20 – 0,145; 6ЖВ – 0,112);

ρ_3 – плотность забойки, кг/м³;

$S_{ш}$ – сечение забойки, м²;

C_m – коэффициент аэродинамического сопротивления (для сферического взрыва равен 0,44; при взрыве с песчаной забойкой – 0,42; песчано-глиняной забойкой – 0,25; без забойки – 0,04);

$K_{тр}$ – коэффициент трения забойки о стенки шпура (для жидкостной и пластичной забойки равен 0,0404; для забойки из сыпучих материалов – 0,3); $K_p = 0,3$ – коэффициент распора забойки в шпуре.

Для решения этой задачи были обобщены экспериментальные исследования, проведенные МакНИИ по обеспечению безопасности производства взрывных работ в опасных условиях угольных шахт [1; 6].

Первая серия экспериментов относится к установлению минимальной длины забойки (ℓ_3), при которой взрыв шпурового заряда ВВ не воспламеняет метановоздушную смесь. Эксперименты проводились в канале стальной

мортиры диаметром 55 мм и длиной 900 мм, сообщающегося со взрывной камерой опытного штрека, заполненного взрывчатой метановоздушной смесью. В свободной от заряда ВВ (виритык к нему) части канала на полное его сечение размещался забочный материал: известные порошковые составы, увлажненная до 18% песчано-глиняная смесь в соотношении 1:3, а также флюорит и песок (сыпучая забойка ВМК-1 испытывалась в мортире с длиной канала 900 мм и 1050 мм, причем как на полное сечение, так и в ампуле). В результате проведения серии экспериментов по методу артиллерийской пристрелки устанавливалась минимальная длина забойки l_3 , при которой не воспламенялась взрывчатая смесь. Процесс воспламенения регистрировался по выходу пламени из штрека, а также по показанию фотодиода, размещенного в стенке взрывной камеры на расстоянии 3,7 м от днища. В качестве ВВ использовался аммонит 6ЖВ массой 0,5 кг, диаметром заряда ($d_{зар}$) равном 32 мм и длиной заряда ($l_{зар}$) равной 0,57 м (тепловая мощность составляла $1,44 \cdot 10^{10}$ Дж/с) или массой 0,6 кг и диаметром 36 мм ($l_{зар} = 0,55$ м, $Q_t = 2,36 \cdot 10^{10}$ Дж/с). Испытание сыпучей забойки ВМК-1 в полиэтиленовой упаковке проводилось при взрывании граммамита 79/21. Иницирование – прямое.

Вторая серия экспериментов принципиально отличалась от первой тем, что забойка располагалась у устья канала мортиры, длина которого составляла в этих опытах 1050 мм.

Следует заметить, что при взрывании без забойки в канале мортиры длиной 1050 мм и диаметром 55 мм величина предельного заряда диаметром 36 мм (минимального заряда, который при взрыве не воспламеняет метановоздушную смесь) при прямом иницировании для аммонита 6ЖВ оказалась равной 186,5 г, а для аммонита Т-19 – 215,3 г при длине свободного от заряда пространства в канале мортиры равном 0,875 и 0,854 м соответственно.

Воспламеняющая способность взрыва открытых зарядов ВВ (третья серия экспериментов) была определена при взрывании в метановоздушной смеси свободно подвешенных цилиндрических зарядов (патронов) ВВ в оболочке из жидких, гелеобразных (на основе гидрокарбоната натрия) и порошковых материалов с различными теплофизическими свойствами. При проведении экспериментов заряд ВВ окружался равномерным слоем исследуемого материала заданной толщины. Это достигалось размещением заряда ВВ в эластичном сосуде, изготовленном из полиэтиленовой пленки толщиной 100 ± 20 мм (в случае водяной оболочки применялись картонные центрирующие кольца). Снаряженное таким образом устройство подвешивалось в центре взрывной камеры объемом 10 м^3 опытного штрека, в которой создавалась стехиометрическая метановоздушная смесь. В результате проведения серии экспериментальных взрываний по принципу артиллерийской пристрелки, установлена минимальная (критическая) толщина пламегасящей оболочки, при которой исключается воспламенение метановоздушной смеси.

По результатам расчета времени запыления продуктов взрыва в опытах с аммонитом 6ЖВ, ПЖВ-20 и Т-19 построены графики зависимости

безразмерного критерия a_0 от времени запыраивания продуктов взрыва в расширяющейся среде (времени изоляции продуктов взрыва от взрывчатой метановоздушной смеси) в условиях отсутствия воспламенений приведенные на рис. 1.

Перед тем как установить физический смысл характерных точек полученной закономерности, следует обратить внимание на то, что $a_0 = 0,91 \cdot 10^{-1}$ было установлено в экспериментах, в которых критическая (безопасная) толщина оболочки была равна 0,45...1,25 м. Вполне очевидно на этих расстояниях в качестве воспламеняющего агента продуктов взрыва была их тепловая мощность (теплота, температура, скорость детонации).

Поэтому предполагалось, что критерий $a_0 = 0,91 \cdot 10^{-2}$ определяет условия локализации взрыва, при которых воспламеняющим фактором является только его тепловая мощность, а буферная среда при этом не претерпевает химических изменений.

При построении зависимости критерий a_0 рассчитывался по формулам (1) и (2). При этом параметр Q_1 определялся по формуле (3) исходя из параметров взрываемого заряда, а за параметр η – по формуле (4) исходя из параметров применявшейся буферной среды (оболочки и забойки).

Однако за величину δ_k и $\ell_{3,6}$ принимались экспериментально установленные величины. Причем критическая толщина оболочки из конденсированных материалов в опытах изменялась от 5 до 40 мм, а безопасная длина забойки – от 20 до 330 мм. При этих пространственных параметрах буферной среды в процессе локализации взрыва принимали участие не только такие воспламеняющие факторы как теплота и температура взрыва, но и ударная волна, горящие и раскаленные частицы ВВ, горючие компоненты и окислы азота в продуктах взрыва.

С учетом приведенных пояснений установим физический смысл полученной закономерности.

Левая ветвь кривой определяет условия воспламенения смеси взрывом заряда через буферную среду, когда ее толщина меньше радиуса продуктов взрыва в точке сопряжения. В этом случае теплоотдача в процессе расширения недостаточна, чтобы снизить температуру продуктов взрыва до безопасной и поэтому необходим дополнительный фактор, чтобы предотвратить воспламенение метановоздушной смеси.

Существенное возрастание безопасной протяженности буферной среды по сравнению с величиной, рассчитываемой по формулам (1) и (2) можно объяснить из предположения перехода кристаллического ингибитора, способного к торможению цепной реакции окисления метана кислородом, в состояние, при котором он становится неспособным к рекомбинации радикалов на поверхности, вследствие спонтанного процесса, вызванного действием на кристалл соли сильной ударной или детонационной волны, с восстановлением утраченной способности через время релаксации структурной константы кристалла.

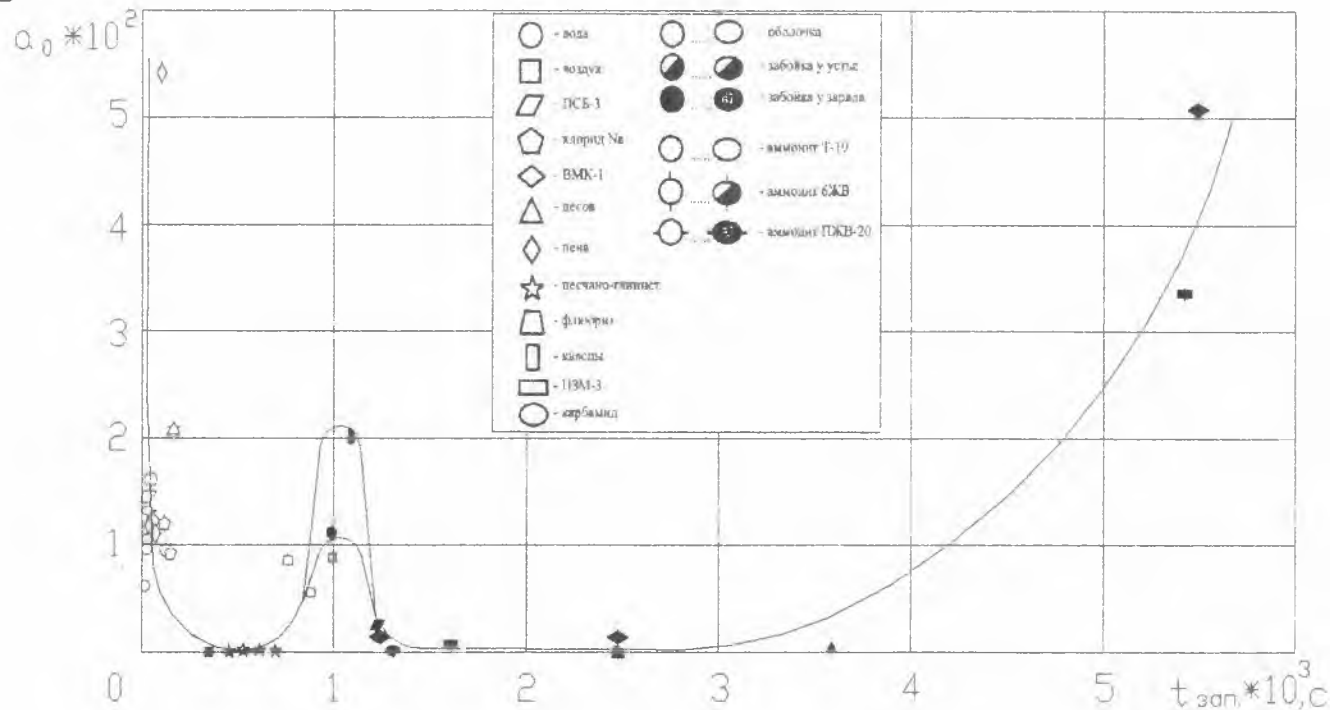


Рис. 1 Графическое изображение зависимости безразмерного критерия a_0 от времени загорания продуктов взрыва в буферной среде ($\tau_{\text{зап}}$)

Последнее наступает при $a_0 \approx 0,91 \cdot 10^{-2}$, полученное, как указывалось ранее при значительных протяженностях буферной среды.

Снижение критической протяженности буферной среды (нижний участок левой ветви закономерности) обусловлен повышением ингибирующей эффективности слагающих ее порошковых веществ в результате как их измельчения во фронте дегонационной волны, так и формирования на поверхности частиц коротко живущих активных центров (кжц) [8].

Точка первого минимума имеет следующие координаты: $a_0 = 0,0082 \cdot 10^{-2}$ и $\tau_{\text{мин}} = 0,52$ мс.

Указанный участок кривой как раз и учитывает такую многофакторную агрессивность продуктов детонации. Этот режим ограничен асимптотой $\tau_{\text{мин}} = 0$, определяющей условия воспламенения открытым свободно подвешенным зарядом ВВ.

Пересечение с осью « $O - a_0$ » невозможно по следующим причинам: во-первых, предохранительные ВВ содержат в своем составе пламегасители, во-вторых, оболочка патронированных ВВ сама по себе в определенной степени обладает пламегасящими свойствами.

С физической точки зрения наличие двух максимумов при $\tau_{\text{мин}} = 1,03$ мс на установленной закономерности объясняется существенной ролью горящих частиц ВВ и продуктов взрыва на их воспламеняющую способность. Например, английские исследователи на основании проведенных экспериментов пришли к выводу, что ВВ могут воспламенить метановоздушную смесь через трещину только при наличии в продуктах взрыва дефлагрирующих частиц. Наличием в продуктах взрыва горящих частиц ВВ К. Бейлинга объяснял установленный экспериментально факт, что при формировании заряда ВВ в канале мортиры наиболее безопасными оказываются средние значения свободного пространства [4].

Наиболее вероятно, что левая дуга этой параболы определяет условия локализации (гашения) раскаленных продуктов взрыва в условиях, когда в их составе содержатся вновь загоревшиеся разбросанные частицы ВВ, особенно частицы аммиачной селитры, а правая — условия, когда горение этих частиц затухло.

На основании данных опытов, проведенных А.Я. Апиным и П.А. Парамоновым [9], можно считать вполне доказанным, что неполное разложение частиц аммиачной селитры является одной из причин образования оксидов азота при взрыве современных промышленных ВВ. Вместе с тем исследованиями многих ученых доказано, что диоксид азота в реакции окисления метана играет роль положительного катализатора. Он значительно ускоряет реакцию воспламенения, сокращает период индукции, уменьшает критическую температуру воспламенения на 150...250°C. Поэтому попадание оксидов азота в продукты взрыва приводит к необходимости увеличения теплофизической эффективности забоечного материала или же к возрастанию безопасной длины забойки.

Как результат, на полученной графической зависимости наблюдается через $\tau_{\text{мин}} = 1,0$ мс резкий подъем левой дуги параболы до $a_0 = 1,07 \cdot 10^{-2}$ или до $a_0 = 2,12 \cdot 10^{-2}$.

По мере сгорания частиц ВВ необходимое для расчета безопасной длины забойки значение a_0 так же резко снижается (правая дуга параболы) и примерно

через $\tau_{\text{зап}} = 1,0$ мс резкий подъем левой дуги параболы до $a_0 = 1,07 \cdot 10^{-2}$ или до $a_0 = 2,12 \cdot 10^{-2}$

По мере сгорания частиц ВВ необходимое для расчета безопасной длины забойки значение a_0 так же резко снижается (правая дуга параболы) и примерно через $\tau_{\text{зап}} = 1,88$ мс выволаживается до $a_0 = 1,28 \cdot 10^{-4}$, неограниченно приближаясь к оси абсцисс, которая служит второй асимптотой установленной закономерности.

Наличие двойного максимума при $\tau_{\text{зап}} = 1,03$ мс с физической точки зрения объясняется, наиболее вероятно, следующим.

Верхний максимум ($a_0 = 2,02 \cdot 10^{-2}$) определили взрывания с забойкой из алюмоаммонийных квасцов. Он обусловлен разложением забойки (в данном случае квасцов) с выделением горючих газов.

Нижний максимум ($a_0 = 1,11 \cdot 10^{-2}$) характеризует процесс воспламенения взрывоопасной смеси материалов, не способных к образованию горючих газов.

Взрываниями с патронированной забойкой ВМК-1 и ПЗМ-3 установлено, что примерно при $\tau_{\text{зап}} = 3$ мс кривая начинает загибаться вверх: вначале с увеличением времени запыриания критерий a_0 возрастает медленно, а примерно с $\tau_{\text{зап}} = 4$ мс его величина интенсивно возрастает.

С физической точки зрения наличие второго подъема можно объяснить следующим образом.

Экспериментально установлено [9], что повышение степени замкнутости зарядной камеры стимулирует образование оксида углерода. Значительное количество оксида углерода при взрыве патронированных ВВ может быть обусловлено газификацией бумажно-парафиновой или другой углеродсодержащей оболочки патрона ВВ, которая, сгорая полностью или частично, образует оксид углерода.

В угольных шахтах, например, абсолютное колебание количества оксида углерода в зависимости от типа ВВ и свойств пород достигает до $45 \text{ дм}^3/\text{кг}$.

Следовательно, газификация углеродсодержащей оболочки приводит к насыщению продуктов взрыва горючими газами с различными концентрационными пределами воспламенения, что значительно увеличивает критерий a_0 , вероятно, приближаясь к асимптоте с уравнением $a_0 = 0,583$, т.е. к условиям гашения взрыва газозадушной смеси.

Установленная закономерность позволяет объяснить результаты опытов, которые не поддавались трактовке прежде.

Например, установленный японскими исследователями факт повышения частотности воспламенения при подсыпке в канал мортиры песка можно объяснить тем, что протекающие процессы описываются участком кривой вблизи первого минимума, а во втором случае песок, обладающий значительной насыпной плотностью, переводил процесс в другой режим со сдвигом по кривой вправо в направлении максимума с соответствующим увеличением критерия a_0 , что привело к тому, что имевшаяся длина

свободного пространства в канале mortarы оказалась недостаточной для охлаждения продуктов взрыва до критических параметров.

В результате выполнения работы получены не тривиальные результаты, которые коренным образом меняют наши взгляды на методы обеспечения безопасности взрывания шпуровых зарядов ВВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях / А.Е. Умнов, А.С. Голик, А.Ю. Палеев, Н.Р. Шевцов. – М.: Недра, 1990. – 286 с.
- 2 Галаджий Ф.М. Безопасность взрывных работ в шахтах. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 135 с.
- 3 Взрывные работы в опасных условиях угольных шахт/Кутузов Б.Н., Бутуков А.Ю., Вайнштейн Б.И. и др. – М.: Недра, 1979. – 373 с.
- 4 Бейлинг К., Дрекопф К. Взрывчатые вещества и средства взрывания. – М.: Изд-во иностранной литературы, – 1941. – 405 с.
- 5 Танака М., Тэсима Т., Кога Ю. О безопасности взрывных работ при прямом и обратном иницировании зарядов // Сайко ТО ХО АН, т. 31. 1985. - № 11. – с. 8-14.
- 6 Шевцов Н.Р. Экспериментальные данные по предотвращению воспламенений метановоздушной смеси взрывом заряда ВВ. Сб. науч. тр. ДонДТУ: Серія гірничо-геологічна. Випуск 23. – Донецьк, ДонДТУ, 2001. – с. 32-36.
- 7 Калякин С.А., Шевцов Н.Р. Взаимодействие продуктов детонации ВВ с забоечным материалом при камуфлетном взрывании // Способы и технические средства обеспечения безопасных и здоровых условий труда на угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакННИИ. – Макеевка-Донбасс: изд. МакННИИ. – 1988. – с. 47-53.
- 8 Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 256 с.
- 9 Парамонов П.А. Механизм образования окиси углерода в рудничном воздухе при проведении взрывных работ // Горный журнал. – 1955. - №10. – с. 49-50.