

---

УДК 539.3

Стаховский О.В.

### **ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В НЕОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ**

Для решения задачи разминирования минных полей объемным взрывом в работах [1-5] было предложено формировать детонационно-способную смесь в струе отработанных газов силовой установки бронетанковой техники. Данный способ разминирования по сравнению с наиболее дешёвым ручным способом обладает преимуществом по целому ряду основных показателей, таких как стоимость и производительность разминирования, степень безопасности при выполнении работ по разминированию. Например, по стоимости разминирования 1 м<sup>2</sup> минно-взрывного заграждения способ разминирования с применением бронетанковой техники является менее затратным в 5 раз, а по производительности превосходит ручной способ более чем в 100 раз.

В настоящий момент инициирование детонации в топливовоздушном облаке, формируемом в струе отработанных газов танка, реализуется за счет взрыва конденсированных взрывчатых веществ, что приводит к увеличению риска для жизни в процессе выполнения работ по разминированию. В качестве альтернативного метода инициирования детонации возможно применение процесса перехода детонации из детонационной трубы в неограниченное пространство. Установлено, что имеется критический диаметр детонационной трубы, при котором осуществляется дальнейшее развитие детонации в неограниченном объеме [6]. Этот диаметр зависит от размера детонационной ячейки  $\lambda$  и составляет около  $(12 \div 13)\lambda$ , а для некоторых смесей и более. Например, в пропано-воздушной смеси стехиометрического состава  $\lambda \approx 5,4 \cdot 10^{-2}$  м [6], что требует применение детонационной трубы с диаметром более чем 0,6 м. Следует учесть, что на процесс перехода горения в детонацию необходима длина трубы, равная около 20 диаметрам трубы. В данном примере эта длина составит 12 м. Очевидно, что такие размеры труб приводят к нецелесообразности их применения для инициации детонации в разрабатываемом способе разминирования. Поэтому, требуется выявить условия, при которых возникает детонация, и на их основании выработать требования к системам инициирования детонации.

Инициирование детонации в смеси происходит путем формирования и распространения в ней ударной волны, интенсивности которой достаточно для развития уско-ряющейся экзотермической реакции. В качестве «точечных» источников инициирования детонации используют взрывы зарядов взрывчатого вещества (ВВ), взрывы электропроводящей проволоки, ударные волны, получаемые от искровых разрядов. Также, существует метод инициирования, основанный на создании детонации в ограниченном объеме с плоским фронтом ударной волны с дальнейшим её переходом в неограничен- ное пространство. При этом, происходит перестроение плоского фронта волны в сферический.

Новый метод инициирования детонации в неограниченном пространстве предложен в работе [7], в котором осуществляется увеличение интенсивности ударной волны в процессе её выхода из детонационной трубы за счет электродинамического ускорения газо-плазменного потока за фронтом волны. Данный метод может быть применен в способе взрывного разминирования с помощью бронетехники. Но при этом требуется определение критических параметров инициирования детонации и оптимального режима ускорения потока за фронтом ударной волны в процессе её выхода из детонационной трубы.

### **Критические параметры инициирования детонации**

Минимальная энергия, которую необходимо затратить для инициирования детонации в смеси, является определением понятия критической энергии инициации детонации. Критическая энергия в значительной мере зависит от источника инициирования. В результате исследования объёмной мощностью инициирующего источника (определяемая как энергия источника, деленная на объем области энерговыделения и время выделения) получено (рис. 1), что данная величина практически постоянна [8]. Поэтому, с целью уменьшения энергозатрат на инициирование, необходимо увеличивать объёмную мощность энерговыделения.



Рисунок 1 - Корреляция между объёмной мощностью инициирующего источника и его энергией при инициировании сферической детонации в стехиометрической ацетиленокислородной смеси (начальное давление 4 кПа) [8]

Но вне зависимости от достигаемой мощности разряда существует минимальная критическая энергия инициирования (рис. 2). Это объясняется наличием предела во времени самовоспламенения горючей смеси за фронтом ударной волны [9].

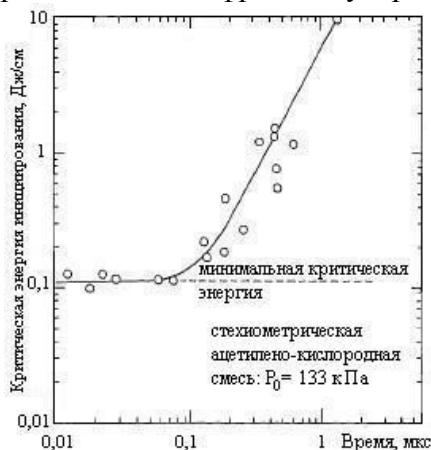


Рисунок 2 - Зависимость критической энергии инициирования детонации от времени энерговыделения [9]

Согласно [10], источник инициирования должен иметь достаточный запас энергии и обладать временными и пространственными характеристиками энерговыделения, меньшими критических величин. По мнению авторов, для топливовоздушных смесей всем этим условиям лучше всего удовлетворяют заряды взрывчатых веществ. В случае использования тротила, как источника сферической детонации стехиометрической ацетилено-воздушной смеси при нормальных условиях, его критическая масса (минимальная масса ВВ, при которой осуществлялось инициирование детонации) по разным данным составляет от 1,5 до 4,7 г [10]. В перерасчете на энергию инициирования это составляет от 6,3 до 19,8 кДж. Экспериментальные исследования по сферической детонации бензино-воздушных смесей в условиях, близких к нормальным, показали, что для этой смеси, находящейся в стехиометрии, минимальная масса тротила составила не менее 300 г (около 126 кДж) [11]. Для керосино-воздушной смеси эта масса была не меньше 4500 г. Очевидно, что реализовать «точечный» взрыв при помощи электропроводящей проволоочки и искры при таких энергокладах затруднительно. Поэтому, в качестве альтернативного метода инициирования детонации в неограниченном объеме по отношению к методу, где используются ВВ, может служить метод перехода детонации из ограниченного объема в неограниченный.

Для получения детонационной волны с плоским фронтом используют детонационную трубу. Как правило, она представляет собой трубу, закрытую с одной стороны, и в которой с закрытой стороны установлен источник воспламенения. Труба заполняется детонационно-способной газовой смесью. К инициированию детонации в такой трубе приводит процесс быстрого нарастания давления в области горения из-за ограниченной скорости расширения продуктов реакции в полужакрытом пространстве. В детонационной трубе для инициирования детонации достаточно затратить электрическую энергию, требуемую для появления очага воспламенения. Поэтому, по порядку величины в этом случае энергоклад составляет около десятка мДж. Величина критической энергии инициации детонации на несколько порядков превосходит энергию, необходимую для воспламенения той же смеси.

Явление перехода детонации из ограниченного объема в неограниченный связывают с гидродинамическим процессом преобразования плоской ударной волны в сферическую.

Исследование возможности инициирования сферической детонации от плоской ударной волны, формируемой в детонационной трубе, сделано в работах [12, 13]. Данное исследование проведено на установке, выполненной по схеме (рис. 3).

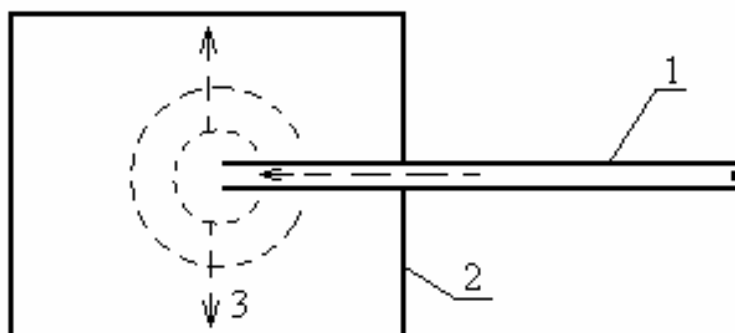


Рисунок 3 - Схема опыта с инициированием сферической детонации плоской детонационной волной в трубе: 1 – детонационная труба, 2 – бомба размером 200×300 мм<sup>2</sup>, 3 – ось фоторегистрации [12]

Эксперименты проводились на ацетиленокислородной смеси с разбавлением её азотом. Было установлено, что, в зависимости от отношения  $N_2/O_2$  при фиксированном диаметре детонационной трубы, плоская детонационная волна инициирует или воспламенение, или вызывает сферическую детонацию с незначительной временной задержкой или без неё (рис. 4). При этом, величина задержки составляет порядка нескольких микросекунд. Из результатов эксперимента прослеживается связь диаметра детонационной трубы с размером детонационной ячейки, определяющим детонационную способность смеси. Согласно [6], измеренная длина ячейки  $\lambda$  для смеси  $(C_2H_2 + 2,5O_2)$  равняется 0,3 мм, а для смеси  $(C_2H_2 + 2,5O_2 + 9,5N_2)$  -  $\lambda = 13,6 \pm 1,6$  мм. Поэтому, в процессе перестроения плоской детонационной волны в сферическую подпор плоской детонационной волны газодинамическим потоком должен быть таким, чтобы градиент роста термогазодинамических параметров потока за фронтом волны был соизмерим с величиной задержки. А эта величина связана с размером детонационной ячейки.

В случае неизменного состава смеси, но при увеличении диаметра детонационной трубы достигают режим перехода плоской детонации в сферическую. Например, по экспериментальным данным этой же работы [12], при  $N_2/O_2 = 1,4$  плоская детонационная волна диаметром 17 мм не инициировала сферическую детонацию, а при диаметре 19 мм такое инициирование возникало. Отсюда следует, что динамика ускорения детонационной волны на выходе из детонационной трубы для случая сферического инициирования детонации будет определяться исходя из отношения диаметра трубы, при котором осуществляется переход без принудительного ускорения, к диаметру трубы, в котором это ускорение осуществляется.

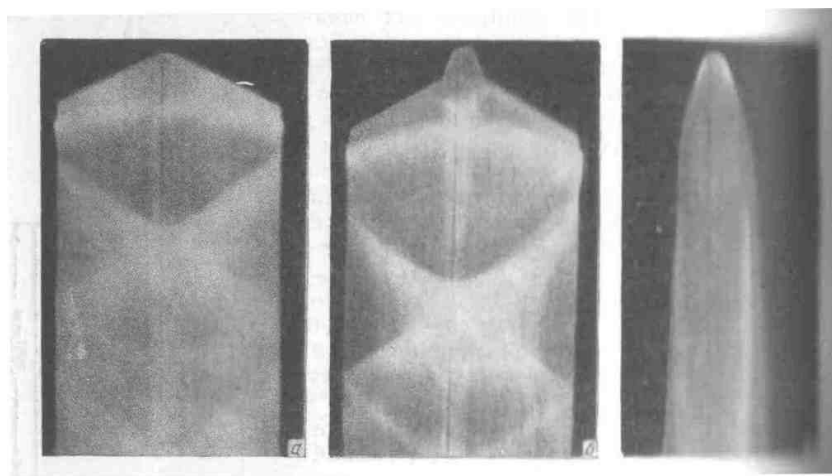


Рисунок 4 - Переход плоской детонационной волны в сферическую в смесях состава  $(C_2H_2 + 2,5O_2 + xN_2)$ : а)  $x = 0,5$ ; б)  $x = 2,5$ ; в)  $x = 3,25$  [12]

Известно, что в детонационных трубах при выходе волны на установившейся режим её скорость определяется кинетикой химических реакций. Поэтому, для каждого типа смеси, с определенным соотношением окислителя и восстановителя и которая находится в определенных начальных термодинамических условиях, характерна практически фиксированная скорость детонации. В случае отклонения состава смеси от стехиометрического соотношения, скорость детонации в смеси может как возрастать, так и убывать. Подобное влияние на скорость детонации оказывает введение добавок в смесь. Это вызвано тем, что скорость детонационной волны  $D$  зависит от температуры  $T_{взр}$ , достигаемой в газовой среде в результате детонации, и от среднего молекулярного веса  $M_{пр}$  продуктов детонации:

$$D = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{8310\gamma}{M_{np}} \cdot T_{взр}}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  - показатель адиабаты.

Введение добавок с меньшей молекулярной (атомарной) массой приводит к уменьшению молекулярного веса, что в определенных случаях обеспечивает рост скорости детонации, несмотря на уменьшение температуры  $T_{взр}$ . Молекулярный вес молекулы азота  $M(N_2) = 28$  незначительно отличается от молекулярного веса молекулы кислорода  $M(O_2) = 32$ . Поэтому скорость детонации в смесях топлива с воздухом значительно уступает скорости, характерной для смесей такого типа топлива с кислородом. Как результат, в технологических процессах в настоящее время нашли наибольшее распространение топливно-кислородные детонационные смеси.

За счет электродинамического ускорения газового потока за фронтом ударной волны можно увеличить скорость выхода волны из детонационной трубы. Это приведет к изменению динамики истечения, что позволит инициировать сферическую детонацию с труб малого диаметра.

Следует отметить, что идея применять ударное воздействие, возникающее от электродинамически ускоренной плазмы, для инициирования детонации предложена в работе [14]. Устройство состоит из параллельных рельсовых электродов 2,3, к которым подключен источник 4 электродвижущей силы (ЭДС) (рис 5). Инициирование детонации с помощью данного устройства осуществляется следующим образом. В результате короткого замыкания, которое осуществляется возле концов рельсовых электродов со стороны подключения источника ЭДС, образуется плазменная перемычка 5. Воздействие магнитного поля, которое возникает во время протекания электрического тока по рельсовым электродам, на ток, который течет по плазменной перемычке, приводит к появлению силы, ведущей к ускорению плазмы вдоль рельсовых электродов. В результате столкновения ускоренной плазмы с детонационно-способным веществом 1 возникает инициирование детонации.

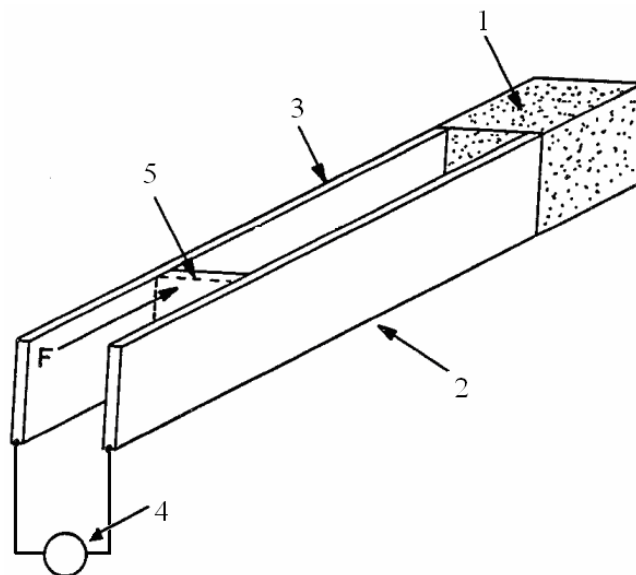


Рисунок 5 - Схема устройства для инициирования детонации в конденсированных взрывчатых веществах [14]

Следует отметить, что механизм инициирования детонации в твердых и газообразных взрывчатых веществах несколько отличается. Например, в пористых бризант-

ных ВВ под воздействием недостаточно интенсивной ударной волны может произойти только воспламенение в результате адиабатического сжатия воздушных включений. Разогрев воздуха в возникающих «горячих» точках может привести к взрыву. Иницирование детонации в газовых смесях, находящихся в неограниченном объеме, по такому механизму не происходит. Поэтому для иницирования необходимо создание детонационных волн со сферическим фронтом и с необходимым порогом интенсивности. Вместе с тем, электродинамический метод получения ударных волн заслуживает внимания.

На процесс иницирования детонации оказывают влияние пространственные и временные характеристики энерговыделения. Согласно [15], энергия иницирования многофронтной детонации  $E$  пропорциональна энергии иницирования детонации в отдельной элементарной ячейке  $E_0$ :

$$E = n^* E_0, \quad (2)$$

где  $n^*$  - коэффициент пропорциональности, характеризующий минимальное число микровзрывов, которые способны совместно возбудить многофронтную волну.

Считается, что источником иницирования детонации в элементарной ячейке служит соударение поперечных волн. Каждое соударение играет роль микровзрыва с энергией, определяемой для сферического случая по формуле [15]:

$$E_0 = 0,26\rho_0 D_0^2 b^3, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  - исходная плотность смеси,  $D_0$  - скорость детонационной волны Чемпена-Жуге,  $b$  - продольный размер элементарной ячейки.

Для определения численного значения предложено использовать экспериментальные данные по распространению детонационной волны в резко расширяющихся каналах. Условия иницирования сферической детонации с помощью детонационной трубы характеризуется параметром  $d^*/a$ , где  $d^*$  - критический диаметр трубы, при котором возникает иницирование,  $a$  - поперечный размер элементарной детонационной ячейки. На основании этого параметра определяется критическое число микровзрывов по формуле [15]:

$$n^* = \pi/2 \cdot (d^*/a). \quad (4)$$

Таким образом, зная параметры исходной смеси и характерные для данного состава смеси детонационные параметры, а также пользуясь формулой (4), возможно определить размер области пространства, через которую должна пройти ударная волна необходимой интенсивности.

В данной работе [15] получено, что критическое число микровзрывов для ацетилено-воздушной смеси укладывается при радиусе сферы, равной не менее  $R^* \sim 4b$ . При этом, время движения взрывной волны до радиуса  $R^*$  должно быть не менее характерного времени  $t^*$ .

Произведем расчет размера области  $V$ , при взрыве которой возникает сферическая детонация в ацетилено-воздушной среде. Размеры ячейки в данной смеси стехиометрического состава при н.у. равняются:  $b = 18$  мм,  $a = 0,6b = 10,8$  мм. Параметр  $d^*/a = 24$ . По формуле (4) получим  $n^* = 37$ . Объем элементарной ячейки составит  $V_0 = 18 \cdot 10,8^2 = 2099$  мм<sup>3</sup>. Отсюда,  $V = 14696$  мм<sup>3</sup>.

Зная энергию иницирования многофронтной детонации, и рассчитав энергию ударной волны, которая приведет к микровзрывам при её развитии из трубы с диамет-

ром, меньшим критического, возможно определить минимальную энергию, которую необходимо вложить за счет электродинамического ускорения ударной волны, для инициирования сферической детонации.

В случае инициирования детонации в слабо детонирующих смесях, формула (2) требует корректировки [16]. На основании экспериментальных исследований по инициированию детонации в бензино-воздушных смесях с помощью взрыва конденсированных ВВ и с помощью взрыва полусферы с пропано-воздушной смесью, установлено, что критическая энергия инициирования сферической детонации рассчитывается по формуле [16]:

$$E_c = P_0 R_c^3, \quad (5)$$

где  $P_0$  – начальное давление в смеси,  $R_c$  - критический радиус, который на котором должна пройти волна необходимой интенсивности.

Величина критического радиуса определяется экспериментально, с учетом параметров источника инициирования. Например, в бензино-воздушной смеси при н.у. в случае инициирования с помощью ВВ  $R_c = 2,75$  м, а облаком пропано-воздушной смеси -  $R_c = 5,17$  м. Соответственно, критическая энергия инициирования детонации оказывается почти в 7 раз выше. При этом, соотношение  $E_c/R_c^3$  остается постоянным. Это соотношение характеризует объёмную мощность энерговыделения.

### **Выводы**

На основе анализа литературы выявлено оказывают влияние пространственных и временные характеристик выделения энергии на критическую энергию инициирования сферической детонации. Установлено, что с целью уменьшения энергозатрат на электродинамическое ускорение ударной волны при инициировании сферической детонации необходимо осуществить её доускорение на период прохождения волной критического радиуса..

Литература: 1. Сиротенко А.М., Довбня А.М., Стаховський О.В., Коритченко К.В. Застосування бронетанкової техніки для розмінування мінних полів об'ємним вибухом // *Механіка та машинобудування*. – 2006. - №1. – С.178-188. 2. Сиротенко А.Н., Довбня А.Н., Стаховський О.В., Корытченко К.В. Создание детонационно-способной смеси в газовой струе с приложением для разминирования мінних полів // *Механіка та машинобудування*. – 2006. - №1. – С.166-177. 3. Патент України на винахід № 78083 від 21.02.2005 МПК<sup>7</sup>: F41H11/12 Спосіб розмінування мінно-вибухових загороджень / Сиротенко А.М., Янчик О.Г., Стаховський О.В., Коритченко К.В., Ларин О.Ю. 4. Серпухов А.В., Сиротенко А.Н., Стаховський О.В., Корытченко К.В. Технические средства разминирования мінних полів взрывным способом // *Механіка та машинобудування*, Харків: ХПП. – 2007. - №1. – С.48-55. 5. Серпухов О.В. Спеціальне обладнання до бронетанкової техніки для розширення колійних проходів у мінно-вибухових загородженнях // *Системи обробки інформації*, Харків: ХУПС. – 2008. – С. 6. Нетлетон М. Детонация в газах: [монографія] / Нетлетон М.; пер. с англ. – М.: «Мир», 1989. – 278, [1] с. 7. Стаховський О.В., Корытченко К.В., Угрюмов М.Л., Скоб Ю.А. Способ инициирования детонации в неограниченном пространстве // *Системи обробки інформації: збірник наукових праць*. – Харків: Харківський університет повітряних сил імені Івана Кожедуба, 2008. – Випуск 2 (69). – С. 105 – 107. 8. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. Взрывные явления. Оценка и последствия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986.- Т.1.- 319с. 9. Knystautas R., Lee J.H. On effective energy for direct initiation of gaseous detonations // *Combustion and flame*. – 1976. – Vol.27. – P.221-228. 10. Васильев А.А., Григорьев В.В. Крити-

ческие условия распространения газовой детонации в резкорасширяющихся каналах // Физика горения и взрыва. – 1980. - №4. –С.117-125. 11. Alekseev V.I., Dorofeev S.B., Sidorov V.P., Chaivanov B.B. Experimental study of large-scale unconfined fuel spray detonation / Progress in astronautics and aeronautics. – 1993. - № 154. – С.95-104. 12. Зельдович Я.Б., Когарко С.М., Симонов Н.Н. Экспериментальное исследование сферической детонации // Журнал технической физики. – 1956. - Т.26, № 8. - С.1744-1759. 13. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: АН СССР, 1960. – 428с. 14. Patent USA No 4621577, Int. Cl.<sup>4</sup> F42B 3/14. Miniature plasma accelerating detonator and method of detonating insensitive materials / Jr. R. W. Bickes, M. R. Korpzewski, A. C. Schwarz. – 15p. 15. Васильев А.А., Григорьев В.В. Критические условия распространения газовой детонации в резкорасширяющихся каналах // Физика горения и взрыва. – 1980. - №4. –С.117-125. 16. Alekseev V.I., Dorofeev S.B., Sidorov V.P. Direct initiation of detonation in unconfined gasoline sprays / Shock waves. – 1996. - № 6. – С.67-71.

Стаховський О.В

#### ІНІЦІУВАННЯ ДЕТОНАЦІЇ У НЕОБМЕЖЕНОМУ ОБ'ЄМІ

Шляхом огляду науково-технічних джерел виявлені критичні параметри ініціювання детонації у необмеженому об'ємі. З'ясовано вплив просторових і часових характеристик виділення енергії на критичну енергію ініціювання сферичної детонації.

Stahovskiy O.V.

#### INITIATION OF DETONATION IN UNCONFINED VOLUME

By the review of scientific and technical sources the critical parameters of detonation initiation are searched out in an unconfined volume. Influence of spatial and time features of energy deposition on critical energy of initiation of spherical detonation is found out.

---