

УДК 662.12.16.531.43

**В. В. Козлов**, доктор технических наук, профессор, Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ**В. И. Ладанов**, Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ**А. Л. Погудин**, кандидат технических наук, Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ**В. Г. Шереметьев**, Пермский военный институт внутренних войск МВД РФ

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ И ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ЗАЖИГАТЕЛЬНЫМИ ФРАГМЕНТАМИ

*Рассмотрены условия и критерии инициирования газовых и топливно-воздушных смесей зажигательными элементами.*

**Ключевые слова:** зажигательный элемент, инициирование, горение.

Поражение ряда объектов может быть достигнуто при инициировании взрывчатого превращения объемно-детонирующей смеси (ОДС), образованной в результате «выбрасывания» горючего из пробитой высокоскоростным элементом (осколком) емкости (топливного бака, авто- или железнодорожной цистерны, складских емкостей и т. д.).

Одним из способов, представляющим практический интерес, является инициирование топливно-воздушных смесей (ТВС) углеводородов. Оценим условия инициирования ТВС углеводородов компактными зажигательными элементами, образующимися при взрыве боеприпасов многофакторного действия [1]. Для этого рассмотрим критические условия инициирования ТВС, т. е. условия инициирования от элементов максимального размера с максимальной температурой. Такими элементами являются зажигательные элементы сферической и желудеобразной форм.

Зажигательный элемент представляет собой нагретое до определенной температуры тело, движущееся с определенной скоростью в парогазовой среде. На его поверхности происходят реакции окисления с поглощением окислителя и выделением тепла. Если учесть, что выделяющееся в результате окисления тепло компенсирует часть тепла, отводимого от элемента за счет теплообмена с окружающей средой, можно температуру элемента принять постоянной во времени и рассматривать процесс как стационарный. Учитывая химические свойства окислов оказывать диффузионное сопротивление кислороду [2, 3], считаем, что его концентрация на поверхности зажигательного элемента, покрытой окислом, мало отличается от концентрации кислорода в среде.

Если пренебречь падением концентрации окислителя у поверхности элемента и связанными с этим диффузионными процессами, задача сводится к инициированию ТВС накаливаемым телом, осуществленному Я. Б. Зельдовичем. Данная постановка задачи необходима для определения критических условий инициирования ТВС зажигательным элементом. Учет падения концентрации окислителя за счет реагирования с металлическим горючим (оболочкой

элемента) приведет к снижению вероятности инициирования ТВС.

Согласно теории Я. Б. Зельдовича ход реакции взаимодействия горючего с окислителем в приповерхностной зоне толщиной  $\xi$  определяется следующим уравнением:

$$\lambda \frac{dT}{dx^2} + qW(T) = 0, \quad (1)$$

где  $W(T) = K_0 C_0^{\nu} e^{-\frac{E}{RT}}$  – скорость реакции, м/с;  $q$  – тепловой эффект реакции, Дж;  $T$  – температура, К;  $C_0$  – концентрация;  $\nu$  – порядок реакции;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м.

Решение задачи для поджигания телом сферической формы в потоке выглядит следующим образом:

$$\frac{d}{Nu} \frac{T_0 - T_k - T_s}{T_k - T_0} = \frac{1}{\sqrt{c_0 k}} e^{\frac{E}{2RT_s}}, \quad (2)$$

где  $d$  – приведенный диаметр зажигательного элемента, м;  $T_s$  и  $T_k$  – температура зажигательного элемента и адиабатическая температура горения, К;  $Nu$  – критерий Нуссельта.

С увеличением скорости потока или, что то же самое, с увеличением скорости зажигательного элемента относительно среды критерий  $Nu$  возрастает и возможность поджигания уменьшается. Это означает, что более высокой способностью к поджиганию обладает зажигательный элемент (вторичные осколки), движущийся с небольшими скоростями (в пределе  $\nu = 0$ ). Таким образом, наибольшую способность к инициированию имеет остановившийся элемент (например, после соударения со стенкой цистерны или резервуара с горючим), и критические условия инициирования необходимо находить для случая  $\nu = 0$ .

Теория Я. Б. Зельдовича дает решение в следующем виде:

$$r = \sqrt{\frac{\lambda (T_s - T_0)^2 E}{2q W(T_s) RT_s^2}}, \quad (3)$$

где  $r$  – приведенный радиус зажигательного элемента, м.

По этому уравнению ищем критический размер зажигательного элемента, обладающего температурой  $T_s$  для поджигания парогазовой смеси с тепловым эффектом горючего  $q$  и скоростью реакции  $W$ . Если найденный размер зажигательного элемента окажется для данной смеси лежащим в пределах реальных размеров элементов  $r$ , обеспечивающих иницирование смесей, значит, зажигательные элементы, образующиеся при взрыве, способны иницировать данную смесь. Если этот размер существенно меньше  $r$ , смесь иницироваться не будет. Температуру для нахождения критических условий иницирования берем максимальной для зажигательных элементов.

Все величины, входящие в правую часть уравнения, кроме скорости горения смеси  $W(T)$ , – табличные данные. Величина  $W(T)$  меняется в зависимости от концентрации, давления, температуры:

$$W(T) = K_0 e^{\frac{E}{RT}} c_r c_{ок}, \quad (4)$$

где  $c_r$  и  $c_{ок}$  – концентрации горючего и окислителя соответственно.

Считаем наиболее вероятным иницирование смеси при соотношении окислителя и горючего, равного стехиометрическому. При стехиометрическом соотношении для углеводородных смесей скорость распространения пламени, как известно [4], максимальна. Значения кинетических констант  $\varepsilon$  и  $K_0$  находят обычно по данным скорости распространения пламени. Энергия активации – табличная величина [5]. Значения  $K_0$  лежат в пределах  $10^{11} \dots 10^{14}$ .

Для нахождения  $K_0$  можно воспользоваться данными о скорости распространения пламени. Задача для распространения пламени дает решение

$$u_n = 0,23 \sqrt{\frac{\lambda K_0 T_0}{c_p \rho T_k^5} e^{1,5 \frac{E}{RT_k}}}. \quad (5)$$

Здесь принято, что реакция идет по первому порядку:

$$T_k = T_0 + \frac{qc_r}{\rho c_v}, \quad (6)$$

где  $T_k$  – адиабатическая температура горения, К;  $T_0$  – начальная температура смеси, К;  $c_r$  – концентрация горючего, кг/м<sup>3</sup>;  $c_v$  – теплоемкость смеси, Дж/К;  $q$  – тепловой эффект реакции, Дж.

Можно считать, что реакция идет по первому порядку, если одно из веществ, входящих в состав смеси, не соответствует стехиометрическому условию. В связи с этим  $K_0$  рассчитывается вблизи границ (нижней или верхней) распространения пламени, а порядок реакции первый. Для углеводородных топлив считается [4], что на границах воспламенения

ТВС скорости реакции горения составляют  $\approx 0,15 \dots 0,2$  м/с, что позволит находить значения  $K_0$  при отсутствии данных о скорости реакции горения.

Таким образом, подставляя значение

$$K_0 = \frac{u_n^2 c_p \rho T_k^5 e^{1,5E/RT_k}}{0,53\lambda T_0^5} \quad (7)$$

в уравнение (4), можно определить критическое условие поджигания:

$$r = 0,23 \sqrt{\frac{\lambda^2 (T_s - T_0)^2 T_0^5 e^{-E/RT_s} E}{u_n^2 c_p \rho T_k^5 e^{1,5E/RT_k} c_r c_{ок} R T_s^2}}. \quad (8)$$

По выведенному условию оценена возможность иницирования зажигательными элементами ацетилена и паровоздушных смесей ацетона, бензола, Н-гексана.

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям [2, 3] установлено, что зажигательные элементы способны иницировать: ацетилен (расчетный диаметр 0,37 мм меньше максимального размера зажигательных элементов); ацетон (расчетный диаметр должен быть не менее 9,2 мм); паровоздушную смесь бензола (расчетный диаметр должен быть не менее 4,6 мм); Н-гексана (расчетный диаметр должен быть не менее 6,8 мм), что значительно больше реального размера фрикционной искры, которые находятся в интервале от 0 до 1 мм [3]. Теоретические расчеты подтверждаются результатами эксперимента.

Таким образом, теоретическая оценка поджигающей способности зажигательных элементов на основании теории Я. Б. Зельдовича о поджигании накалившимся телом может использоваться в качестве критерия определения иницирующей и зажигательной способности компактных зажигательных элементов при контакте с топливно-воздушными и газовыми горючими смесями.

#### Библиографические ссылки

1. Козлов В. В., Рыбаков А. П. Баллистические и термические воздействия на объекты технических систем с горюче-насыщенными материалами : монография. – Пермь : Изд-во «ОТ и ДО», 2010.
2. Взрывоопасность электрических разрядов и фрикционных искр / под ред. В. С. Кравченко, В. А. Бондаря. – М. : Недра, 1976.
3. Окисление металлов / под ред. Ж. Бенара. – Т. 2. – М. : Металлургия, 1969.
4. Хитрин Л. Н. Физика горения и взрыва. – М. : Изд-во МГУ, 1956.
5. Щетинков Е. С. Физика горения газов. – М. : Наука, 1965.
6. Леонова Л. Ю., Курятников В. В., Спиридонов Я. Н. Определение температуры и кинетических характеристик частиц стали, диспергированной фрикционным способом // Физика аэродисперсных систем. – Киев ; Одесса : Вища шк. Головное изд-во, 1981. – Вып. 21.

*V. V. Kozlov*, DSc in Engineering, Professor, Perm Military Institute of Internal Troops of the Ministry for Internal Affairs of Russian Federation

*V. I. Ladanov*, Perm Military Institute of Internal Troops of the Ministry for Internal Affairs of Russian Federation

*A. L. Pogudin*, PhD in Engineering, Perm Military Institute of Internal Troops of the Ministry for Internal Affairs of Russian Federation

*V. G. Sheremetyev*, Perm Military Institute of Internal Troops of the Ministry for Internal Affairs of Russian Federation

### **Initiation of Gas and Fuel and Air Mixtures by Incendiary Fragments**

*Conditions and criteria of initiation of gas and fuel and air mixtures by incendiary elements are considered in the paper.*

**Key words:** incendiary element, initiation, burning.