

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
В ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ
ВЗРЫВОМ СФЕРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ТНТ**

В. А. Левин, В. В. Марков, С. Ф. Осинкин

*НИИ механики при МГУ,
119899 Москва*

Рассматривается процесс прямого инициирования детонации взрывом заряда тротила в смеси водорода с воздухом. Численно с использованием конечно-разностного метода, основанного на схеме С. К. Годунова, с учетом реальной химической кинетики горения водорода в воздухе и реального уравнения состояния для газообразных продуктов взрыва тротила определена критическая масса инициирующего заряда. Рассмотрен вопрос о применимости уравнения состояния совершенного газа к продуктам взрыва тротила. Определено эффективное значение показателя адиабаты Пуассона.

При инициировании детонации концентрированным подводом энергии [1] (частный случай — взрыв твердого ВВ) подводимая энергия должна превосходить некоторое минимальное (критическое) значение, существование которого доказано в ряде экспериментальных и теоретических работ [2–13]. Если энергия взрыва больше этой минимальной, то формируется течение с пульсирующей детонационной волной. В противном случае образовавшаяся при взрыве пересжатая детонационная волна (ДВ) с течением времени распадается на затухающую ударную волну (УВ) и фронт медленного горения [5, 7].

В настоящей работе определяется критическая энергия инициирования детонации при нормальных условиях в стехиометрической смеси водорода с воздухом.

Постановка задачи. Пусть в некоторой области безграничного пространства, занятого смесью водорода с воздухом, в момент времени $t = 0$ происходит взрыв сферического заряда тротила. Предполагается, что тротил мгновенно переходит в газообразное состояние. При этом давление, плотность и внутренняя энергия в продуктах взрыва связаны соотношением [14]

$$\varepsilon = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho}, \quad (1)$$

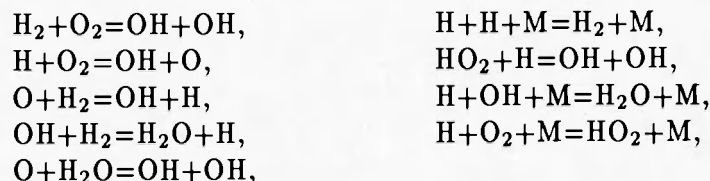
где $\gamma - 1 = (0,09 + 2\rho^2)/(0,3 + \rho^2)$; $[\rho]$ в г/см³. В результате взрыва на месте заряда возникает область с высокими давлением и плотностью ТНТ, которая мгновенно начинает распадаться с образованием сильно пересжатой ДВ, движущейся по окружающей заряд горючей смеси.

Система уравнений, описывающая одномерные нестационарные течения со сферическими волнами в общепринятых обозначениях, имеет вид

$$\begin{aligned} (\rho r^2)_t + (\rho u r^2)_r &= 0, \\ (\rho u r^2)_t + [(\rho u^2 + p)r^2]_r &= 2pr, \\ [(\rho u^2/2 + \rho h - p)r^2]_t + [(u^2/2 + h)\rho u r^2]_r &= 0, \\ (\rho r^2 n_i)_t + (\rho u r^2 n_i)_r &= \rho r^2 \omega_i, \end{aligned} \quad (2)$$

$$p = \rho RT \mu^{-1}, \quad h = \sum n_i h_i(T), \quad \mu^{-1} = \frac{\sum \alpha_i / \mu_i}{\sum n_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 7.$$

Зависимости $h_i = h_i(T)$ соответствуют [15]. Согласно [16], в условиях рассматриваемой задачи необходимо учитывать следующие элементарные стадии окисления водорода:



где М обозначает третью частицу. Соответствующие константы скоростей прямых реакций взяты из [16], а для обратных реакций вычислены по константам равновесия [15] (табл. 1).

Таблица 1

Реакция	$k_+ = AT^n \exp(E/RT)$			k_-		
	A	n	E	A	n	E
$\text{H}_2 + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{OH}$	$2,52 \cdot 10^9$	—	39300	$4,10 \cdot 10^6$	0,36	20194
$\text{H} + \text{O}_2 = \text{OH} + \text{O}$	$2,54 \cdot 10^{11}$	—	16800	$1,00 \cdot 10^9$	0,34	-230
$\text{O} + \text{H}_2 = \text{OH} + \text{H}$	$1,82 \cdot 10^7$	1	8900	$6,60 \cdot 10^6$	1,02	6826
$\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$2,19 \cdot 10^{10}$	—	5150	$4,20 \cdot 10^{12}$	-0,45	21638
$\text{O} + \text{H}_2\text{O} = \text{OH} + \text{OH}$	$6,77 \cdot 10^{10}$	—	18350	$1,28 \cdot 10^8$	0,47	-214
$\text{H} + \text{H} + \text{M} = \text{H}_2 + \text{M}$	$2,52 \cdot 10^{12}$	-1	—	$3,32 \cdot 10^{17}$	-1,40	106726
$\text{HO}_2 + \text{H} = \text{OH} + \text{OH}$	$2,50 \cdot 10^{11}$	—	1880	$1,95 \cdot 10^9$	0,38	40286
$\text{H} + \text{OH} + \text{M} = \text{H}_2\text{O} + \text{M}$	$1,40 \cdot 10^{17}$	-2	—	$3,54 \cdot 10^{24}$	-2,85	123214
$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} = \text{HO}_2 + \text{M}$	$1,50 \cdot 10^9$	—	-1000	$4,13 \cdot 10^{13}$	-0,42	47202

Примечание. Размерность константы скорости реакции второго порядка выражается в л/(моль·с), третьего порядка — в л²/(моль²·с), значения k_+ взяты из [16]. Значения k_- вычислены по константам равновесия [15].

Уравнения газовой динамики совместно с уравнениями химической кинетики (2) решались конечно-разностным методом, основанным на схеме С. К. Годунова [17] с подвижной разностной сеткой и явным выделением головной ударной волны и поверхности раздела между продуктами взрыва и смесью водорода с воздухом.

Результаты численного моделирования. Невозмущенное состояние водородовоздушной смеси определялось давлением $p_0 = 10^5$ Па и температурой $T_0 = 300$ К. Молярные доли водорода, кислорода и азота принимались равными соответственно $r_{\text{H}_2} = 0,286$, $r_{\text{O}_2} = 0,143$ и $r_{\text{N}_2} = 0,571$. Кроме того, использованы три разных значения для плотности тротила, соответствующих реальной (кусовой) плотности $\rho_{\text{ТР}} = 1,6$ г/см³, некоторой средней $\rho_{\text{ТР}} = 1,29$ г/см³ и насыпной плотности $\rho_{\text{ТР}} = 0,92$ г/см³. При этом энерговыделение на единицу массы тротила предполагалось равным $Q = 100$ ккал/кг.

Согласно расчетам, критические значения диаметра, массы и энергии оказались заключенными в следующих интервалах:

$$\begin{array}{ll} \rho_{\text{ТР}} = 1,6 \text{ г/см}^3 \text{ (плотность тротила)}, & 1,3 < d_* < 1,4 \text{ см}, \\ 1,84 < m_* < 2,30 \text{ г}, & 0,77 \cdot 10^4 < E_* < 0,96 \cdot 10^4 \text{ Дж}; \\ \rho_{\text{ТР}} = 1,29 \text{ г/см}^3 \text{ (средняя плотность)}, & 1,5 < d_* < 1,6 \text{ см}, \\ 2,28 < m_* < 2,77 \text{ г}, & 0,95 \cdot 10^4 < E_* < 1,15 \cdot 10^4 \text{ Дж}; \end{array}$$

$$\rho_{\text{тр}} = 0,92 \text{ г/см}^3 \text{ (насыпная плотность)}, \quad 1,7 < d_* < 1,8 \text{ см}, \\ 2,32 < m_* < 2,75 \text{ г}, \quad 0,97 \cdot 10^4 < E_* < 1,15 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Сравнивая полученные значения критических величин с экспериментальными результатами, отметим, что, согласно [18], в стехиометрической смеси водорода с воздухом при инициировании твердым ВВ на основе гексогена $E_* = 1,5 \cdot 10^4$ Дж. В [19] приведена кривая зависимости критической массы заряда ТНТ от молярной доли водорода в смеси с воздухом, $m_*(r_{\text{H}_2})$. К сожалению, масштаб построения кривой не позволяет с достаточной точностью определить по ней критическую массу заряда для стехиометрической смеси, но в работе приведено значение критической массы заряда для смеси с молярной долей водорода, равной 35 %. Утверждается, что при этом составе достигается минимальное значение $m_* = 1,86$ г. Ниже, для сравнения приведены интервалы, в которых находятся критические величины, полученные в результате расчетов для смеси с $r_{\text{H}_2} = 0,35$, $r_{\text{O}_2} = 0,13$, $r_{\text{N}_2} = 0,52$ при нормальных условиях и разных плотностях заряда:

$$\rho_{\text{тр}} = 1,6 \text{ г/см}^3, \quad 1,2 < d_* < 1,3 \text{ см}, \\ 1,45 < m_* < 1,84 \text{ г}, \quad 0,60 \cdot 10^4 < E_* < 0,77 \cdot 10^4 \text{ Дж}; \\ \rho_{\text{тр}} = 1,29 \text{ г/см}^3, \quad 1,3 < d_* < 1,4 \text{ см}, \\ 1,48 < m_* < 1,85 \text{ г}, \quad 0,62 \cdot 10^4 < E_* < 0,77 \cdot 10^4 \text{ Дж}; \\ \rho_{\text{тр}} = 0,92 \text{ г/см}^3, \quad 1,5 < d_* < 1,6 \text{ см}, \\ 1,59 < m_* < 1,93 \text{ г}, \quad 0,66 \cdot 10^4 < E_* < 0,81 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Видно, что расчетное значение m_* близко к экспериментальному.

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчетов при нормальных условиях в стехиометрической смеси с использованием в уравнении состояния (1) величины $\gamma = \text{const}$. Из результатов следует, что существует эффективное значение $\gamma_{\text{эф}}$, при котором в расчетах получаются те же самые значения критических величин, что и при реальном уравнении состояния с $\gamma = \gamma(\rho)$. Но, как видно из таблиц, это эффективное значение зависит от начальной плотности заряда, а при фиксированной плотности существуют по меньшей мере два таких значения. Например, если $\rho_{\text{тр}} = 1,6 \text{ г/см}^3$, то можно взять $\gamma_{\text{эф}} = 1,5$ или 2,2.

Таблица 2

$\rho_{\text{тр}}$	d_* , см при γ					
	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8
1,6	1,5-1,6	1,4-1,5	1,4-1,5	1,3-1,4	1,3-1,4	1,3-1,4
1,29	1,6-1,7	1,6-1,7	1,5-1,6	1,4-1,5	1,4-1,5	1,4-1,5
0,9	1,9-2,0	1,8-1,9	1,7-1,8	1,6-1,7	1,6-1,7	1,6-1,7

Окончание табл. 2

$\rho_{\text{тр}}$	d_* , см при γ					
	1,9	2,0	2,2	2,3	2,6	3,0
1,6	1,3-1,4	1,3-1,4	1,3-1,4	1,4-1,5	1,4-1,5	1,4-1,5
1,29	1,4-1,5	1,5-1,6	1,5-1,6	1,5-1,6	1,5-1,6	1,5-1,6
0,9	1,6-1,7	1,6-1,7	1,6-1,7	1,7-1,8	1,7-1,8	1,7-1,8

Таблица 3

$\rho_{тр}$	m , г при γ			
	1,2	1,3	1,4	1,5
1,6	2,83-3,43	2,30-2,83	2,30-2,83	1,84-2,30
1,29	2,77-3,33	2,77-3,33	2,28-2,77	1,85-2,28
0,9	3,23-3,77	2,75-3,23	2,32-2,75	1,93-2,32

Окончание табл. 3

$\rho_{тр}$	$E \cdot 10^{-4}$, Дж при γ			
	1,2	1,3	1,4	1,5
1,6	1,18-1,43	0,96-1,18	0,96-1,18	0,77-0,96
1,29	1,16-1,39	1,16-1,39	0,95-1,16	0,77-0,95
0,9	1,35-1,58	1,15-1,35	0,97-1,15	0,81-0,97

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-17646).

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987.
2. Зельдович Я. Б., Когарко С. М., Симонов Н. Н. Экспериментальное исследование сферической газовой детонации // Журн. техн. физики. 1956. Т. 26, № 8. С. 1744-1769.
3. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. Исследование сферической детонации газовых смесей // Науч. техн. проблемы горения и взрыва. 1965. Т. 1, № 2. С. 22-35.
4. Knystautas R., Lee J. H. On the effective energy for direct initiation of gaseous detonations // Combust. and Flame. 1976. V. 27, N 2. P. 221-228.
5. Lee J. H. Initiation of gaseous detonation // Ann. Rev. Phys. Chem. 1977. V. 28. P. 75-104.
6. Fickett W., Jacobson J. D., Schott G. L. Calculated pulsating one-dimensional detonations with induction-zone kinetics // AIAA Journal. 1972. V. 10, N 4. P. 514-516.
7. Левин В. А., Марков В. В. О возникновении детонации при концентрированном подводе энергии // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1974. № 5. С. 89-93.
8. Левин В. А., Марков В. В. Возникновение детонации при концентрированном подводе энергии // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 4. С. 623-633.
9. Sichel M. A simple analysis of the blast initiation of detonation // Acta Astron. 1977. V. 4, N 3-4. P. 409-424.
10. Васильев А. А., Николаев Ю. А., Ульяницкий В. Ю. Критическая энергия инициирования многофронтной детонации // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 94-104.
11. Abouseif G. E., Toong T. Y. On direct initiation of gaseous detonations // Combust. and Flame. 1982. V. 45, N 1. P. 39-46.
12. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Моделирование инициирования детонации в горючей смеси газов электрическим разрядом // Хим. физика. 1984. Т. 3, № 4. С. 611-614.
13. Левин В. А., Марков В. В., Осинкин С. Ф. Прямое инициирование детонации в смеси водорода с кислородом, разбавленной азотом // Изв. Рос. акад. наук. Механика жидкости и газа. 1992. № 6. С. 151-156.
14. Брод Г. Л. Расчеты взрывов на ЭВМ. Газодинамика взрывов. М.: Мир, 1976.

15. **Термодинамические свойства индивидуальных веществ.** Справ. / Под ред. В. П. Глушко, Л. В. Гурвича, Г. А. Хачкурузова и др. М., 1962. Т. 2.
16. **Takai R., Yoneda K., Nikita T.** Study of detonation wave structure // 15th Symp. (Int.) on Combust. Tokyo, 1974. Pittsburgh: The Combust. Inst. 1975. P. 69-78.
17. **Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П.** Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отшедшей ударной волной // Журн. вычисл. математики и матем. физики. 1961. Т. 1, № 6. С. 1020-1050.
18. **Бохон Ю. А., Шулепин Ю. В.** Минимальная энергия инициирования сферической газовой детонации некоторых смесей водорода // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245, № 3. С. 623-625.
19. **Макеев В. И., Гостинцев Ю. А., Строгонов В. В. и др.** Горение и детонация водородно-воздушных смесей в свободных объемах // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 16-18.

Поступила в редакцию 12/1 1994 г.
