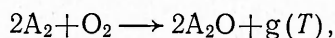


## О ПРИРОДЕ ВОЛН СЖАТИЯ ЗА ФРОНТОМ ДВУХФАЗНОЙ ДЕТОНАЦИИ

Э. А. Антонов, А. М. Гладиллин, Н. А. Смирнов

Теоретическое рассмотрение детонационного процесса в двухфазных средах [1—3] и результаты экспериментов [4] показывают наличие за фронтом детонационной волны, в зоне химической реакции, волны сжатия и других структурных особенностей, природа которых полностью не выяснена. В [1] предполагается, что образование волны сжатия вызвано в основном увеличением плотности газа за счет интенсивного испарения частиц, а в [3] — торможением газа частицами в результате несовпадения скоростей движения фаз. В данной работе рассматривается влияние, оказываемое силой сопротивления между фазами и продуктами испарения материала частиц на поведение параметров газа в зоне химической реакции за фронтом двухфазной детонации, которая распространяется по смеси частиц горючего с газообразным окислителем.

Пусть химическая реакция, протекающая между испарившимся материалом частиц и газообразным окислителем, имеет вид



где  $A$  — элемент, из которого состоят частицы;  $g(T) = g_0 - k(T - T_0)$  — тепловой эффект химической реакции, зависящий от температуры. Найдем скорость стационарного режима и структуру зоны химической реакции рассматриваемой двухфазной детонации.

Поставленная задача отличается от рассмотренной в [2] только граничным условием для первой фазы на фронте детонационной волны.

Вместо используемых в [2] формул для фронта пересжатой детонации здесь необходимо употребить соотношения, связывающие параметры фронта ударной волны со скоростью ее распространения  $D$ :

$$p = p_0 [(1 + h) M_0^2 - h],$$

$$\rho = \rho_0 M_0^2 [(1 - h) + h M_0^2]^{-1}, \quad (1)$$

$$u = c_0 (1 - h) [M_0 - 1/M_0],$$

где  $p$ ,  $\rho$ ,  $u$  — давление, плотность и скорость газа;  $M_0 = D/c_0$  — число Маха;  $c$  — скорость звука в газе;  $h = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$ . Индексом 0 обозначены параметры невозмущенного газа перед фронтом.

Стационарный режим и структура зоны химической

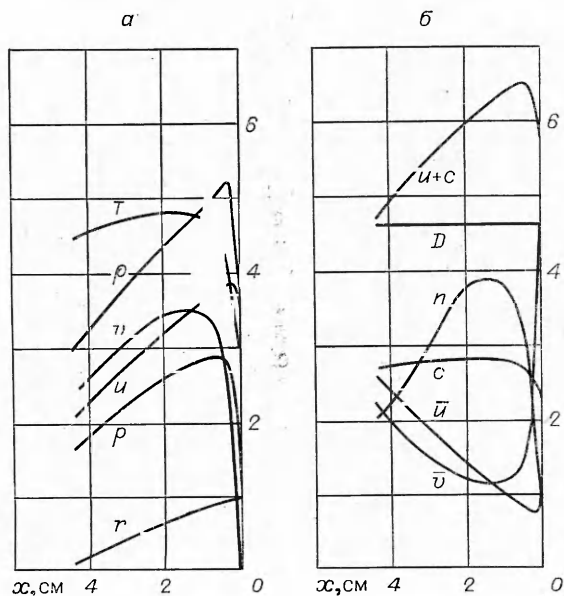


Рис. 1.

реакции двухфазной детонации находились численным методом, описанным в [2], с учетом граничного условия (1). На рис. 1 приведены результаты численного расчета структуры зоны химической реакции для

детонации смеси частиц горючего с начальным радиусом  $r_0 = 2,5 \cdot 10^{-6}$  м и  $g_0 = 50$  ккал/моль с газообразным кислородом, находящимся при атмосферном давлении. Величины  $v$ ,  $n$ ,  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$  обозначают соответственно скорость частиц, число частиц в единице объема, скорости газа и частиц в системе координат, связанной с фронтом. Все результаты на этом и последующих рисунках представлены в безразмерном виде, причем фронт детонационной волны совпадает с началом системы координат, а ось  $x$  направлена в глубь зоны химической реакции. Приведение к безразмерному виду осуществлялось по схеме  $z = \bar{z}/z'$ , где  $\bar{z}$  — размерная величина, а  $z'$  — ее размерный эталон. Размерные эталоны приведенных на рис. 1–3 параметров имеют следующие значения:  $u' = v' = c' = D' = 250$  м/с;  $p' = 10,13 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;  $T' = 300$  К;  $\rho' = 1,6$  кг/м<sup>3</sup>;  $n'$  — начальная концентрация частиц;  $r'$  — начальный радиус частиц.

Из рис. 1 видно, что за фронтом детонационной волны образуются резко выраженные максимумы плотности, скорости, давления и температуры газа. Скорость самоподдерживающегося стационарного режима  $D$  составляет 4,64 (1160 м/с). Несовпадение скоростей  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$ , а также  $\bar{u}$  и  $c$  в конце зоны химической реакции связано с тем, что численные расчеты проводились не до полного испарения частиц, определяемого условием  $r = 0$ , а до точки  $r = 0,05$ .

Для выяснения природы представленных на рис. 1 структурных особенностей зоны химической реакции двухфазной детонации положим силу сопротивления, возникающую между газом и частицами в результате несовпадения скоростей движения фаз, равной нулю. Результаты численного расчета этого варианта представлены на рис. 2. Здесь изображены только параметры газа, так как поведение покоящихся частиц очевидно. Отсутствие торможения газа на частицах приводит к исчезновению и волны сжатия. Ширина зоны химической реакции при этом увеличивается, поскольку скорость частиц относительно детонационного фронта  $\bar{v}$  в данном случае превышает среднюю скорость  $\bar{v}$  в варианте, изображенном на рис. 1. За счет уменьшения потерь энергии на разгон частиц скорость детонационной волны  $D$  увеличивается и составляет 4,9 (1225 м/с). Небольшое увеличение давления и плотности газа, наблюдаемое в глубине зоны химической реакции на рис. 2, связано с торможением газа продуктами испарения материала частиц и увеличением плотности газа испаряющимися частицами.

Если положить одновременно силу сопротивления и массу испаряющихся частиц равными нулю и учитывать только тепловой эффект химической реакции, то получим картину, изображенную на рис. 3, которая дает структуру зоны реакции однофазной детонации Чепмена — Жуге;  $D = 0,504$  (1260 м/с).

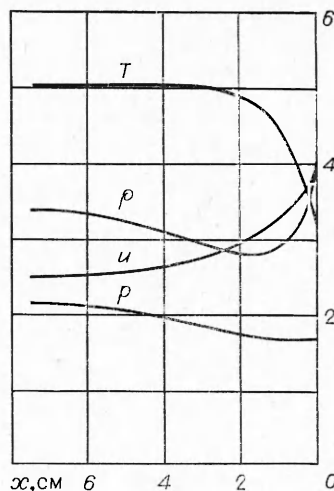


Рис. 2.

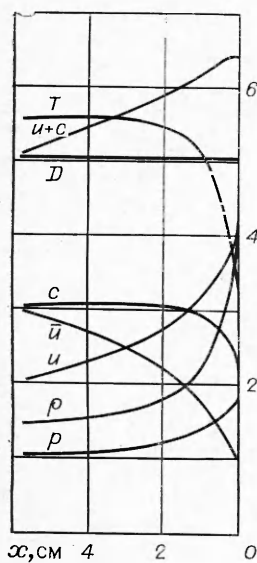


Рис. 3.

Таким образом, из полученных результатов следует, что основной причиной образования волны сжатия за фронтом двухфазной детонации является торможение газа испаряющимися частицами.

СевНИИГиМ,  
Ленинград

Поступила в редакцию  
13/VIII 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. А. Антонов, А. М. Гладиллин. МЖГ, 1972, 5.
2. А. М. Гладиллин. ФГВ, 1975, 11, 3.
3. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. ФГВ, 1970, 6, 3.
4. Т. Н. Pierce, I. A. Nicholls. Astron. Acta, 1972, 17, 4/5.

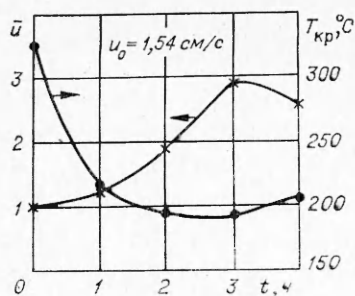
### ИЗУЧЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ЦИРКОНИЯ. II. «АКТИВИРОВАННОЕ» ГОРЕНИЕ Zr В АЗОТЕ

У. И. Гольдшлегер, В. И. Розенбанд

При исследовании влияния предварительной обработки циркония на его воспламенение в кислороде было обнаружено, что увеличение содержания растворенного в металле кислорода ухудшает коррозионную стойкость циркония, облегчая его воспламенение [1]. В данной работе изучалось влияние растворенного газа на закономерности горения циркония.

Поскольку горение металла в атмосфере кислорода высокого давления связано с определенными техническими трудностями, исследовалось горение циркония в азоте. Азот аналогично кислороду имеет в цирконии широкую область растворимости [2], и это также приводит к заметному ухудшению коррозионной стойкости циркония [3]. Кроме того, при нагреве циркония в вакууме или инертном газе (при  $\sim 500^\circ\text{C}$ ) нитридная пленка также растворяется в металле, приводя к увеличению количества растворенного азота.

Для изучения влияния растворенного в цирконии азота на его воспламенение и горение таблетки циркония азотировались до массового содержания азота 0,25% (начальное содержание азота в порошке 0,15%). Затем проводился их вакуумный отжиг при давлении  $10^{-4}$  мм рт. ст. и температуре  $560^\circ\text{C}$ . На рисунке показана зависимость критической температуры воспламенения  $T_{кр}$  от длительности вакуумного отжига  $t$ , полученная в токе кислорода



на термовесах для таблеток Zr (диаметр 3 мм, масса 0,1 г). Растворенный азот значительно облегчает последующее воспламенение циркония, причем вид кривой  $T_{кр}(t)$  аналогичен полученной при растворении кислорода [1]. Минимальная температура воспламенения достигается при большем по сравнению с кислородом времени отжига ( $\sim 3$  ч), что, вероятно, обусловлено меньшей скоростью диффузии азота в цирконии.