

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 662.311.1

ГОРЕНИЕ ДИНЫ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В. В. Александров, А. В. Болдырева, В. В. Болдырев, Р. К. Тухтаев
(Новосибирск)

В работе [1] изучено горение дины в азоте при давлениях от 1 до 100 ата и начальных температурах 20 и 55°C. Полученные результаты (температурные профили, кинокадры и т. п.) представляют значительный интерес, поскольку дина относится к медленногорящим ВВ, у которых протяженность зон в волне горения увеличена. Это существенно облегчает наблюдение и регистрацию явлений в отдельных зонах и открывает возможность углубления представлений о механизме горения.

Образцы (относительная плотность 0,96—0,97) готовились заливкой расплавленной дины в стеклянные трубочки диаметром от 6 до 32 мм, высотой 30 мм и толщиной стенок ~1 мм. Образцы зажигались нихромовой спиралью, которая после воспламенения убиралась. Скорость горения рассчитывалась по времени прохождения фронтом горения расстояния 10 и 20 мм. Погрешность измерения скорости в проведенных опытах не превышала 2—3%.

Для опытов, в которых записывались профили температуры, дина заливалась в составные трубочки, склеенные из колец высотой ~10 мм. Между кольцами натягивались манганин-константановые термодпары, сваренные из проволочек диаметром 20 мк. Термо-э. д. с. в ходе опыта регистрировалась с помощью шлейфового осциллографа Н-700 с гальванометрами 1-го класса (рабочая полоса частот 0—40 гц).

Поскольку сведения о критических диаметрах горения дины в стеклянных трубках противоречивы (по данным [2], полученным при сжигании конических зарядов на воздухе, $d_{кр}=9,5$ мм, в работе [1] в азоте устойчиво горели образцы диаметром 9 мм), вначале изучалась зависимость скорости горения от диаметра (рис. 1). Стационарное горение (отсутствие погасания на образцах высотой 30 мм) становится возможным лишь при диаметрах ≥ 13 мм. При увеличении диаметра до 18 мм скорость горения возрастает до 0,13 мм/с и в дальнейшем остается неизменной. Это существенно отличается от данных работ [2] ($u=0,51$ мм/с) и [1] ($u=0,38$ мм/с).

Расхождение с результатами [1] не может быть объяснено отличием газовой атмосферы, так как контрольные сжигания в слабом потоке N_2 , CO_2 , Ar и He (для этого образцы помещались в стеклянную трубку диаметром 100 мм) показали, что скорость горения не зависит от природы окружающего газа.

По результатам визуальных наблюдений картина горения дины, описанная в [1], может быть дополнена следующими деталями.

Жидкий поверхностный слой состоит из двух частей: нижнего прозрачного подслоя шириной ~1 мм и верхнего вспененного шириной ~2 мм. В ходе горения жидкий слой интенсивно перемешивается пузырьками газа, образующимися на границе раздела твердая фаза—расплав. Характер перемешивания ламинарный в прозрачном подслое и турбулентный в пенном. Мелкие соринки, случайно попавшие в образец, совершают хаотическое движение по всей высоте расплавленного слоя, проводя большую часть времени в пенном подслое.

Наличие перемешивания подтверждается также хаотическими колебаниями температуры, которые регистрируются на температурном профиле сразу же после расплавления дины (рис. 2). Протяженное плато и последующий резкий скачок объясняются прилипанием к термодпаре расплавленной дины за счет сил поверхностного натяжения. (Этот эффект был в свое время использован для измерения T_n при горении жидких и расплавляющихся ВВ [3]). По этой причине надежно измеряется температура поверхности ($T_n=230\pm 10^\circ C$, что совпадает с результатами работы [1]), но не удается получить достоверный ход температуры в приповерхностном слое газовой фазы. По-видимому, для этой области ближе к реальности запись температуры после скачка. Для градиента температуры в газовой фазе у поверхности, таким образом, получаем оценку ~4500 град/см.

По нашему мнению, отсутствие пульсаций и скачка в профилях температуры, полученных в [1], объясняется инерционностью регистрирующего прибора — электронного потенциометра ЭПП-09, рабочая полоса частот которого не превышает 1 гц (по заводскому описанию время пробега пером всей шкалы у ЭПП-09 ~ 1 с), а также меньшей чувствительностью вольфрам-рениевой термопары по сравнению с марганец-константановой.

Согласно теории Беляева — Зельдовича [4, 5], скорость горения вторичных ВВ определяется тепловыделением в газовой фазе. При этом тепловыделение в к-фазе считается пренебрежимо малым. Однако у ряда ВВ тепловыделение в конденсированной фазе значительно. Как показал К. К. Андреев [2], расчет скорости горения гексогена, тетрила и тэна в предположении о ведущей зоне в к-фазе дает лучшее согласие с экспериментом, нежели по формуле с газовой ведущей реакцией. Представляет интерес провести аналогичные расчетные оценки для дич. поскольку форма эксперименталь-

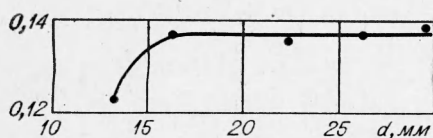


Рис. 1.

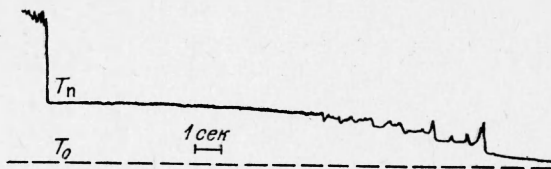


Рис. 2.

ных профилей температуры указывает на значительное тепловыделение в поверхностном жидком слое (см. рис. 2, а также [1]), ширина реакционной зоны в котором сравнима с зоной прогрева.

Скорость тепловыделения при температуре поверхностного слоя горячей дины (при $T=240^\circ\text{C}$) была измерена на импульсной калориметрической установке, которая аналогична описанной в [6, 7] и позволяет проводить измерения в атмосфере газов до давления 1 ата.

Величина скорости тепловыделения получилась равной ~ 30 кал/г · с, а суммарный тепловой эффект ~ 140 кал/г.

Подстановка измеренной скорости тепловыделения в формулу [8, 9]:

$$u = \frac{\sqrt{2\lambda\Phi RT_n^2 |E + \varphi^2}}{\rho [c(T_n - T_0) + L]}$$

дает в случае пренебрежения тепловым потоком из газовой фазы $u=0,07$ мм/с, что вдвое ниже экспериментальной величины. При расчете были взяты следующие значения физико-химических параметров: коэффициент теплопроводности $\lambda=5,57 \cdot 10^{-4}$ кал/см · с · град [10], удельная теплоемкость $c=0,27$ кал/г · град [10], теплота плавления $L=23,5$ кал/г [11], $E=35$ ккал/моль [10, 12], $\rho=1,6$ г/см³.

Если по участку профиля температуры после скачка (см. рис. 2) оценить тепловой поток из газовой фазы, взяв для газа $\lambda_g=2 \cdot 10^{-4}$ кал/см · с · град [13], то получается $\Phi=0,9$ кал/см² · с и с учетом этого потока $u=0,10$ мм/с. Как для тэна, гексогена и тетрила [2], в данном случае получилось хорошее согласие между рассчитанной и измеренной скоростями горения. Однако наше сопоставление выгодно отличается от предыдущих тем, что в формулу подставлялась скорость тепловыделения, которая измерена непосредственно при температуре поверхности, а не значение, рассчитанное путем экстраполяции результатов, полученных при медленном термическом разложении при температурах, лежащих на $80-100^\circ$ ниже температуры поверхности. Скорости тепловыделения, получаемые экстраполяцией низкотемпературных данных разных авторов [10, 12, 14] к температуре 240°C , различаются между собой более чем в 10 раз.

Необходимо отметить, что учет конвективного перемешивания в расплавленном слое должен увеличить эффективную теплопроводность и тем самым рассчитанное значение скорости горения.

Установленный факт конвективного перемешивания в расплавленном слое горячей дины имеет, на наш взгляд, важное значение для понимания и интерпретации экспериментальных данных, тем более, что подобное явление может иметь место и при горении других ВВ.

До сих пор считалось [2], что турбулизация поверхностного слоя при горении жидких и расплавляющихся ВВ должна приводить к нестационарностям типа погасания или пульсирующего горения, переходящего во взрыв. Факт стационарного горения дины при наличии хаотического конвективного перемешивания в поверхностном слое позволяет утверждать, что для перехода к нестационарному горению важно достижение некоторого критического уровня турбулентности.

Достижением критического уровня турбулентности в расплавленном слое можно объяснить погасание дины, наблюдавшееся в [1] при воздействии перегрузок. Возможно, что увеличение λ за счет конвективного перемешивания в поверхностном слое на-

ряду с низкотемпературными реакциями [15] может быть причиной увеличенной ширины прогретой зоны при горении нитроглицериновых порохов [13, 16] по сравнению с зоной Михельсона.

Авторы благодарны А. Г. Мержанову за помощь и ценные советы и В. С. Бабкину за полезные замечания.

Поступила в редакцию
17/VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Максимов, Ю. М. Максимов, В. Ф. Чуков. ФГВ, 1971, 7, 2, 197.
2. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966, стр. 110, 288, 300.
3. A. G. Whittaker, C. Varham. J. Phys. Chem., 1964, 68, 1, 196.
4. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1938, 12, 93.
5. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, вып. 11—12, 498.
6. В. В. Александров, В. Г. Морозов, С. С. Хлевной. ПМТФ, 1969, 5, 149.
7. В. В. Александров. Канд. дисс. ИХКГ СО АН СССР, Новосибирск, 1970.
8. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1965, 3, 43.
9. Э. В. Конев, С. С. Хлевной. ФГВ, 1966, 2, 3, 67.
10. D. Gross, A. V. Amster. 8-th Symp. (Intern.) on Comb., 1962, 728.
11. Е. Ю. Орлова. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960, стр. 298.
12. А. С. Штейнберг, Б. М. Слуцкер, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 6, 4, 464.
13. А. А. Зенин. ФГВ, 1966, 2, 3, 67.
14. Ф. И. Дубовицкий, Ю. И. Рубцов и др. ИАН, ОХН, 1960, 6, 1126.
15. А. А. Ковальский, Э. В. Конев, Б. В. Красильников. ФГВ, 1967, 3, 4, 547.
16. А. А. Зенин, О. И. Нефедова. ФГВ, 1967, 3, 1, 45.

УДК 662.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕСЖАТОЙ ДЕТОНАЦИИ ЖИДКИХ ВВ

*А. Н. Афанасенков, И. М. Воскобойников,
В. Г. Тарасов, В. Н. Шевелев
(Москва)*

При построении уравнения состояния плотных газов при высоких давлениях и температурах часто используются данные о параметрах детонации взрывчатых веществ. Обычно определяют зависимость давление — удельный объем ($p(v)$) продуктов взрыва (ПВ), получаемую при детонации одного ВВ различной начальной плотности, и несколько реже — энтропию ПВ взрывчатых веществ некоторой начальной плотности. Вследствие сложности выражений для давления, внутренней энергии и других термодинамических параметров этих данных оказывается недостаточно для нахождения неизвестных функций и коэффициентов в уравнении состояния.

Дополнительная информация о состоянии ПВ может быть получена при измерении температур детонации, но до сих пор такого измерения при различных давлениях и плотностях ПВ одного и того же ВВ не проводилось.

В настоящей работе эти измерения выполнены для режимов пересжатой детонации в нитрометане (НМ) и тетранитрометане (ТНМ). В контакте с торцевой поверхностью заряда мощного ВВ помещалось жидкое ВВ. Массовая скорость ПВ за фронтом детонационной волны мощного ВВ превосходит таковую в жидком ВВ при нормальном режиме детонации. Вследствие этого по жидкому ВВ на некоторое расстояние распространяется пересжатая детонация, скорость и давление которой зависят от параметров детонации мощного ВВ.

Скорости пересжатой детонации D измерялись оптическим методом, давление p и массовая скорость u определялись графическим способом на $p-u$ -диаграмме. Яркость свечения детонационного фронта пересжатой детонации регистрировалась элек-