

*И. Ю. Мальков***СОХРАНЕНИЕ УГЛЕРОДА ВО ВЗРЫВНЫХ КАМЕРАХ**

Экспериментально изучается сохранение конденсированного углерода, образующегося в результате взрыва в ограниченном объеме зарядов из ТГ 50/50, в зависимости от внешних условий охлаждения продуктов детонации. Получены данные для взрывов в атмосфере азота и в ледяной оболочке. Предложен простой метод сопоставления данных о выходе конденсированного углерода для различных способов сохранения продуктов детонации.

Знание состава продуктов взрыва (ПВ) имеет большое значение, поскольку позволяет непосредственно вычислять общий тепловой эффект реакций детонационного превращения, работоспособность зарядов ВВ, предоставляет исходный материал для проверки и корректировки термодинамических расчетов детонации.

Ранее определение состава ПВ обычно совмещалось с определением теплоты взрыва и проводилось на калориметрических установках с вакуумируемым рабочим объектом от единиц до нескольких десятков литров [1, 2]. Особое внимание уделялось определению состава газообразных продуктов взрыва, а количество образовавшегося конденсированного углерода (КУ) вычислялось из уравнений массового баланса.

Образовавшиеся в результате детонации продукты обладают, кроме тепловой, высокой кинетической энергией, и затем при торможении на стенках камеры происходит их разогрев, что вызывает [2] появление интенсивных «вторичных» эндотермических реакций, существенно изменяющих «замороженный» в результате расширения состав ПД.

В работах [1, 2] для подавления «вторичных» реакций заряды ВВ помещались в толстостенные оболочки, изготовленные из различных материалов. Так, в [1] приведены данные исследований детонации зарядов из тротила и гексогена в стеклянных и латунных оболочках, в [2] рассмотрен обширный спектр ВВ в оболочках из Ag, Al₂O₃, NaCl, Pyrex. Обнаружено, что с ростом мощности инициатора увеличиваются количество углерода в ПВ и отношение CO₂/CO. С появлением взрывных камер и особенно после обнаружения в ПВ ряда вторичных ВВ ультрадисперсной алмазной фазы углерода (УДА) проблема сохранения ПД вновь стала актуальной. Теперь исследователей прежде всего интересует количество выделившегося конденсированного углерода, его фазовый состав и морфология частиц.

При взрывах в герметичных взрывных камерах заряд ВВ помещают в массивную оболочку (вода, металлы) [3, 4] либо подрывают в среде инертных по отношению к углероду газов (инертные газы, азот, углекислый газ, газообразные продукты детонации) [5, 6], а также в пенах [7]. Имеющиеся в литературе данные по выходу конденсированного углерода для одних и тех же ВВ существенно разнородны, и это служит почвой для преждевременных выводов о тех или иных преимуществах одних способов охлаждения ПД (КУ, УДА) перед другими [4].

Цель данной работы — сравнение результатов, полученных с использованием единой экспериментальной методики, для двух существенно различных внешних условий охлаждения ПД: 1) газообразный азот, 2) массивная ледяная оболочка.

Эксперименты проводились в изготовленной из пержавеющей стали герметичной взрывной камере, $V_k = 0,17 \text{ м}^3$. Масса заряда ВВ $M_{ВВ} = 100 \text{ г}$, состав ТГ 50/50 (литой), бустер из окфола 10 г, высоковольтный детонатор ЛД-34 (массой 0,8 г).

В первом варианте (свободные заряды) взрывная камера перед подрывом вакуумировалась до остаточного давления $\sim 130 \text{ Па}$ и затем за-

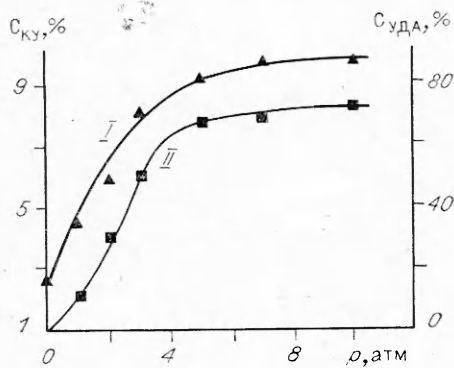


Рис. 1. Зависимости выхода конденсированного углерода (I) и содержание в нем алмазной фазы (II) от начального давления азота в камере.

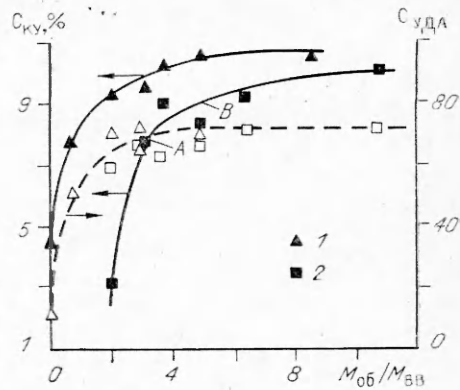


Рис. 2. Зависимости выхода конденсированного углерода и содержания в нем алмазной фазы от массы ледяной оболочки.

1 — азот; 2 — воздух.

полнялась газообразным азотом до заданного давления. Во втором варианте заряды перед подрывом помещались в изготовленные в специальных формах и охлажденные жидким азотом ледяные оболочки различного внешнего диаметра. Подрывы проводились в воздушной атмосфере или в газообразном азоте при нормальном давлении.

Спустя 30 мин после подрыва избыточное давление в камере медленно стравливалось через специальный клапан. Затем образовавшаяся шихта специальными щетками смывалась водой со стенок камеры в подставленные емкости. После длительного отстоя избыток воды удалялся, а оставшаяся влага выпаривалась в печи ($T \sim 250^\circ\text{C}$).

Углерод, водород и золу в предварительно высушенной шихте определяли зажиганием образца в токе газообразного кислорода при $T \approx 1000^\circ\text{C}$ в кварцевой трубке. Продукты сгорания доокислялись на слое катализатора $\text{ZrO}_2:\text{MgO}:\text{Ag}_2\text{WO}_4$ при $T \approx 750^\circ\text{C}$. Углерод и водород определяли в виде диоксида углерода и воды, золу — гравиметрически. Количества конденсированного углерода и УДА, выделившихся в эксперименте, принимались равными массовому содержанию углерода в образцах шихты и твердом остатке окисления шихты хлорной кислотой соответственно. Вклад бустера в КУ определялся в отдельных экспериментах и учитывался аддитивно.

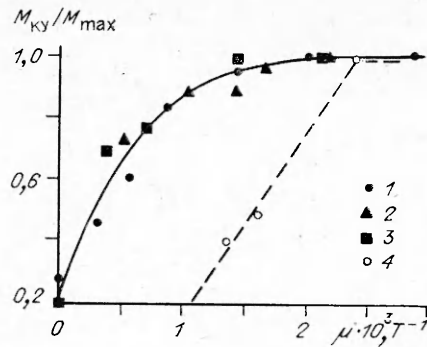
На рис. 1, 2 приведены полученные в данной работе экспериментальные данные относительного выхода КУ ($M_{\text{КУ}}/M_{\text{ВВ}}$) и содержания алмаза $C_{\text{УДА}}$ в конденсированном углероде ($M_{\text{УДА}}/M_{\text{КУ}}$) в зависимости от внешних условий охлаждения ПД.

Видно, что с увеличением давления азота в камере или массы ледяной оболочки выход КУ и $C_{\text{УДА}}$ увеличивается, а после достижения максимума остается неизменным. Используя оболочку, можно достаточно эффективно сохранять ПД в экспериментах, когда взрывная камера перед подрывом заполнена воздухом (рис. 2, 2). Некоторое снижение выхода КУ в этом случае объясняется тем, что заряд ВВ со стороны бустера остается свободным, в результате имеется непосредственный контакт горячих ПД с кислородом воздуха, что приводит к окислению части углерода.

Из сопоставления рис. 1, 2 видно, что, хотя предельное содержание УДА в КУ одинаково, выход КУ для двух способов охлаждения ПД отличается и составляет 9,6 и 10,4 % соответственно. Причиной этого может быть относительно неполное превращение поверхностного слоя заряда ВВ без оболочки, что существенно проявляется при малых диаметрах (из-за быстрой разгрузки с поверхности заряда).

Рис. 3. Относительный выход конденсированного углерода в зависимости от внешних условий охлаждения.

1 — свободный заряд, азот; 2 — заряд в ледяной оболочке, азот; 3 — данные из [6]; 4 — данные из [9].



Весь процесс взрыва заряда в камере можно разбить на качественно отличные стадии:

- 1) детонация заряда ВВ;
- 2) расширение продуктов детонации;
- 3) перемешивание и теплообмен ПД с охлаждающей средой;
- 4) остывание смеси ПВ и среды путем теплообмена со стенками камеры.

При расширении продуктов детонации в камере возникает сложное течение с циркуляцией сходящихся и расходящихся УВ, в которых может происходить их значительный перегрев [8]. Однако вследствие кратковременности этих процессов ожидать на этой стадии значительного изменения состава продуктов по сравнению со свободным расширением в неограниченный объем, по-видимому, не приходится из-за эффекта «заковки» ложного равновесия.

Наибольший интерес представляют следующие, более продолжительные стадии процесса взрыва, которые в настоящее время наименее изучены. Поскольку скорость и положение равновесия «вторичных» эндотермических реакций зависят от T , естественно в качестве характеристики эффективности охлаждения ПД при взрыве во взрывной камере, заполненной газообразной средой, выбрать общую теплоемкость газа в камере. Такой подход развивался на протяжении ряда лет в ИГиЛ СО РАН и НИО «Алтай».

Хотя временная зависимость процессов перераспределения энергии между ПД и внешней средой при разных способах охлаждения будет существенно отличаться, в первом приближении в качестве критерия оценки эффективности охлаждения в случае ледяной оболочки можно воспользоваться описанным выше подходом.

На рис. 3 приведена зависимость нормированного выхода конденсированного углерода $M_{КУ}/M_{max}$ от переменной μ . При взрыве свободного заряда $\mu = c_r \rho_0 V_{kp} / \rho_0 M_{ВВ} Q$, для зарядов в ледяной оболочке $\mu = (M_{об} c_{об} + \rho_0 V_{кр} c_r) / M_{ВВ} Q$. Здесь $M_{КУ}$ и M_{max} — текущий и максимальный выход углерода для данного способа охлаждения; p и p_0 — текущее и нормальное начальное давление газа в камере; ρ_0 , c_r — плотность и теплоемкость газа при нормальных условиях (для азота $\rho_0 = 1,25 \text{ кг/м}^3$, $c_r = 753,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$); Q — удельная теплота взрыва; $M_{об}$ — масса оболочки; $c_{об}$ — теплоемкость единицы массы оболочки.

Использование значений теплоемкости для нормальных условий является грубым приближением, однако такой подход позволяет просто и с достаточной для технических приложений точностью единым образом описать выход КУ в зависимости от массы ВВ, объема камеры и условий охлаждения.

Из рис. 3 видно, что экспериментальные точки, полученные для разных способов охлаждения, находятся вблизи одной кривой, и это можно рассматривать как факт в пользу сделанного выше предположения об определяющей роли поздних стадий взрыва на выход КУ во взрывных камерах. Для сравнения на рис. 3 нанесены данные по выходу КУ для зарядов из ТНТ/НГ 45/55 с близким к ТГ 50/50 кисло-

родным балансом (охлаждающая среда — газообразный аргон), приведенные в работе [6].

Оценка в рамках термодинамического подхода температуры для точек *A* и *B* рис. 2 в конце третьей стадии взрыва (до заметного теплообмена со стенками камеры) дает значения $T \approx 550$ и 450°C соответственно. Однако известно, что начало интенсивного окисления детонационного углерода кислородом воздуха при нормальном давлении происходит при $T \approx 350^\circ\text{C}$. Такое отличие может объясняться наличием большого количества водяного пара и быстрым спадом температуры в камере.

В работе [9] предпринята попытка путем равновесных термодинамических расчетов изучить влияние газов на выход конденсированных продуктов детонации. Результаты этих расчетов также приведены на рис. 3. Видно, что, хотя расчет качественно правильно описывает процесс (увеличение выхода КУ с ростом теплоемкости среды), количественное согласие отсутствует. Процессы синтеза и сохранения КУ протекают в сильно неравновесных условиях, что накладывает существенное ограничение на термодинамические расчеты, подразумевающие достижение равновесных состояний.

Автор благодарен В. М. Титову за внимание к работе, В. П. Фадеевой, а также Ф. А. Сагдиеву за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Апин А. Я., Велина Н. Ф., Лебедев Ю. А. О полном использовании энергии взрыва // ПМТФ.— 1962.— № 5.— С. 96—106.
2. Ornellas D. L. Calorimetric determinations of the heat and products of detonation for explosives. UCRL-52824, Lawrence Livermore National Lab. (USA), 1982.
3. Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. П. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // ФГВ.— 1990.— 26, № 3.— С. 123—125.
4. Саввакин Г. И., Трефилов В. И. Формирование структуры и свойств ультрадисперсных алмазов при детонации в различных средах конденсированных углеродосодержащих взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом // Докл. АН СССР.— 1991.— 321, № 1.— С. 99—103.
5. Лямкин А. И., Петров Е. А. и др. Получение алмазов из взрывчатых веществ // Там же.— 1988.— 302, № 3.— С. 611—613.
6. Volk F., Schedlbauer F. Detonation products of less sensitive high explosives formed under different pressures of argon and in vacuum: Prepr. Papers 9th Symp. on Detonation.— Portland, 1989.— P. 384—392.
7. Петров Е. А., Сакович Г. В., Брыляков П. М. Условия сохранения алмазов в процессе детонационного получения // Докл. АН СССР.— 1990.— 313, № 4.— С. 862—864.
8. Ершов А. П., Куершток А. Л. О температуре продуктов детонации при взрыве в камере // ФГВ.— 1986.— 22, № 3.— С. 118—122.
9. Бабушкин А. Ю., Лямкин А. И., Ставер А. М. Влияние газов на выход конденсированных продуктов детонации углеродосодержащих взрывчатых веществ // Пятое Всесоюз. совещ. по детонации: Сб. докладов.— Красноярск, 1991.— Т. 1.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 25/XII 1992

УДК 531.781

В. А. Туманов, В. Н. Исаев, С. С. Бацанов

***pV*-ЗАВИСИМОСТИ В МЕТОДЕ ДИНАМИКО-СТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ**

Методом динамико-статического сжатия проведены измерения *pV*-зависимостей в цилиндрических ампулах сохранения на стадии разгрузки. Предложена простая модель для количественной оценки остаточного давления.

По методу динамико-статического сжатия (ДСС) нагружаемое тело испытывает последовательное действие ударных волн и гидростатического давления [1—5]. В проведенных исследованиях динамическое

© В. А. Туманов, В. Н. Исаев, С. С. Бацанов, 1993.