

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ СМЕСЕЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ИНЕРТНЫМИ ДОБАВКАМИ

А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников

(Москва)

Изучение детонации зарядов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), содержащих инертные в химическом отношении добавки, имеет как теоретический интерес, например, для исследования установления термодинамического равновесия между добавкой и продуктами взрыва (ПВ), так и практической, поскольку различные наполненные составы широко используются в горном деле. Этому вопросу посвящен ряд работ [1—3]. Тэйлор [1] обратил внимание на то обстоятельство, что за время реакции равновесие между добавкой и ПВ в детонационной волне может не достигаться. Тогда в зоне реакции реализуется одна из трех характерных ситуаций: а) давление и температура в ПВ и добавке не успевают выравняться за время реакции в детонационной волне; б) давление в ПВ и частицах добавки успевает выровняться, но тепловое равновесие между добавкой и ПВ за время реакции в детонационной волне не достигается; в) за время реакции в детонационной волне давление и температура в ПВ и добавке становятся равными.

К сожалению, в [1], хотя и рассчитывались как скорость детонации, так и давление в точке Жуге, не проведено сравнение вычисленных значений давления с экспериментальными, поскольку расчет велся лишь для промышленных ВВ насыпной плотности, для которых такие данные отсутствуют.

В [2] определялись скорости детонации смесей ВВ с инертными добавками. В этой работе было достигнуто хорошее согласие результатов расчета и эксперимента, но ее нельзя считать законченной, так как в ней отсутствует способ расчета давления детонации.

В [3] была предложена полуэмпирическая формула расчета давления детонации смесей по известной скорости детонации.

В настоящей работе сделана попытка дать простой способ расчета всех параметров детонационной волны ВВ с добавками при некоторых упрощающих предположениях.

Очевидно, что осуществление одного из рассмотренных в [1] состояний в детонационной волне конкретной смеси целиком зависит от времени разложения взрывчатой компоненты и физических свойств добавки. Забегая вперед, отметим, что на практике гораздо чаще реализуются неравновесные (по отношению к точке Жуге) детонационные режимы, чем равновесные, что порождает интерес к априорному решению вопроса о достижении равновесия в зоне реакции.

Установление за фронтом детонационной волны одного и того же давления в ПВ и добавке характеризуется временем  $\tau_1 \sim \frac{\mu}{D_1}$ , где  $\mu$  — средний размер частиц добавки,  $D_1$  — скорость ударной волны в материале добавки. Поскольку скорости ударных волн при давлении в несколько сот килобар для различных веществ заключены в достаточно узком интервале 5—8 км/сек, то времена  $\tau_1$  будут близки для частиц

одного размера независимо от материала добавки<sup>1</sup>. Если  $\tau_1$  меньше времени реакции  $\tau_{\text{реакц}}$  в несколько раз, то можно считать, что давление в добавке и ПВ выравнивается.

По литературным данным, среднее значение ширины зоны химической реакции прессованных вторичных ВВ составляет примерно 0,5 мм, т. е. давление не будет полностью выравниваться, если  $\mu > 0,5$  мм. Для жидких и монокристаллических ВВ ширина зоны химической реакции экспериментально не определена, но по косвенным оценкам [4] она, по крайней мере, на порядок меньше, чем в прессованных. Это означает, что выравнивание давления в детонационной волне в таких ВВ не будет происходить при  $\mu > 0,05$  мм.

Установление одинаковой по сечению заряда температуры в зоне реакции связано с прогревом частиц добавки, время которого зависит от размера частиц и их температуропроводности ( $\kappa$ ). Если время разложения взрывчатой компоненты в детонационной волне задано, то размер частиц, которые успеют прогреться, может быть оценен величиной  $\mu \sim \sqrt{\kappa \cdot \tau_{\text{реакц}}}$ . Отсюда максимальный размер частиц прогреваемой добавки в прессованных ВВ оказывается равным 5 мк для металлических и 0,1 мк для неметаллических добавок. В жидких ВВ имеем соответственно 1 и 0,02 мк. Иными словами, выравнивание давления в детонационной волне происходит за времена, на два порядка меньше, чем времена выравнивания температуры.

В итоге имеем следующие размеры добавки, характеризующие ее состояние в детонационной волне.

1. В прессованных зарядах ВВ частицы добавки с  $\mu > 0,5$  мм, а в жидких ВВ с  $\mu > 0,05$  мм не успевают ни ускориться, ни прогреться. При уменьшении дисперсности добавки скорость детонации таких зарядов стремится к скорости детонации взрывчатой компоненты при плотности, при которой она находится в смеси. Подобная ситуация встречается в случае детонации крупнозернистых наполненных зарядов, в смесях жидких ВВ с малодисперсной добавкой.

2. В прессованных зарядах ВВ с добавками, имеющими размеры частиц  $\mu < 0,5$  мм, а для жидких ВВ с  $\mu < 0,05$  мм, давление в детонационной волне успевает выравниваться, но при  $\mu > 5$  мк, а для жидких ВВ при  $\mu > 0,02$  мк, добавка полностью не прогревается. Подобная ситуация осуществляется при детонации большинства употребляемых на практике составов. Скорость детонации таких зарядов меньше, чем в случае 1, так как часть энергии детонационной волны затрачивается на сжатие добавки.

3. При размере частиц добавок в прессованных ВВ, меньшем 5 мк, а в жидких ВВ меньшем 0,02 мк за время химической реакции в детонационной волне температура и давление в ПВ и частицах добавки успевают выравниваться. Этот случай на практике встречается в растворах (жидкое ВВ + растворитель) и очень редко в прессованных смесях ВВ.

Зная состояние добавки в детонационной волне конкретной смеси (случаи 1—3), можно рассчитать параметры детонационной волны этой

<sup>1</sup> Для корректного решения задачи об установлении равновесия добавки и ПВ необходимо рассматривать многократное сжатие частиц добавки. Однако, учитывая неопределенность, вносимую в подобное рассмотрение недостаточностью сведений об уравнении состояния материала добавки и ПВ, в первом приближении в расчете использовались значения удельного объема и сжимаемости добавки, соответствующие ударной адиабате однократного сжатия. В то же время полагалось, как и в одномерном случае, что установление одинакового давления в добавке и ПВ эквивалентно выравниванию соответствующих массовых скоростей.

смеси. В случае 1 расчет производится так же, как и для индивидуальных ВВ [5].

В случае 2 уравнения, характеризующие распространение детонационной волны, записываются с учетом сжатия добавки в следующем виде:

$$E_1 - E_{01} = Q + \frac{i}{2} p (V_{01} - V_1); \quad (1)$$

$$\frac{Y}{D} = 1 - \frac{V_{см}}{V_{осм}}; \quad (2)$$

$$p = \frac{UD}{V_{осм}}; \quad (3)$$

$$T = 4,8 p V_1 (V_1 - 0,20) \bar{M}; \quad (4)$$

$$V_1 = \frac{n}{n+1} \left[ V_{01} + \frac{\alpha}{1-\alpha} \left( V_{02} - V_2 + p \frac{\partial V_2}{\partial p} \right) \right], \quad (5)$$

где индекс «1» относится к чистому ВВ, индекс «2» — к добавке, индекс «0» обозначает начальное состояние, величины без индексов относятся к состоянию в плоскости Чепмена — Жуге ( $V$  — удельный объем,  $V_{см} = (1-\alpha) V_1 + \alpha V_2$ ;  $\alpha$  — весовая доля добавки,  $\bar{M}$  — средний молекулярный вес ПВ,  $Q$  — теплота взрыва смеси,  $n$  — показатель политропы продуктов взрыва взрывчатой компоненты).

Расчитанные по этим уравнениям и экспериментально определенные параметры детонации ряда взрывчатых смесей приведены в табл. 1 (экспериментально температура детонации рассматриваемых взрывчатых систем не измерялась, поэтому в таблице расчетные значения температуры не приводятся).

Таблица 1

Смесь	Состав, %	Плотность смеси, г/см <sup>3</sup>	Размер частиц добавки, мм	Давление детонации, кбар		Скорость детонации, м/сек	
				расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
Гексоген/вода (0,1 мм) . . . . .	75/25	1,5	—	190	165	7450	7500
Гексоген/вода . . . . .	70/30	1,45	—	186	—	7250	7300*
ТЭН/бензин (0,3 мм) . . . . .	80/20	1,35	—	160	—	7500	7300
ТНТ/вода (1,0 мм) . . . . .	68/32	1,35	—	130	—	6250	6100
Гексоген/парафин . . . . .	85/15	1,54	0,1	230	—	7650	7900
Гексоген/Al . . . . .	80/20	1,76	0,13	260	260	7700	7900
ТНТ/Al . . . . .	80/20	1,70	0,13	190	180	6750	6580
Гексоген/NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O (0,1 мм)	45/30/25	1,52	—	180	—	7100	6800
Гексоген/SiO <sub>2</sub> . . . . .	80/20	1,74	0,1	250	—	7370	7300
ТНТ/SiO <sub>2</sub> . . . . .	85/15	1,69	0,27	190	183**	6700	6640**

\* По данным [6].  
\*\* По данным [7].

В случае 3 для расчета параметров детонации взрывчатых смесей можно использовать приведенную выше систему уравнений, несколько видоизменив уравнения (1) и (5), поскольку частицы добавки, нагреваясь от температуры ударного сжатия до равновесной, расширяются и отбирают тепло из зоны химической реакции

$$E - E_{01} = Q + \frac{1}{2} p (V_{01} - V_1) + \left[ \int_T^T c_V dT \right]_2; \quad (1a)$$

$$V_1 = \frac{n}{n+1} \left\{ V_{01} + \frac{\alpha}{1+\alpha} \left[ V_{02} + \left( \frac{\partial V_2}{\partial p} p - V_2 \right) (1 + \beta \Delta T) \right] \right\}, \quad (5a)$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения материала добавки. Некоторые упрощения возникают при расчете смесей, содержащих в качестве добавки воду (взрывчатые водные растворы). В этом случае можно воду рассматривать как компоненту продуктов взрыва и весь расчет проводить так же, как и для индивидуальных ВВ.

Результаты расчета и экспериментального определения параметров детонации смесей, в которых предположительно осуществляется третье состояние добавки, помещены в табл. 2. Здесь приведены рассчитанные параметры детонации смесей тротила и гексогена с сажой, в которых ВВ находится при малой плотности. Расхождение с экспериментом вызвано тем, что расчет для индивидуальных ВВ [5] сам по себе дает хорошие результаты лишь для веществ с давлением детонации в точке Жуге, превышающим 150 кбар.

Таблица 2

Смесь	Состав, %	Плотность, смеси, г/см <sup>3</sup>	Размер частиц добавки, мк	Давление детонации, кбар		Скорость детонации, м/сек	
				расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
TNT/SiO <sub>2</sub>	85/15	1,69	Пудра	165	173*	6300	6450*
CH <sub>3</sub> NO <sub>2</sub> /HNO <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O	47,5/47/5,5	1,293	—	165	—	6700	6580**
Dethekaite-13							
(HNO <sub>3</sub> /C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O)	63/24/13	1,39	—	168	174***	6700	6800***
TNT/сажа	80/20	1,43	0,5	110	—	5750	5300
TNT		1,32	—	160	135	6600	6050
Гексоген-сажа	80/20	1,38	0,5	120	—	6000	6300
Гексоген		1,28	—	—	—	6700	7100

\* По данным [7].

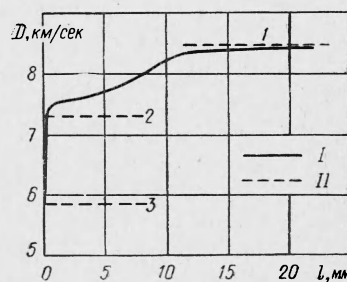
\*\* По данным [8].

\*\*\* По данным [9].

Из рассмотрения данных, помещенных в таблицах, следует, что согласие между результатами расчета и эксперимента достаточно хорошее. Это указывает на правомерность использованного подхода к вопросу об априорном определении параметров детонации смесей ВВ с инертными добавками.

Приведенные в табл. 1, 2 примеры дают возможность представить, как в различных конкретных смесях реализуется один из трех рассмотренных случаев. Однако и на одной смеси при изменении дисперсности компонент можно экспериментально наблюдать наличие всех трех состояний добавки (и конечно, промежуточных). Подобные результаты были получены на водонаполненном гексогене [10, 11].

На рисунке приведены зависимость скорости детонации водонаполненного гексогена от дисперсности ВВ (I), построенная по экспериментальным данным [10, 11], и показаны значения скоростей детонации, соответствующие трем исследованным выше случаям (II). Как видно, существует полное согласие между результатами расчета и эксперимента. Скорости детонации водо-



наполненного гексогена оказываются физически однозначными, а не аномальными, как утверждается в работах [10, 12].

Таким образом, проделанная работа позволяет утвердительно ответить на вопрос о возможности априорной оценки параметров детонационной волны смесей ВВ с инертными добавками. Причем эти параметры удастся предвидеть с точностью, вполне удовлетворяющей требованиям практики.

Поступила в редакцию  
4/X 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. W. Taylor. Detonation in Condensed Explosives. Oxford, 1952.
2. M. A. Cook. Discus. Farad Soc., 1956, 22, 203.
3. В. Д. Лютов, И. М. Воскобойников и др. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
4. J. W. Enig, F. J. Petrone. Phys. Fluids, 1966, 9, 2.
5. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1960, 4.
6. Л. Н. Акимова, А. Я. Апин. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
7. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил, М. И. Арифов. Докл. АН СССР, 1960, 131, 5.
8. W. Fickett. Phys. Fluids, 1963, 6, 7.
9. W. C. Davis, A. W. Campbell. J. Appl. Phys., 1960, 31, 7.
10. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
11. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников, А. Я. Апин. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
12. А. Я. Апин, Н. Ф. Велина. Докл. АН СССР, 1966, 171, 2.

УДК 534.222.2

### К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗАХ И ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ

А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд  
(Москва)

Теоретическое определение параметров детонационных волн (давления, температуры, скорости и др.) в газах с учетом химических равновесий в продуктах реакции очень трудоемко. Поэтому параметры детонационных волн, в частности их скорости, предпочитают определять экспериментально. Однако измерение параметров волны не всегда легко осуществимо. В связи с этим расчетные методы, которые в большинстве случаев дают результаты, хорошо согласующиеся с экспериментом, занимают существенное место в исследованиях детонационных волн.

Количество уравнений, используемых при полном термодинамическом расчете детонационных волн, больше, чем число уравнений, используемых при расчете взрыва в замкнутом объеме или горения при постоянном давлении, т. е. связь между составом продуктов, температурой и давлением за волной и перед ней в случае детонации гораздо сложнее, чем в более простых случаях горения и взрыва, рассмотренных, например, в [1]. Однако, как оказывается, можно получить относительно несложные уравнения для расчета термодинамических параметров детонационных волн. Целью настоящей работы является получение таких уравнений и метода расчета, которые позволили бы разделить по возможности задачу на две части: расчет термодинамически равновес-