

ВВ на пятне дискретного фрикционного контакта практически невозможно. Если же повышать температуру плавления ВВ путем увеличения давления прижатия, то дискретный контакт переходит в сплошной; как показывают оценки [1], при этом возможно воспламенение бризантных ВВ за счет внешнего сухого трения. Но вполне возможно, что у ВВ, обладающих высокой температурой плавления и твердостью, например в случае инициирующих ВВ или других неплавящихся взрывчатых систем, воспламенение при трении происходит за счет разогрева на пятнах дискретного контакта.

Авторы глубоко признательны Н. И. Перегудову за помощь в составлении программы для расчетов на ЭВМ.

*Поступила в редакцию 15/VI 1977,
после доработки — 7/X 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян, В. С. Козлов. ФГВ, 1972, 8, 3.
2. И. В. Каргельский. Трение и износ. М., «Машиностроение», 1968.
3. А. В. Чичинадзе. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М., «Наука», 1967.
4. Дж. К. Егер. ПММ, 1952, 6.
5. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. Новосибирск, «Наука», 1970.
6. А. Г. Мержанов, В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская. Докл. АН СССР, 1963, 148, 2.
7. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1963.
8. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Иницирование твердых ВВ ударом. М., «Наука», 1968.
9. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение ВВ. М., «Наука», 1966.
10. Ф. П. Боуден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ОБЛАСТИ ВЗРЫВА ЗАРЯДА ВВ В АРГОНЕ

Ю. А. Медведев, Б. С. Пункевич, Б. М. Степанов

(Москва)

В описываемых экспериментах исследовалось формирование и развитие во времени светящейся области перед фронтом ударной волны и пространственно-временное распределение проводимости в этой области при взрыве зарядов ВВ в аргоне различной начальной плотности. Использовались заряды сферической формы массой от 1 до 3 г из пластичного ВВ, изготовленного на основе тэна. Соответствующие начальные радиусы зарядов 0,5 и 0,75 см.

На рис. 1 приведена типичная СФР-грамма взрыва заряда ВВ массой 3 г в аргоне с начальным давлением 1 атм, снятая через иллюминатор диаметром 140 мм в режиме лупы времени (цифрами пронумерованы кадры, следующие друг за другом с временным интервалом 2 мкс). Видно, что в момент выхода детонационной волны на поверхность заряда (см. рис. 1, 1) помимо области детонации в центре снимка начинает светиться весь видимый объем газа. Интенсивность свечения газа нарастает и к моменту $t=2$ мкс область детонации перестает различаться, т. е. излучение из области детонации экранируется све-

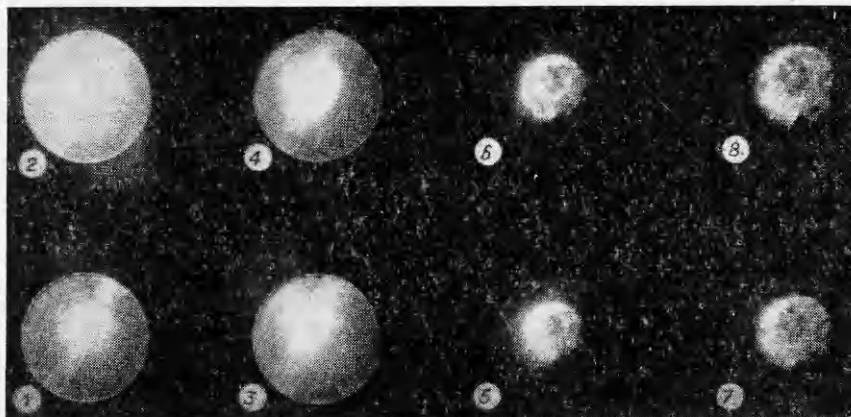


Рис. 1.

тящейся областью газа перед фронтом гидродинамического возмущения. Видимый объем светящегося газа, ограничиваемый размерами иллюминатора, в начальные моменты времени в $20 \div 30$ раз превосходит размеры области, охваченной гидродинамическим возмущением. Примерно через 6 мкс с момента выхода детонационной волны на поверхность заряда свечение газа вне области гидродинамического возмущения начинает убывать. Через 8 мкс и позже экранировка внутренних объемов заканчивается, обнажается центральная область с продуктами детонации, развивающаяся со временем и приобретающая конфигурацию, аналогичную той, которая наблюдалась при взрыве зарядов ВВ в воздухе (см., например, [1, 2]).

Обнаруженное в данной работе явление начального свечения невозмущенного газа не наблюдается при взрыве ВВ в воздухе. Эксперименты по исследованию начального свечения области взрыва заряда ВВ в разреженном аргоне показали, что при уменьшении начального давления аргона интенсивность свечения области впереди ударного фронта заметно уменьшается и уже при давлении 0,3 атм свечение практически исчезает.

На рис. 2 приведена СФР-грамма взрыва заряда ВВ в аргоне с начальным давлением 0,3 атм. Остальные условия эксперимента аналогичны предыдущим. Видно, что начальное свечение отсутствует, и центральная область с продуктами детонации просматривается с самого начала.

Ожидалось, что основной причиной, вызывающей начальное свечение аргона, являются электроны, диффундирующие из высоконагретой

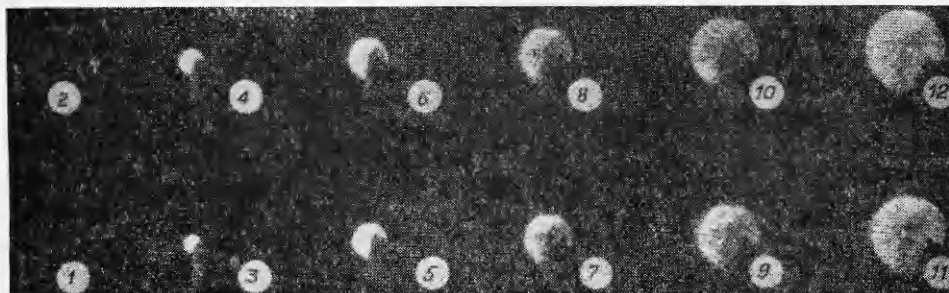


Рис. 2.

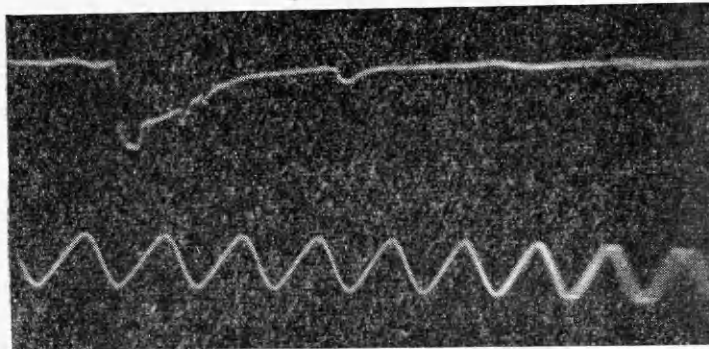


Рис. 3.

области вблизи контактной поверхности продуктов взрыва. Полагая на основании фотографии святавшегося объема на первом кадре, что к моменту $t=2$ мкс электроны продиффундировали на расстояние ~ 4 см (это составляет примерно половину радиуса окна), получим, что средняя диффузионная скорость электронов $v \approx 2 \cdot 10^6$ см/с. Эта величина согласуется с результатами измерений скорости электронов перед ударной волной в аргоне, приведенными в работе [3]. При энергиях электронов порядка нескольких тысяч градусов их сечение столкновений в аргоне примерно в $20 \div 30$ раз меньше, чем в воздухе [4]. Примерно в таком же соотношении находятся и коэффициенты диффузии D электронов в аргоне и воздухе [4]. Это объясняет отсутствие подобного эффекта в воздухе, поскольку диффузионная длина электронов D/v в воздухе будет в $20 \div 30$ раз меньше, чем в аргоне, и область начального свечения невозмущенного воздуха, если она и присутствовала бы, по-видимому, имела бы размеры порядка размеров детонационной волны и не выделялась бы на фотографии.

Для обнаружения электронов в зоне начального свечения проведены измерения электронного тока с помощью цилиндра Фарадея. На рис. 3 приведена осциллограмма сигнала, снятого с цилиндра Фарадея, установленного на расстоянии 200 мм от заряда ВВ массой 3 г. Второй луч фиксирует метки времени с периодом 10 мкс. Заряд ВВ инициировался капсулом-детонатором через детонирующий мостик в виде ленточного ВВ массой $5 \cdot 10^{-2}$ г, что обеспечило запуск регистратора от контактного датчика на 15 мкс раньше детонации самого заряда ВВ. Взрыв произведен в аргоне с начальным давлением 1 атм. Как видно из осциллограммы, в момент детонации заряда ВВ появляется сигнал отрицательной полярности длительностью ~ 10 мкс. Фронт этого сигнала составляет ~ 2 мкс, что хорошо согласуется со временем нарастания интенсивности начального свечения.

Таким образом, измерения с использованием цилиндра Фарадея показали наличие свободных электронов во время свечения в значительном объеме аргона, не охваченного детонацией. Однако уменьшение плотности газа не приводит в отличие от свечения к уменьшению и полному исчезновению свободных электронов перед фронтом ударной волны. На рис. 4 приведена осциллограмма сигнала с цилиндра Фарадея, полученная при взрыве заряда ВВ в аргоне с начальным давлением 0,1 атм. Видно, что сигнал отрицательной полярности, свидетельствующий о наличии свободных электронов в зоне нахождения цилиндра Фарадея, появляется так же, как и при взрыве ВВ в аргоне нормальной плотности, в момент детонации заряда ВВ. Длительность этого сигнала составляет ~ 30 мкс. В то же время свечение газа впереди фронта ударной волны при такой плотности аргона не наблюда-

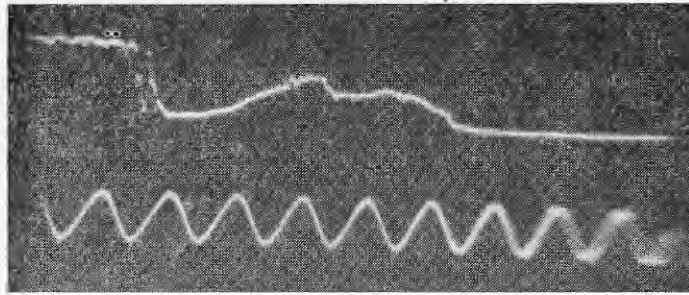


Рис. 4.

ется. Это указывает на различие в механизмах возникновения начального свечения и появления свободных электронов в области газа впереди ударного фронта.

Наиболее ярко это различие проявилось в экспериментах по детонации заряда ВВ, помещенного в атмосфере аргона в стеклянную сферу диаметром 5 см и толщиной 0,5 мм, задерживающую ультрафиолетовое излучение и электроны, продиффундированные через фронт ударной волны. Установлено, что проводимость вне объема сферы отсутствует, в то время как свечение невозмущенного газа за пределами сферы практически не ослабло.

Для уточнения пространственно-временного распределения проводимости впереди ударного фронта проведено исследование области взрыва ВВ в аргоне индукционным методом, аналогично описанному в работе [5]. Заряд ВВ помещался в центр магнитного датчика диаметром 260 мм, включенного в одно из плеч симметричного высокочастотного моста, питаемого переменным током с частотой 5 МГц. Перед экспериментом мост балансировался. При появлении проводящей среды внутри магнитного датчика возникал сигнал разбаланса измерительного устройства, который в случае проводящей сферы пропорционален проводимости σ и ее радиусу R^5 .

На рис. 5 приведена характерная осциллограмма сигнала разбаланса измерительного устройства при взрыве заряда ВВ массой 3 г в аргоне с начальным давлением 1 атм. На втором луче записаны метки времени с периодом 10 мкс. Запуск регистратора осуществлен в момент выхода детонационной волны на поверхность заряда (А — калибровочный сигнал разбаланса от внесенной в датчик стеклянной сферы диаметром 160 мм, наполненной элетролитом проводимостью 7,4 См/м).

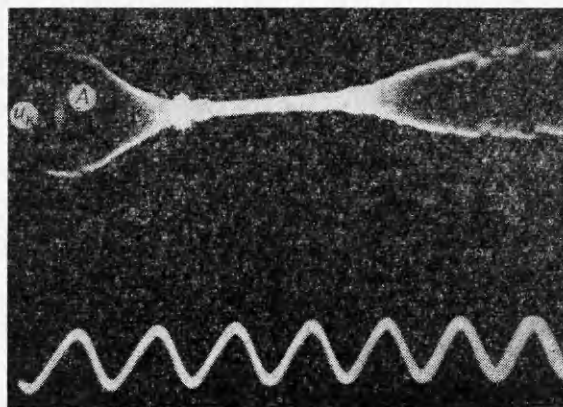


Рис. 5.

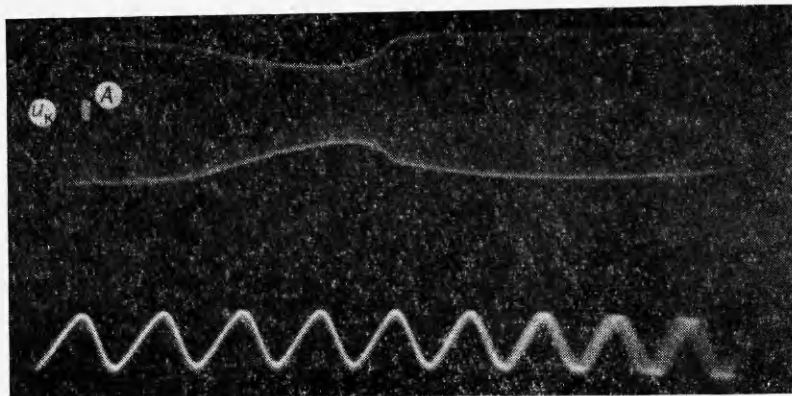


Рис. 6.

Видно, что в момент детонации заряда ВВ возникает значительный по величине сигнал разбаланса, спадающий через $10 \div 12$ мкс практически до нуля. Затем, спустя $40 \div 45$ мкс, возникает второе нарастание сигнала разбаланса. В аналогичных экспериментах в воздухе первый сигнал разбаланса измерительного устройства не наблюдался.

Если учесть, что сигнал разбаланса $u \sim \sigma R^5$, то становится очевидным, что в начальные моменты времени после детонации заряда ВВ возникает проводящая область, существенно превышающая по размерам область, охваченную гидродинамическим возмущением. Отметим, что через 12 мкс ударная волна в опыте распространяется на 35 мм, и эта область даже с проводимостью, близкой по своему значению к металлической, не может вызвать заметный сигнал разбаланса при использовании данного магнитного датчика. Если предположить, что проводимость равномерно распределена внутри сферического объема, охваченного магнитным датчиком, то ее величина составит $\sim 4,5$ См/м.

Второе нарастание сигнала разбаланса измерительного устройства вызывается проводящим объемом возмущенной ударной волной аргона, увеличивающимся со временем подобно тому, как это происходит при взрыве заряда ВВ в воздухе [5].

Исследования величины и характера изменения во времени проводимости в области взрыва заряда ВВ в аргоне пониженной плотности показали, что проводимость невозмущенного ударной волной аргона в объеме, охваченном магнитным датчиком, возрастает с уменьшением начального давления газа, при этом скорость спадания проводимости во времени уменьшается. На рис. 6 приведена осциллограмма сигнала разбаланса измерительного устройства при взрыве заряда ВВ массой 3 г в аргоне при начальном давлении 0,5 атм.

Из сравнения рис. 5 и 6 видно, что при взрыве заряда ВВ в разреженном аргоне сигнал разбаланса измерительного устройства, возникающий в момент детонации заряда ВВ и вызываемый начальной проводимостью невозмущенного аргона, имеет амплитуду, в 1,2 раза большую, чем при взрыве ВВ в аргоне с начальным давлением 1 атм. Длительность этого сигнала составляет $30 \div 35$ мкс, т. е. в 3 раза превышает длительность соответствующего сигнала разбаланса при взрыве ВВ в плотном газе. Вместе с тем второе нарастание сигнала разбаланса происходит быстрее из-за большей скорости движения фронта ударной волны в рассматриваемом объеме в разреженном газе, что приводит к исчезновению четкой границы между первым и вторым сигналами разбаланса измерительного устройства.

Явление ионизации аргона перед фронтом сильной ударной волны впервые обнаружено в экспериментах на ударных трубах [6] и в

настоящее время не вызывает сомнений; при этом свечение газа перед ударным фронтом не наблюдалось. Это вполне естественно, поскольку эксперименты на ударных трубах проводились при низких давлениях (до 10 мм рт. ст.), когда свечения нет, а детонация ВВ в аргоне при атмосферном давлении, насколько известно, не исследовалась.

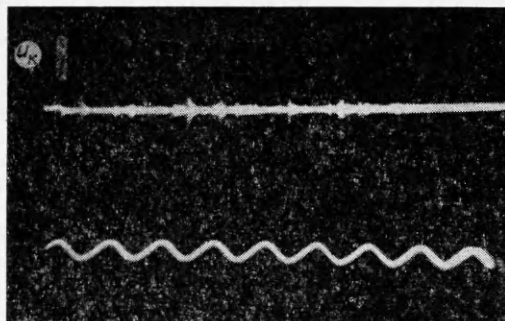


Рис. 7.

Результаты экспериментов теоретически объяснялись как диффузией электронов через фронт УВ [7—10], так и радиационным возбуждением и ионизацией аргона перед ударным фронтом [11—13]. Однако основной механизм ионизации газа перед УВ до сих пор не выяснен. В настоящей работе сделана попытка экспериментально установить причину ионизации аргона перед фронтом сильной УВ путем проведения взрыва заряда ВВ в затормаживающем электрическом поле. Заряд ВВ помещался в центр прозрачной для фотонов металлической сферической сетки радиусом 3 см, находящейся внутри магнитного датчика, и заземлялся. На сетку подавался потенциал в 10 кВ, создающий в объеме между сеткой и зарядом ВВ электрическое поле, затрудняющее диффузию электронов из области гидродинамического возмущения в невозмущенный газ. Взрыв производился в атмосфере аргона при начальном давлении 1 атм.

На рис. 7 представлена оциллограмма сигнала разбаланса измерительного устройства. Видно, что разбаланса практически нет, что свидетельствует об отсутствии проводимости впереди фронта ударной волны; при этом свечение области аргона вне экранирующей сетки не исчезло, что дополнительно указывает на различные механизмы, вызывающие проводимость и свечение невозмущенного аргона впереди ударного фронта. Обнаруженные факты свидетельствуют о диффузии электронов из высоконагретой области за фронтом ударной волны, образованной при взрыве заряда ВВ в аргоне, в невозмущенный газ.

Остановимся на количественной стороне вопроса ионизации аргона перед ударным фронтом. В работе [14] показано, что сигнал разбаланса измерительного устройства для проводящей сферы радиуса R , помещенной в центр магнитного датчика, может быть записан в виде

$$u(t) = A \int_0^R \sigma(r, t) r^4 dr, \quad (1)$$

где A — константа, определяемая калибровкой; $\sigma(r, t)$ — проводимость сферы; r — текущая координата.

Поскольку установлено, что проводимость аргона впереди фронта ударной волны вызвана диффузией электронов из возмущенной взрывом области, ее распределение по радиусу впереди ударного фронта имеет вид

$$\sigma(r, t) = \sigma_0(t) e^{-r/L},$$

где $\sigma_0(t)$ — проводимость на контактной поверхности продуктов взрыва; L — диффузионная длина электронов.

Подставив выражение для $\sigma(r, t)$ в (1) и обезразмерив величины, имеющие размерность длины, получим

$$u(t) = A_1 \int_0^{R/r_0} \sigma_0(t) \left(\frac{r}{r_0}\right)^4 e^{-r/Ld} \left(\frac{r}{r_0}\right), \quad (2)$$

где r_0 — начальный радиус заряда. Принимая во внимание, что $L/R \ll 1$, выражение (2) можно записать в виде [15]

$$u(t) = A_1 \sigma_0(t) \cdot 24 (L/R)^5 (R/r_0)^5. \quad (3)$$

Величина $\sigma_0(t)$ вычислялась с учетом данных работы [16] по известным значениям температуры и плотности за фронтом ударной волны, которые, в свою очередь, определялись по известным значениям скорости движения фронта ударной волны [17]. Скорость движения ударного фронта регистрировалась с помощью высокоскоростной фотографии. Так, при взрыве заряда ВВ массой 3 г в атмосфере аргона при начальном давлении 1 атм скорость движения фронта ударной волны в начальные моменты времени после детонации ВВ составляла $(5+1) \cdot 10^3$ м/с и $\sigma_0 = (2 \pm 0,5) \cdot 10^4$ См/м. Подставляя эти данные в выражение (3), получим, что диффузионная длина электронов в эти моменты времени составляет $(8 \pm 0,5)$ мм.

При взрыве заряда ВВ массой 3 г в аргоне при начальном давлении 0,5 атм в начальные моменты времени $\sigma_0 = (1,8 \pm 0,4) \cdot 10^4$ См/м и диффузионная длина электронов равна $(8,5 \pm 0,5)$ мм. Более длительное существование проводимости впереди фронта ударной волны при взрыве заряда ВВ в разреженном аргоне объясняется более длительным существованием высокой температуры, а следовательно, и проводимости в области за ударным фронтом.

Таким образом, исследования проводимости в области взрыва заряда ВВ в аргоне различной начальной плотности показали, что впереди фронта ударной волны в области, значительно превышающей область гидродинамического возмущения, возникает проводимость, вызванная электронами, продиффундированными через ударный фронт, диффузионная длина которых при массе заряда 3 г и давлении 1 атм составляет ~ 8 мм (время существования проводимости ~ 10 мкс), причем с уменьшением давления диффузионная длина незначительно увеличивается, в то время как длительность существования проводимости возрастает в несколько раз. Одновременно с возникновением проводимости появляется свечение невозмущенного ударной волной газа, вызываемое, по-видимому, излучением видимого диапазона, исходящим из высоконагретой области за фронтом ударной волны. Применение моделей, рассматривающих распределение возбужденных атомов аргона впереди фронта ударной волны [7—13], не позволяет объяснить начальное свечение невозмущенного газа, так как устранение причин, вызывающих возбуждение атомов аргона перед ударным фронтом, обсуждаемых в указанных работах, не приводит к уничтожению начального свечения газа.

*Поступила в редакцию 11/IV, 1977,
после доработки — 12/XII 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Адушкин. ПМТФ, 1963, 5.
2. А. П. Боронин, Ю. А. Медведев, Б. М. Степанов. ФГВ, 1973. 9. 4.
3. H. D. Weuman. Phys. Fluids, 1960, 3, 1, 545.
4. Д. Кэй, Г. Лэби. Таблицы физических и химических постоянных. М., Физматгиз, 1962.
5. Ю. А. Медведев, Б. С. Пункевич, Б. М. Степанов. ФГВ, 1972. 8. 3.
6. H. E. Petschek, S. Вугон. Ann. Phys., 1957, 1, 3, 270.
7. A. C. Pipkin. Phys. Fluids, 1963, 6, 10, 1382.
8. J. Wetzel. Phys. Fluids, 1962, 5, 7, 827.
9. J. Wetzel. Phys. Fluids, 1963, 6, 5, 750.
10. J. Wetzel. AIAA J., 1964, 2, 7, 1208.
11. Л. М. Биберман, Б. А. Векленко. ЖЭТФ, 1959, 37, 1/7. 164.
12. Л. М. Биберман, И. Т. Якубов. ТВТ, 1965, 3, 2.

13. Л. М. Биберман, И. Т. Якубов. ЖТФ, 1963, 33, 11, 1344.
14. Б. С. Пункевич. Измерительная техника, 1974, 1.
15. Г. Б. Двайт. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М., «Наука», 1973.
16. E. L. Resler, S. C. Lin, A. Kantrowitz. J. Appl. Phys., 1952, 23, 12, 1390.
17. S. C. Lin, E. L. Resler, A. Kantrowitz. J. Appl. Phys., 1955, 26, 95.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ НАПОЛНИТЕЛЯ НА РАЗЛОЖЕНИЕ НАПОЛНЕННЫХ СИСТЕМ ТРОТИЛА И ГЕКСОГЕНА В УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛНАХ

К. К. Шведов, А. Л. Кривченко, В. Н. Сальников

(Черноголовка)

Одним из факторов, обуславливающих возникновение разложения в наполненных системах, может быть разогрев наполнителя и поджигание им частиц ВВ. В данной работе сделана попытка выявить влияние этого фактора на разложение наполненных зарядов тротила и гексогена при различных давлениях. В основном использовались два сильно отличающихся по температуре ударного разогрева наполнителя — вода и CCl_4 , некоторые опыты проведены с ацетоном и бромформом. В первой серии экспериментов получены данные по торможению границы раздела парафин — исследуемое ВВ в широком диапазоне давлений ударной волны. Постановка опыта аналогична работам [1, 2]. Во второй серии экспериментов определялась зависимость детонационных характеристик этих же систем от диаметра заряда. Использовался гранулированный тротил размером зерна 2—3 мм и плотностью 1,54—1,57 г/см³ и кристаллический гексоген размером частиц 0,3—0,5 мм и плотностью 1,8 г/см³. Заряды готовились заливкой наполнителя в пористые заряды из указанных ВВ. Средняя плотность систем тротила с водой и четыреххлористым углеродом составляла 1,32 и 1,58 г/см³, а для гексогена — 1,43 и 1,7 г/см³ соответственно.

На рис. 1 приведены экспериментальные кривые торможения границы раздела парафин — наполненные заряды тротила и гексогена. Видно, что для всех исследованных систем при давлении выше некоторого p^* на кривых торможения имеется резкий излом за время 0,5—0,7 мкс. Для взрывчатых систем гранулолога p^* не зависит от природы наполнителя и составляет приблизительно 110 кбар и слабо зависит ($\sim 200 \div 220$ кбар) для гексогена. Наличие резкого излома кривой торможения можно связывать, как показано в работе [2], с полным разложением ВВ за времена, близкие ко времени излома кривой торможения. Слабый наклон кривых торможения в области $p < p^*$ означает, что разложение ВВ также имеет место, но протекает менее интенсивно и не заканчивается за время наблюдения.

Разложение наполненных систем может быть обусловлено различными причинами. Для анализа их рассмотрим данные по зависимости температуры ударного разогрева от давления в использованных ВВ и наполнителях. Они приведены на рис. 2. Данные для тротила ($\rho_0 = 1,54$ г/см³) и монокристаллического гексогена заимствованы из [3, 4], а для наполнителей рассчитывались по [5]. В расчетах предполагалось аддитивное распределение энергии между компонентами смеси. Несмотря на известные неточности в расчетах температуры ударного разогрева, относительное положение кривых $T-p$ определено достаточно надежно. При давлении ~ 110 кбар, когда появляется излом