

УДК 544.452

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ В ЩЕЛИ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Л. А. Андреевских, С. А. Вахмистров, Д. А. Пронин, Е. В. Халдеев,
Ю. В. Шейков

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва,
607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Представлены результаты исследования в манометрической бомбе перехода послойного горения в конвективное и во взрыв зарядов современных высокоплотных ВВ при давлении до ≈ 60 МПа. Аппроксимация результатов экспериментов с хорошей корреляцией позволила выделить общий параметр для ВВ, характеризующий кинетику конвективного горения, и ранжировать ВВ по их способности перехода во взрыв. Полученные результаты могут быть применены в расчетном моделировании взрыва ВВ при аварийных тепловых воздействиях.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, конвективное горение, термораспад, манометрическая бомба, заряд, детонация.

DOI 10.15372/FGV20150606

ВВЕДЕНИЕ

Конвективное горение взрывчатых веществ (ВВ), как переходная стадия процесса горения, является весьма важной темой для исследования, так как его параметры определяют характер последующего взрывного процесса и возможность детонации — катастрофического результата аварийной ситуации.

На динамику развития конвективного горения, кроме конструктивных особенностей взрывной системы, влияют главным образом свойства самого ВВ: кинетика разложения в твердофазных реакциях (при взрыве), масса, пористость, наличие инертных и активных добавок.

При разработке взрывных устройств, в случае если энергетические и мощностные характеристики ВВ одинаковы, предпочтение, очевидно, будет отдано тому ВВ, которое обладает наименьшей склонностью к переходу горения в детонацию.

При исследовании горения зарядов ВВ и условий перехода их послойного горения в конвективное и во взрыв в Институте физики взрыва РФЯЦ-ВНИИЭФ используется метод возрастающего давления (регистрация давления газов при сгорании заряда ВВ в камере постоянного объема — манометрической бомбе) одновременно с видеорегистрацией движе-

ния фронта пламени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В данной работе для регистрации горения применяли высокоскоростные датчики давления S-10 WIKА и высокоскоростную видеокамеру Fastcam. В полости бомбы (сходной по своей конструкции с описанной в [1]) объемом $V = 250 \text{ см}^3$ размещался заряд взрывчатого состава (ВС) массой ≈ 150 г при коэффициенте заряжения 0.37. Регистрация камерой Fastcam проводилась через прозрачное окно в бомбе. С целью получения стадии устойчивого конвективного горения в бомбе заряд ВВ по всей длине (150 мм) имел щелевой зазор шириной 0.5 мм. Для зажигания заряда на его торце по щели устанавливалась спираль накаливания. Прочность бомбы позволяла исследовать горение ВС вплоть до давления $p = 60$ МПа. Схема манометрической бомбы и заряда ВВ представлена на рис. 1.

Исследовались заряды следующих пластифицированных ВВ: тэн, гексоген, октоген, апрол, бензотрифуроксан (БТФ), гексанитрогексаазаизовюрцитан (ГАВ), причем пористость зарядов не превышала 1 %. Соответствующие композиции ВС приведены в табл. 1.

На рис. 2 представлена типичная зависимость $p(t)$ в бомбе при горении заряда ВС и приведены кадры видеорегистрации, отража-

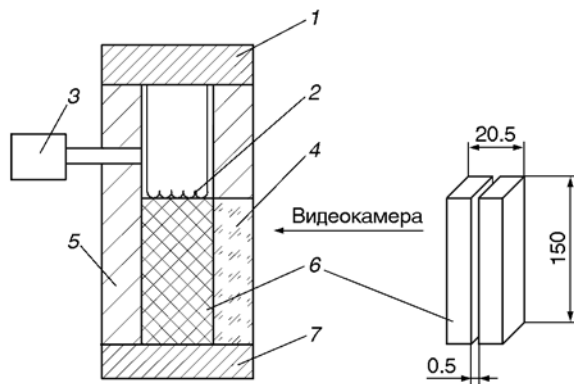


Рис. 1. Схема манометрической бомбы и заряда ВВ:

1 — крышка бомбы, 2 — спираль накаливания, 3 — датчик давления, 4 — окно, 5 — корпус бомбы, 6 — заряд ВВ, 7 — дно бомбы

ющие характерные стадии процесса: проникновение пламени в зазор, послышное горение, ускорение горения в зазоре, переход послышного горения в конвективное. На рис. 3 схематично показана методика определения кри-

Таблица 1

Исследованные взрывчатые составы и их композиции

Обозначение состава	Аналог ВС	Компоненты ВС	Количество связи, %
Термопластичные			
ВС-1	X-0319 ⁽¹⁾	ГАВ/ТАТБ (40/52)	8
ВС-2	X-0319 [2]	Октоген/ТАТБ (40/52)	8
ВС-3	X-0242 [3]	Октоген	8
ВС-4	ОМА [4]	Октоген	2
ВС-5	ОМА ⁽²⁾	Апрол	2
ВС-6	CL-20 [5]	ГАВ	2
Пластичные			
ВС-7	ЭЛАС-1 [4]	ТЭн	15
ВС-8	ПВВ-5А [4]	Гексоген	15
ВС-9	С-150 ⁽³⁾ [6]	БТФ	15

Примечания. ⁽¹⁾В X-0319 октоген заменен на ГАВ. ⁽²⁾В ОМА октоген заменен на апрол. ⁽³⁾В С-150 октоген заменен на БТФ.

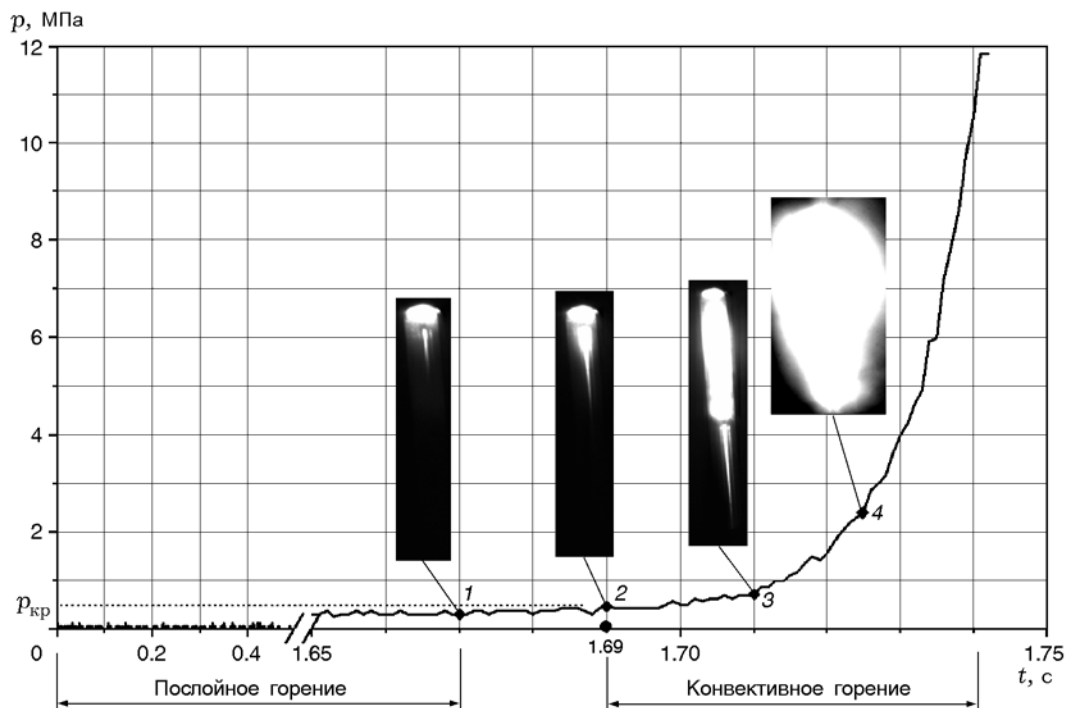


Рис. 2. Изменение давления во времени в бомбе при горении заряда ВС-3 и видеодиагностика характерных стадий процесса:

1 — проникновение пламени в зазор, 1-2 — послышное горение, 2-3 — ускорение горения в зазоре, 3-4 — переход послышного горения в конвективное

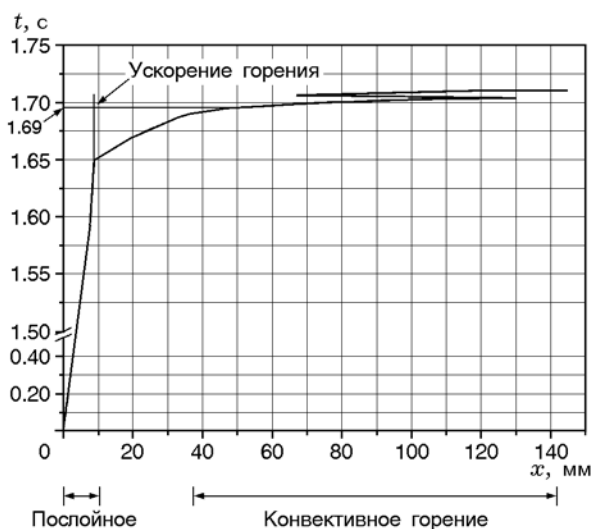


Рис. 3. x - t -Диаграмма движения фронта пламени в зазоре при горении заряда ВС-3

тического давления перехода ($p_{кр}$) послойного горения в конвективное. Момент перехода определялся как точка пересечения аппроксимирующих линий, соответствующих послойному и конвективному горению, и далее из рис. 2 находили $p_{кр}$. С учетом дискретности видеозаписи аппроксимация здесь вполне допустима. Для заряда ВС-3 критическое давление составляло $p_{кр} = 0.5$ МПа ($t = 1.69$ с). По x - t -диаграмме рассчитывали также скорости послойного ($u_{пг}$) и конвективного ($u_{кг}$) горения. Для заряда ВС-1 $u_{пг} = 0.007$ и $u_{кг} = 3.5$ м/с.

В развитии процесса горения нас интересуют два важнейших параметра: критическое давление и скорость роста давления при конвективном горении как характеристика кинетики развития взрыва.

Для всех исследованных ВС удалось подобрать одного вида аппроксимирующую зависимость, описывающую изменение во времени давления в бомбе с коэффициентом корреляции не ниже 0.96:

$$p(t) = A + \exp(Bt + C),$$

где размерность p — МПа, t — с. В этом выражении коэффициент B задает скорость нарастания давления при горении ВС в бомбе, однозначно определяет режим горения и, несомненно, является характерной для данного ВС величиной; параметры A и C определяют начало зажигания и стадию послойного горения. Параметр B может применяться как характе-

Таблица 2

Зависимость $p(t)$ для взрывчатых составов

ВС	ВВ	$p(t) = A + \exp(Bt + C)$
ВС-1	ГАВ/ТАТБ	$1.47 + \exp(1010t - 855)$
ВС-2	Октоген/ТАТБ	$0.84 + \exp(20t - 112)$
ВС-3	Октоген	$1.27 + \exp(130t - 223)$
ВС-4	Октоген	$3.28 + \exp(131t - 191)$
ВС-5	Апрол	$0.12 + \exp(51t - 160)$
ВС-6	ГАВ	Нет данных
ВС-7	Тэн	$0.22 + \exp(10t - 195)$
ВС-8	Гексоген	$1.55 + \exp(50t - 77)$
ВС-9	БТФ	$0 + \exp(5200t - 3650)$

ристика интенсивности развития процесса горения ВВ. Зависимости $p(t)$ для исследованных взрывчатых составов приведены в табл. 2.

Использованные в работе способы оптической регистрации дают возможность оценить лишь линейную скорость фронта конвективного горения, что не позволяет сделать вывод о конечной стадии процесса, поэтому конечный результат определяли по характеру деформации и разрушения бомбы после завершения эксперимента:

состояние I — разрушение окна или срыв крышек бомбы — свидетельствует об отсутствии детонационных режимов в ВВ;

состояние II — разрушение бомбы на крупные куски — указывает на переход конвективного горения в низкоскоростное взрывчатое превращение;

состояние III — разрушение бомбы на мелкие куски — свидетельствует о переходе конвективного горения в нормальную детонацию.

Поскольку такая оценка носит качественный характер, то заключение о возникновении низкоскоростного взрывчатого превращения или нормальной детонации является предположительным.

В табл. 3 приведены результаты экспериментального исследования горения зарядов ВВ. Поскольку прочность ВВ существенно влияет на процесс горения [7] вследствие роста динамического давления, то ВС в табл. 3 представлены по прочностным свойствам как термопластичные и пластичные.

Таблица 3

Результаты опытов по исследованию горения зарядов ВВ

ВС	Компоненты ВВ	Параметры горения				Результаты опытов	
		$p_{кр}$, МПа	B , c^{-1}	$u_{ПГ}$, $10^{-3} м/с$	$u_{КГ}$, м/с	процесс горения	состояние бомбы
Термопластичные							
ВС-1	ГАВ/ТАТБ	0.6	1 010	Нет данных	Нет данных	Переход ПГ в КГ, взрыв	II
ВС-2	Октоген/ТАТБ	3.3	20	0.4	2.5	Переход ПГ в КГ, взрыва нет	I
ВС-3	Октоген	0.4	130	7	3.5	—//—	II
ВС-4	Октоген	0.4	131	Нет данных	Нет данных	—//—	I
ВС-5	Апрол	1.1	51	5	1	—//—	I
ВС-6	ГАВ	Нет данных	>1 010	Нет данных	Нет данных	Переход ПГ в КГ, детонация	III
Пластичные							
ВС-7	Тэн	3.8	10	Нет данных	Нет данных	Переход ПГ в КГ, взрыва нет	I
ВС-8	Гексоген	0.8	50	5	4	—//—	I
ВС-9	БТФ	0.3	5 200	10	110	—//—	I

Примечание. ПГ — послыное горение, КГ — конвективное горение.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТОВ

При анализе результатов опытов с термопластичными ВС (см. табл. 3) установлено, что при $B \geq 130 c^{-1}$ разрушение манометрической бомбы может происходить как до состояния I, так и до состояний II и III. По-видимому, значение $\approx 130 c^{-1}$ является пороговым для перехода конвективного горения во взрыв и детонацию в данной манометрической бомбе с зарядом ВВ, имеющим щелевой зазор 0.5 мм, и его следует принять в качестве критерия указанного перехода.

Наиболее катастрофическое разрушение бомбы (см. табл. 3, состояние III) происходит в опытах с составом ВС-6 на основе ГАВ, одного из самых мощных ВВ, причем в опыте не удалось зарегистрировать давление газов в момент разрушения из-за высокой скорости процесса. Поэтому в табл. 3 значение $B > 1 010 c^{-1}$ приведено по результатам опытов с ВС-1, также содержащим ГАВ. 50%-я добавка ТАТБ к ГАВ снизила скорость горения ВС-1, и бомба разрушилась до состояния II, однако значение B все равно осталось одним из наибольших ($B = 1 010 c^{-1}$).

В табл. 3 обращает на себя внимание тот

факт, что в манометрической бомбе послыное горение зарядов пластичных составов во всем интервале значений B ($10 \div 5 200 c^{-1}$) переходит в конвективное горение, но не переходит во взрыв и детонацию. Отсутствие перехода конвективного горения во взрыв и детонацию пластичного состава ВС-9 с $B = 5 200 c^{-1}$ при самой высокой скорости $u_{КГ} = 110 м/с$ свидетельствует о том, что низкая прочность (пластичность) ВС препятствует развитию поверхности его горения и переходу во взрыв. Этот факт указывает на способ предотвращения катастрофических последствий горения ВВ путем выбора соответствующих связок в рецептуре ВС и специальных конструкторских решений.

В опыте с составом ВС-5 (апрол) получено значение $B = 51 c^{-1}$ при достаточно высоком давлении перехода послыного горения в конвективное и самой низкой скорости конвективного горения — 1 м/с. Состояние бомбы I и низкое значение B свидетельствуют о высокой пожаро- и взрывостойкости этого состава.

На рис. 4 представлена диаграмма, иллюстрирующая по данным табл. 3 возможную взаимосвязь между значениями $p_{кр}$ и B . За-

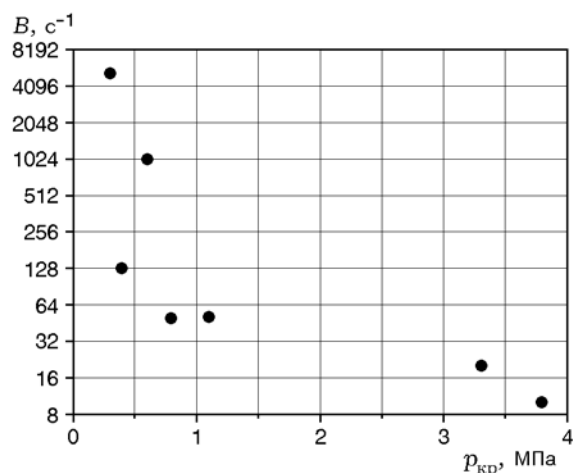


Рис. 4. Зависимость $B(p_{кр})$

висимость $B(p_{кр})$ еще раз подтверждает то, что при низких значениях B реализуется существенно более высокое пороговое давление перехода послыного горения в конвективное и во взрыв, т. е. параметр B является характеристикой пожаро- и взрывоопасности ВС.

Результаты опытов по исследованию перехода послыного горения в конвективное и во взрыв позволяют расположить ВВ из табл. 2 в следующем порядке по возрастанию интенсивности развития неустойчивости горения (параметру B), или пожаро- и взрывоопасности: ВС-7, ВС-2, ВС-8, ВС-5, ВС-4, ВС-3, ВС-1, ВС-6, ВС-9.

ВЫВОДЫ

Методом возрастающего давления (в манометрической бомбе) при одновременной видеорегистрации процесса проведено исследование развития горения в щелевом зазоре 0.5 мм зарядов из пластифицированных ВВ: тэн, гексоген, октоген, апрол, бензотрифуроксан, гексанитрогексаазаизовюрцитан.

Для каждого взрывчатого состава определены критическое давление перехода послыного горения в конвективное и во взрыв, скорости послыного и конвективного горения.

Для всех изученных составов изменение давления в бомбе с высокой степенью корреляции описано единой зависимостью.

Установлено, что параметр B определяет динамику развития горения ВС в манометрической бомбе и безусловно связан с типом разрушения бомбы. В соответствии со значением параметра B проведено ранжирование исследованных ВС по степени их пожаро- и взрывоопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. Ф., Коротков А. И., Сулимов А. А., Сукоян М. К., Обменин А. В. Развитие горения в единичной поре // Физика горения и взрыва. — 1969. — Т. 5, № 1. — С. 8–14.
2. **The Insensitive High Explosive**. Triaminotritrobenzene (TATB): Development and Characterization — 1888 to 1994 / Brigitia M. Dobratz. — LANL, California USA, contract W-7405-ENG-36. — <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00353872.pdf>.
3. **Polymer-bonded explosive** // Wikipedia, the Free Encyclopedia. — http://en.wikipedia.org/wiki/Polymer-bonded_explosive.
4. **Пиросправка**: справочник по взрывчатым веществам, порохам и пиротехническим составам. — 6-е изд. — М., 2012. — http://chemistry-chemists.com/N2_2013/P1/pirospravka2012.pdf.
5. **Pyin V. P., Smirnov S. P., Kolganov E. V., Pechenev Yu. G.** Thermoplastic explosive compositions on the base of hexanitrohexaazaisowurtzitane // VIII Забабахинские научные чтения. — Снежинск, 2005. — <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/8zst/s2/2-21.pdf>.
6. **Справочник** по взрывчатым веществам. — www.exploders.info.
7. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 2/VII 2014 г.,
в окончательном варианте — 6/VIII 2014 г.