

*Н.П. Логинов***ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТВЕРДЫХ ВВ К ВИБРАЦИИ**

Исследована чувствительность твердых ВВ к вибрации и найдена ее зависимость от параметров последней и применяемых типов роликовых приборов, моделирующих различные условия деформации. Предложен способ определения чувствительности к вибрации по вероятности возбуждения взрывов в зависимости от параметров вибрации, приведены экспериментальные данные о чувствительности некоторых ВВ, о величинах напряжений и деформаций в образцах, рассмотрен механизм инициирования взрыва при циклических нагрузках.

Чувствительность твердых взрывчатых веществ (ВВ) к различным видам внешних воздействий — одна из основных характеристик, определяющих взрывоопасность при их получении и использовании. Наиболее подробно изучена чувствительность ВВ к тепловому и механическому (удар, трение) воздействиям [1—5]. О чувствительности ВВ к вибрации данных очень мало [6, 7].

Цель данной работы — определение чувствительности ВВ к вибрации, установление зависимости ее от параметров вибровоздействия и условий деформации, исследование механизма инициирования ВВ вибронагрузками.

Существующие в настоящее время методы оценки чувствительности на копрах, например по ГОСТ 4545-88, неприменимы для оценки чувствительности к вибрации, поскольку они не учитывают ее особенностей. В частности, вибрация характеризуется чередованием циклов нагрузка — разгрузка, каждый цикл нагружения сравним по длительности со временем удара (10^{-2} — 10^{-3} с), а общая продолжительность воздействия — с длительным трением (10 — 10^3 с). Усилия изменяются по периодическому закону, существуют виброударный (отрывной) и виброволновой (безотрывной) режимы нагружения. В ходе вибрации в твердых веществах протекают усталостные процессы, изменяющие прочность, пластичность и коэффициенты внешнего и внутреннего трения. Более того, удар, быстрый сдвиг или ударное трение можно рассматривать как частный случай вибрации с краткостью циклов, равной единице.

Нерешенным остается вопрос о критериях оценки чувствительности ВВ к вибрации, поэтому рассмотрим возможность использования критериев чувствительности к удару и трению [1—4] к оценке чувствительности при вибрации.

Чувствительность ВВ к удару характеризуется различными критериями: частью (вероятностью) взрывов на копре К-44-11 при падении груза массой 10 кг с высоты 25 см [1]: нижним пределом, т.е. высотой падения груза, начиная с которой возникают взрывы [4]; высотой падения груза массой 2,5 кг, когда вероятность взрывов составляет 50 % [8]; критическим напряжением, при котором происходит взрыв тонкого слоя ВВ в полуограниченном пространстве с вероятностью 100 % [4]; порядком расположения кривых частоты взрывов разных ВВ в сравнении с опорным рядом чувствительности при одинаковых условиях испытаний [2, 4]; удельной работой удара, затраченной на возбуждение взрыва [1, 2], а также поглощенной энергией, вызывающей взрыв образца заданной массы [1, 2].

Чувствительность к трению определяют по кривым частоты взрывов на копре К-44-11 в зависимости от давления прижатия и угла сброса маятникового груза, по нижнему давлению прижатия, начиная с которого возникают взрывы [1, 4], по частоте взрывов как функции давления прижатия и скорости вращения пуансона при заданном времени трения [9].

Такое разнообразие характеристик чувствительности к удару и трению говорит о сложной зависимости чувствительности от параметров механического воздействия, условий эксперимента и типов испытательных приборов.

По этой же причине чувствительность к вибрации не может быть охарактеризована какой-либо одной величиной.

С практической точки зрения необходимо надежно определить параметры внешнего механического воздействия, при которых возникает взрыв испытуемых ВВ, т.е. нужно установить зависимость вероятности взрывов W_i от частоты f , амплитуды A , ускорения колебаний a , динамической нагрузки P_d , отношения динамической нагрузки к статической P_d/P_c , энергии колебаний, поглощенной образцом Q :

$$W_i = U(f, A, a, P_d, P_d/P_c, Q).$$

Для нахождения такой зависимости предлагается методика, заключающаяся в том, что навеска ВВ массой 0,05 г подвергается одновременному действию вибрационной и статической нагрузок с заданными параметрами на виброустановке, описанной в [6]. Перед началом испытания ВВ помещают между двумя роликами, подпрессовывают на виброустановке до определенного статического давления и включают вибратор, создающий циклическую нагрузку заданное время. Затем по остаткам образца регистрируют результат опыта в виде качественной пробы на отсутствие или наличие взрыва. Проводится не менее 10 параллельных опытов при тех же параметрах вибрации. Время вибрации можно задавать в зависимости от программы испытаний, а при массовых испытаниях рекомендуется ограничить время вибрации 30 с, поскольку экспериментально установлено, что взрыв возникает, как правило, в первые 30 с вибровоздействия.

Для ускорения процедуры определения чувствительности целесообразно получить зависимости W_i от отдельных параметров вибрации при условии постоянства других. Также зависимости для некоторых ВВ приведены на рис. 1.

Любое ВВ испытывает до тех пор, пока не установят максимальные параметры вибрации, не вызывающие взрыва (нижний предел), и минимальные параметры воздействия, вызывающие взрыв с $W_i = 100\%$ (верхний предел).

На вероятность взрывов кроме параметров вибрации оказывает влияние также закон деформации образца, зависящий от физико-механических свойств ВВ и конструкции роликовых приборов. Поэтому для получения более объективной информации о чувствительности к вибрации нужно проводить испытания в роликовых приборах, обеспечивающих создание

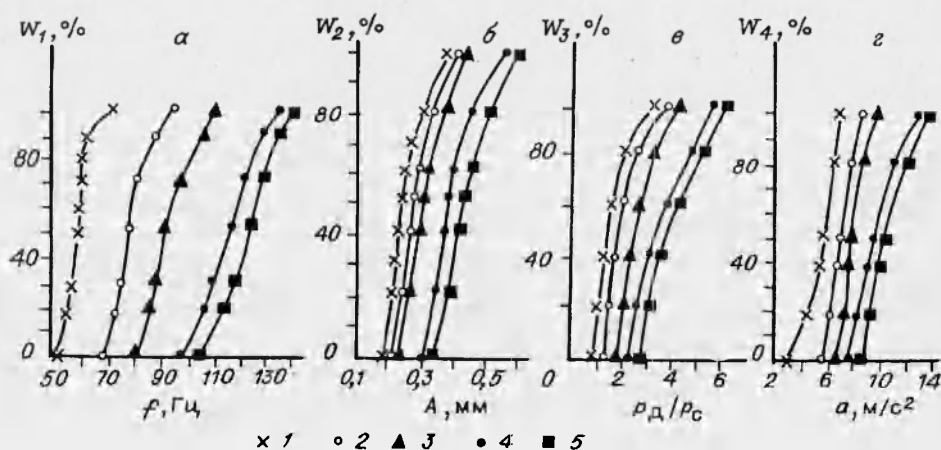


Рис. 1. Зависимости вероятности взрывов ВВ от параметров вибрационной и статической нагрузок при испытаниях в роликовом приборе 1а.

a — от частоты колебаний, $A = 0,62$ мм; $б$ — от амплитуды колебаний, $f = 150$ Гц; $в$ — от отношения динамической нагрузки к статической, $f = 150$ Гц; $г$ — от ускорения колебаний, $P_c = 42$ МПа. 1 — гремучая ртуть; 2 — азид свинца; 3 — ТЭН; 4 — октоген; 5 — гексоген.

условий всестороннего сжатия (прибор 1), свободного истечения ВВ при разрушении образца (прибор 2 с выточкой в средней части муфты), истечения образца под давлением (прибор 1а с отверстием диаметром 1 мм в нижнем ролике).

Менее чувствительным будет ВВ, взрывающееся под действием вибрации с более высокими величинами f , A , a и P_d/P_c . Если для данного ВВ после испытаний получаются полные кривые вероятности взрывов, его можно сопоставить с чувствительностью известных ВВ из опорного ряда [4], определив тем самым его относительную чувствительность.

Из результатов опытов, представленных на рис. 1, следует, что зависимость W_i от различных параметров нелинейная. У каждого из испытанных ВВ есть максимальная частота, когда нет взрывов, и минимальная частота, соответствующая $W_i = 100\%$ (рис. 1,а).

Зависимость $W_i(A)$ может быть получена при $f > 120$ Гц. На рис. 1,б приведена эта зависимость, из которой следует, что существует сильное влияние амплитуды на возбуждение взрыва ВВ, которое обусловлено повышением работы колебаний с ростом амплитуды при постоянной величине f .

Влияние P_d/P_c на W_i (рис. 1,в) дает возможность выявить зависимость W_3 от разных видов колебаний при постоянной частоте и динамической нагрузке. Опыты подтверждают более высокую чувствительность ВВ при виброударном режиме ($P_d/P_c > 2$) по сравнению с виброволновым ($P_d/P_c < 2$) из-за большей неоднородности распределения энергии колебаний по образцу ВВ при меньшей стабильности величин усилий, воздействующих на ВВ в разных циклах нагружения. Так, изменение P_d/P_c от 1,5 до 6 при $f = 150$ Гц приводит к изменению вероятности взрывов W_3 от 0 до 100% у ТЭНа. Подобная зависимость наблюдается и у других ВВ.

Большое влияние на вероятность взрывов оказывает ускорение колебаний (рис. 4,г), с величиной которого непосредственно связана динамическая нагрузка, создаваемая на ВВ. При условии постоянства колеблющейся массы P_d будет пропорциональна ускорению. С увеличением ускорения у гремучей ртути с 2,5 до 6,5 м/с², а также с 6,5 до 9 м/с² — у ТЭНа при $f = 150$ Гц вероятность взрывов возрастает с 0 до 100%. Подобные зависимости $W_4(a)$ имеют место для азида свинца, октогена, гексогена. Легкоплавкие ВВ (тетрил, тротил), подплавляясь, легко вытекают из-под вибрирующих роликов в зазоры роликового прибора и не взрываются в исследованном диапазоне ускорения колебаний и динамических нагрузок.

Влияние условий испытаний, в частности применения разных конструкций испытательных приборов, весьма существенно, поскольку при этом изменяются закономерности неупругой деформации образцов. Так, при испытании ранее перечисленных ВВ в приборе 1 взрываются только наиболее чувствительные из них — гремучая ртуть, азид свинца, ТЭН — при $f = 20 \div 150$ Гц, $A = 0,2 \div 1,0$ мм, $F_d = 20 \div 400$ МПа, $P_c = 15 \div 252$ МПа.

Опыты с ВВ в приборе 2 также не подтверждают высокой чувствительности в условиях виброн нагружения образцов в полуограниченном пространстве, поскольку в первые секунды вибрации значительная часть образца выдавливается в свободное кольцевое пространство в муфте этого прибора. Оставшаяся часть между роликами образует слишком тонкий слой, по которому взрывная реакция не распространяется. В приборе 2 взрыв при вибрации крайне трудно получить даже у самых высокочувствительных ВВ. Например, у ТЭНа при максимально достижимых параметрах вибрации $W_i \geq 20\%$.

Повышенную чувствительность имеют ВВ при испытаниях в приборе 1а с отверстием в нижнем ролике (табл. 1), что указывает на существенное значение процессов диспергирования и активации в формировании благоприятных условий быстрых химических реакций при циклическом нагружении. В экспериментах установлено, что в приборе 1а взрывы начинают возникать при меньших значениях параметров вибрации, чем в приборах 1

Т а б л и ц а 1

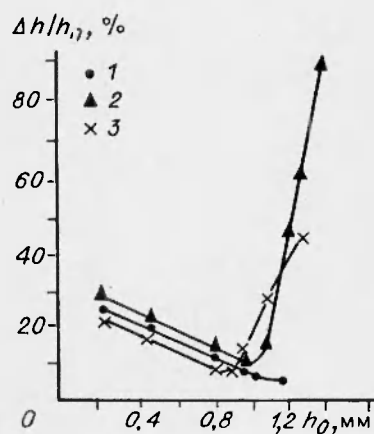
Чувствительность твердых ВВ к вибрации

Вещество	f, Гц	A, мм	a, м/с ²	P _д , МПа	P _с , МПа	P _д /P _с	Вероятность взрыва (%) на приборе		
							1	1а	2
Гремучая ртуть	70	0,68	3,32	62	42	1,40	0	100	50
		0,62	3,04	62	84	0,74		90	10
		0,50	2,45	62	126	0,48		70	0
		0,40	1,96	62	168	0,37		50	0
		0,30	1,87	62	210	0,29		20	0
		0,25	1,22	62	252	0,25		0	0
Азид свинца	70	0,68	3,32	62	42	1,48	0	0	0
	120	0,62	0,94	286	42	6,8	0	100	0
	135	0,62	11,3	352	42	8,4	50	100	40
	135	0,40	7,28	358	84	4,25	40	100	30
	135	0,33	6,0	354	126	2,8	10	60	0
	135	0,28	5,1	348	168	2,07	0	30	0
	135	0,26	4,74	349	210	1,66	0	10	0
	135	0,23	4,18	350	252	1,37	0	0	0
ТЭН	135	0,62	11,3	345	42	8,2	0	100	20
		0,58	10,9	362	50	7,2		60	10
		0,40	7,35	355	84	4,23		20	0
		0,38	7,12	350	105	3,3		0	0
Гексоген	135	0,62	11,4	364	42	8,7	0	80	10
		0,59	10,9	350	50	7,0		30	0
		0,52	9,6	347	67	5,2		10	0
		0,40	7,3	342	84	4,1		0	0
Тетрил	135	0,62	11,4	320	42	7,6	0	0	0
Тротил	135	0,62	11,4	310	42	7,58	0	0	0

и 2. Это обусловлено дополнительной механоактивацией частиц ВВ при их диспергировании и продавливании в узкое отверстие в ролике.

На основе полученных данных проанализируем причины разной чувствительности ВВ к вибрации в зависимости от условий испытаний. Поскольку энергия вибровоздействия, передаваемая от вибратора на образцы, во всех типах роликовых приборов одинакова при тех же параметрах вибрации, то различие в полученных результатах следует связывать с интенсивностью и локальностью деформации и с неоднородностью распределения напряжений.

Проверка этого предположения проведена измерением высоты запрессованных под давлением 252 МПа образцов после определенного промежутка времени виброн нагружения. Полученные результаты измерения деформации образцов гексогена в разных типах роликовых приборов показывают



(рис. 2), что в ходе вибрации изменяется высота образцов при постоянном их диаметре 10 мм с разной скоростью. В качестве показателя, характеризующегося относительное изменение высоты, взято отношение

$$\Delta h = \frac{h_0 - h_i}{h_0} \cdot 100 \%. \text{ На рис. 2 видно, что}$$

этот показатель зависит также от высоты прессованного образца и составляет у гексогена в приборе 1 $5 \div 23 \%$, в приборе 2 $9,7 \div 90 \%$, для прибора 1а $7 \div 45 \%$.

Рис. 2. Зависимость относительной деформации образцов гексогена от их начальной высоты в разных роликовых приборах после вибрации с частотой 150 Гц продолжительностью 30 с.

Т а б л и ц а 2

Нагрузки в образцах ВВ при вибрации в разных типах роликовых приборов

Вещество	Номер прибора	f , Гц	P_d , МПа	P_c , МПа	P_d/P_c	Общая нагрузка, МПа
Азид свинца	1	130	400	84	4,76	400
	1		385	126	3,06	385
	1a		358	126	2,84	358
	2		304	126	2,41	304
ТЭН	1	130	393	84	4,68	393
	1	130	370	126	2,98	370
	1	130	374	252	1,48	440
	1a	130	390	126	3,1	390
	1a	100	280	504	0,55	644
	2	130	334	126	2,6	334
	2	130	378	252	1,5	441
Гексоген	1	130	405	84	4,82	405
	1		394	126	3,1	394
	1		464	168	2,76	464
	1		408	252	1,62	456
	1a		390	252	1,55	447
	2		448	252	1,78	476
Тетрил	1	130	393	84	4,67	393
	1		420	252	1,67	462
	1a		328	84	3,91	328
	2		373	84	4,14	373
	2		359	126	2,8	359
Без ВВ	1	130	510	126	4,0	510
	1	130	530	252	2,07	530

Изменение высоты образца ВВ под действием вибронагрузки обусловлено: диспергированием отдельных частиц и продавливанием их в малые зазоры между роликами и муфтой, дополнительным уплотнением образцов до плотности, составляющей 0,96—0,98 от ее теоретического значения, разрушением исходного образца с выбросом части его либо в отверстие (прибор 1a), либо в выточку муфты (прибор 2), частичным разложением ВВ и уменьшением его массы в ходе вибрации.

Воздействие первых процессов одинаково для всех приборов, а различное влияние двух, вероятнее всего, обусловлено разной скоростью и локализацией неупругой деформации, сопровождающейся выбросом части ВВ в момент разрушения образца. Как показали работы [10, 11], механоактивация твердых веществ всегда приводит к ускорению химических реакций за счет ускоренного образования дефектов кристаллической структуры, образования новых поверхностей при диспергировании частиц, появления локальных разогревов в вершинах трещин. По данным [6, 12], также наблюдаются указанные выше процессы, что подтверждает фотосъемка со скоростью 50 кадр/с вибронагружения ВВ через прозрачную муфту роликового прибора. На кинограмме ясно прослеживается сначала интенсивное диспергирование ВВ с выходом части пылевидного образца в зазоры прибора, а затем происходит уплотнение оставшейся части образца между роликами. В дальнейшем возможно разрушение тонкого слоя из-за усталостных эффектов, а также повторное образование монолитного образца при продолжении вибрации, если ВВ некуда выдавливать.

Учитывая многообразие происходящих в ВВ под действием вибрации процессов, поглощенная энергия релаксирует по многим каналам, в том числе пойдет на разогрев образца, тем самым ускоряя его терморазложение. Наличие продуктов разложения при $f = 37 \div 80$ Гц обнаружено при испытаниях тротила, азид свинца, интроцеллюлозы и других ВВ [13—16], хотя взрывов при этом не наблюдалось. Скорость разложения указанных веществ

была значительно выше, чем при нагревании до 473 К. В то же время измеренный с помощью микротермопар разогрев не превышает 3—70 К, что не дает оснований говорить о чисто тепловом механизме инициирования химических реакций без учета механохимических процессов [12—16].

Различие в количестве рассеянной энергии в образцах в разных конструкциях роликовых приборов подтверждают также результаты измерения напряжений в ходе вибрации с помощью проволочных тензодатчиков с базой 10 мм с регистрацией их изменений во времени на шлейфовом осциллографе Н-004М1 (табл. 2). Сравнение средних значений напряжений для одних и тех же ВВ в разных роликовых приборах показывает, что величины напряжений различны, и они значительно меньше напряжений в роликовом приборе без ВВ. Следовательно, с учетом величин неупругих деформаций и по разности напряжений в роликовых приборах без ВВ и с образцами ВВ можно определить энергию, затраченную на деформационные и химические процессы в любых твердых ВВ.

Сравнение динамических нагрузок и общих нагрузок совместно со статическими составляющими с критическими напряжениями, вызывающими взрыв при ударе на копре [4], указывает на несоответствие их значений критическим напряжениям, поскольку на возбуждение взрыва при вибрации влияют еще амплитудно-частотные характеристики колебательного режима.

При рассмотрении физической модели процесса возбуждения взрыва ВВ при вибрации необходимо до момента возникновения быстрой химической реакции учитывать упругую и неупругую деформацию, изменение физико-механических характеристик образцов из-за усталостных эффектов и химические реакции разложения ВВ.

Таким образом, впервые исследована чувствительность твердых ВВ к вибрации и доказана ее зависимость от параметров последней и условий испытаний. Предложен способ определения чувствительности к вибрации по вероятности взрывов как функции параметров вибрации и соотношения динамической и статической нагрузок. Рассмотрен механизм возбуждения взрыва с учетом закономерностей изменения напряжений и деформаций в образцах в разных типах роликовых приборов. Использование предложенного способа позволяет восполнить пробел в наших представлениях о чувствительности твердых ВВ к механическим воздействиям и позволяет получить более объективные данные о чувствительности ВВ к вибрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теории ВВ. — М.: Оборонгиз, 1960.
2. Холево Н.А. Чувствительность ВВ к удару. — М.: Машиностроение, 1974.
3. Боуден Ф., Иоффе А. Быстрые реакции в твердых веществах. — М.: ИЛ, 1962.
4. Афанасьев Г.Т., Боболев В.К. Иницирование ВВ ударом. — М.: Наука, 1968.
5. Андреев К.К. К вопросу о факторах, обуславливающих возникновение взрыва при ударе и трении и о методах оценки чувствительности ВВ к механическим воздействиям // Сб. статей. Теория ВВ. — М.: Оборонгиз, 1963. — С. 37—53.
6. Логинов Н.П., Муратов С.М., Назаров Н.К. Возбуждение взрыва и кинетика разложения взрывчатых материалов при вибрационных воздействиях // ФГВ. — 1976. — 12, № 3. — С. 410—413.
7. Логинов Н.П., Муратов С.М., Назаров Н.К. Медленное разложение и переход его во взрыв при вибрации // ФГВ. — 1978. — 14, № 5. — С. 154—158.
8. Камлет М. Определение чувствительности твердых ВВ // Сб. статей. Детонация и ВВ. — М.: Мир, 1981. — С. 114—131.
9. Водяник Ю.И., Дубнов Л.В., Маурина Н.Д. О механизме инициирования взрывчатых материалов трением // Материалы III Всесоюз. симп. по горению и взрыву. — М.: Наука. — 1971. — С. 511—514.
10. Хайнике Г. Трибохимия. — М.: Мир, 1987.
11. Болдырев В.В. Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ. — Новосибирск: Наука, 1983.
12. Логинов Н.П., Муратов С.М., Епифанов В.Б. Распад перхлората аммония под действием вибрации // ФГВ. — 1989. — 25, № 1. — С. 64—68.
13. Логинов Н.П., Муратов С.М., Епифанов В.Б. Распад 2, 4, 6-тринитротолуола под действием вибрации // ФГВ. — 1984. — 20, № 6. — С. 97—100.
14. Логинов Н.П. Разложение азиды свинца под действием вибрации // ФГВ. — 1993. — 29, № 4. — С. 88—91.

15. Логинов Н.П. Механоактивация перхлората аммония при вибрационной обработке // XI Всесоюз. симп. "Механохимия и механоэмиссия твердых тел". Чернигов, 1990 / Сб. тез. докл. — Черногловка, 1990. — Т. 2. — С. 44—46.
16. Логинов Н.П., Клименко В.С. Механохимические реакции нитроцеллюлозы при вибрации // XI Всесоюз. симп. "Механохимия и механоэмиссия твердых тел". Чернигов, 1990 / Сб. тез. докл. — Черногловка, 1990. — Т. 2. — С. 112—113.

443010, г. Самара,
СамГТУ

Поступила в редакцию
7/11 1994

УДК 534.222.2

Ю.А. Аминов, А.В. Вершинин, Н.С. Еськов,
О.В. Костицын, Б.Г. Лобойко,
В.С. Любимов, С.Н. Любятинский, Г.Н. Рыкованов, М.А. Стриженок

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ

Представлены результаты расчетного моделирования экспериментов по определению ударно-волновой чувствительности пластифицированного состава на основе ТАТБ. Модель макрокинетики разложения ВВ построена в рамках гипотезы горячих точек.

Экспериментальным исследованиям ударно-волновой чувствительности и построению полуэмпирических моделей макрокинетики детонации гетерогенных ВВ посвящено значительное количество работ. В основном исследовался процесс развития взрывчатого превращения ВВ высокой и средней чувствительности на основе тротила, гексогена, октогена [1, 2]. Обзор предложенных для описания макрокинетики ВВ расчетных моделей можно найти, например в [3—5]. В последнее время большое внимание уделяется изучению свойств низкочувствительных составов на основе ТАТБ [6, 7].

В данной работе представлены результаты расчетного моделирования экспериментов по возбуждению детонации низкочувствительного пластифицированного состава на основе ТАТБ (ПСТ) с начальной плотностью $\rho_0 = 1,91 \text{ г/см}^3$.

При описании макрокинетики для скорости разложения ПСТ использовалось выражение

$$\frac{d\xi}{dt} = -B \frac{\rho_{\text{ВВ}}^{1/3}}{\rho} \xi^{2/3} \exp(-E_a/3E_T) \left(\frac{p}{p_x}\right)^k, \quad (1)$$

где B , k — параметры модели; ξ — массовая концентрация ВВ; E_a — энергия активации; E_T — тепловая составляющая удельной внутренней энергии ВВ; p_x — давление Жуге. Величины ρ , p (плотность и давление смеси ВВ и ПВ в данной точке) определяются из условий механического

равновесия компонентов смеси: $\frac{1}{\rho} = \frac{\xi}{\rho_{\text{ВВ}}} + \frac{1-\xi}{\rho_{\text{ПВ}}}$; $p_{\text{ПВ}} = p_{\text{ВВ}} = p$.

Вывод (1) основан на представлении ВВ в виде сферических гранул. Предполагается также, что распределение тепловой энергии горячих точек подчиняется статистике Больцмана, а фронт волны горения распространяется к центру гранулы со скоростью

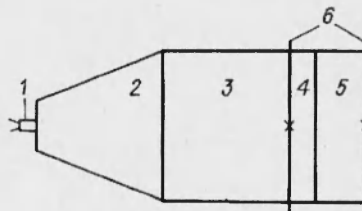


Рис. 1. Схема экспериментов с плоской УВ.

© Ю.А. Аминов, А.В. Вершинин, Н.С. Еськов, О.В. Костицын, Б.Г. Лобойко,
В.С. Любимов, С.Н. Любятинский, Г.Н. Рыкованов, М.А. Стриженок, 1995.