

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. С. Соловьёв

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 107005 Москва

Дан краткий обзор достигнутого уровня исследования проблемы ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ. Отмечаются некоторые особенности как самого процесса ударно-волнового инициирования, так и явлений, его сопровождающих, а именно: влияние профиля нагружения, расходимости потока, температуры образца; указывается возможность проявления фронтальной неустойчивости при слабом инициировании.

Следует признать существование принципиальных отличий инициирования жидких и твердых (литых, прессованных) взрывчатых веществ (ВВ). Отличия являются следствием того, что жидкие ВВ гомогенны, а твердые, изготовленные каким-либо из известных технологических способов, гетерогенны (сказанное не относится к бездефектным монокристаллам, которые подобны беспузырьковым жидкостям). В результате критические параметры ударно-волнового инициирования для однородных бездефектных систем существенно выше, чем для структурно-неоднородных с пористостью  $1 \div 3\%$ . Это связано с тем, что для гомогенных ВВ необходимо в течение определенного времени прогреть объем за фронтом инициирующей ударной волны (УВ). Модель формирования детонационных волн (ДВ) в гомогенных ВВ (нитрометан и его смеси) была предложена Чейкеном и уточнена А. Н. Дрёминым с сотрудниками [1, 2]. Определение критических условий инициирования детонации для гомогенных ВВ сводится к задаче адиабатического теплового взрыва в условиях изменяющейся во времени температуры с заданным ее начальным значением, определяемым начальным давлением инициирующей УВ [1–3].

Гетерогенные ВВ являются химически однородными, но структурно они неоднородны. Для гетерогенных ВВ существенны процессы, протекающие на неоднородностях структуры непосредственно за ударным фронтом. При этом очевидно, что и для гетерогенных ВВ влияние температурного фона из-за объемного разогрева значительно, особенно на стадии резкого ускорения инициирующей УВ и установления стационарной детонации. От баланса между энергией, вводимой в ВВ ударной

волной, и энерговыделением от разложения зависят критические параметры инициирования и пространственно-временная картина течения за фронтом инициирующей УВ.

К локализации выделения энергии приводят следующие структурные дефекты заряда:

- макроуровневые срезы и разрушения на неоднородностях структуры заряда,
- разрыв сплошности течения вблизи пустот, на границах кристаллов и включений,
- дробление и впрыск вещества в полости,
- кумулятивные эффекты в порах,
- фазовые изменения вещества,
- внутрикристаллические дефекты.

Совокупность структурных неоднородностей в веществе — источников локальной генерации тепла — может быть представлена следующей схемой (рис. 1). Определяющая роль того или иного механизма локальной генерации тепла до последнего времени является предметом дискуссии. В зависимости от физико-механической структуры и свойств ВВ, его пористости, совокупности термокинетических характеристик и характера действующей нагрузки условия начала разложения в очаге могут быть достигнуты при любом механизме генерации тепла [1, 4–8]. Однако, как следует из рис. 2, эффективность этих механизмов не равнозначна и по проведенным оценкам может быть в порядке возрастания представлена следующим образом: деформационный макрозаогрев — ударно-волновой разогрев — фрикцион-

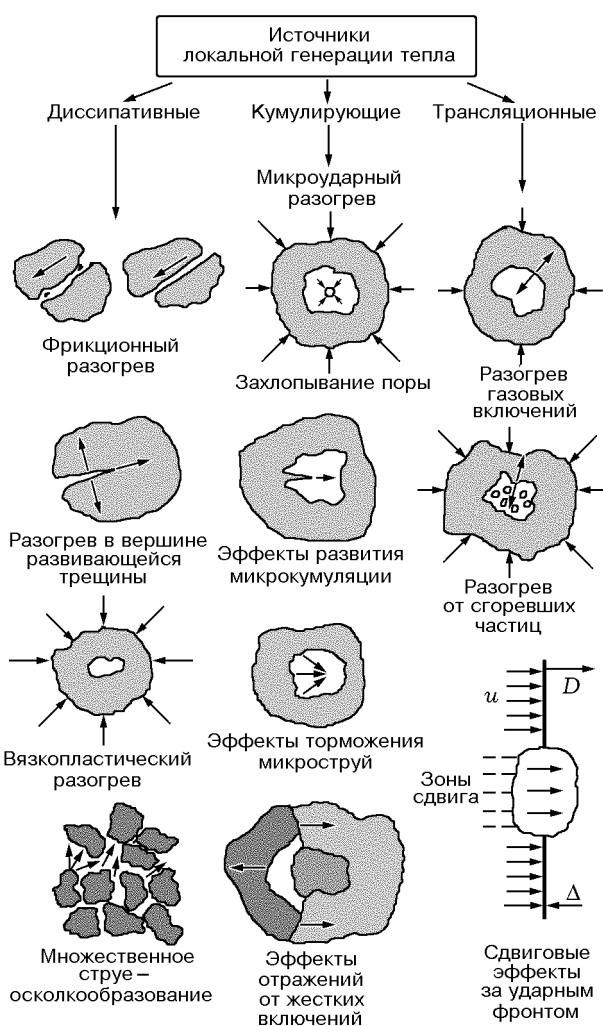


Рис. 1. Источники локальной генерации тепла

ное тепловыделение — вязкопластический локальный разогрев. Следует отметить важный момент, а именно: достаточный для начала химической реакции разогрев в очаге еще не гарантирует распространения процесса в объеме, а следовательно, создания предпосылок формирования самоподдерживающейся инициирующей УВ и ее перехода в детонационную. Последнее возможно только в тех случаях, когда создаются необходимые условия для суммирования энергии элементарных процессов, когда развитие процесса в очагах приобретает коллективный характер и роль газодинамики становится преобладающей. В результате возрастает влияние фронтальных процессов и формируется локальная зона максимума давления и массовой скорости, а именно ударно-волновой комплекс с энерговыведением в непосредственной близости от фронта, способный при определен-

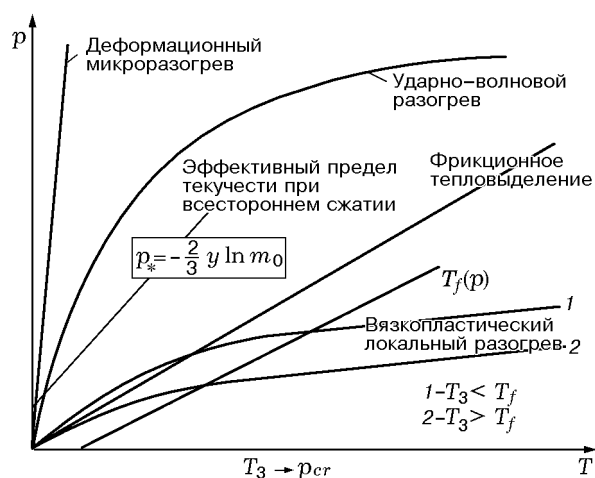


Рис. 2. Сравнение эффективности элементарных процессов

ных условиях перестроиться в стационарный, детонационный.

Вместе с тем в проблеме ударно-волнового инициирования есть аспекты, на которые нет единого взгляда, но которые важны с точки зрения дальнейшего развития наших представлений. К ним следует отнести:

- инициирование детонации цилиндрически УВ,
- изменение ударно-волновой чувствительности при предварительном нагружении слабыми УВ,
- эффекты неустойчивости и неидеальности при инициировании и развитии детонации,
- явления, сопровождающие затухание ДВ и конечную стадию перехода инициирующей УВ в детонационную,
- влияние температуры на ударно-волновую чувствительность.

Существует достаточно много критериев ударно-волнового инициирования, предложенных различными авторами, придерживающимися своих взглядов на проблему ударно-волновой чувствительности. Некоторые из них приведены в таблице.

### ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ НАГРУЖЕНИЯ НА ИНИЦИИРОВАНИЕ ВВ

Установлено существенное влияние спада давления на скорость разложения ВВ, а следовательно, и на переход инициирующей УВ в

Критерии инициирования детонации плоской инициирующей УВ

№ п/п	Критерий	Содержание	Источник
1	$p_{cr} = \text{const}$	Существование минимального давления (критического) инициирующей УВ, способного вызвать детонацию	[3]
2	$u_{cr} = \text{const}$	Существование минимальной массовой скорости (критической) за фронтом инициирующей УВ, способной вызвать детонацию	[3]
3	$e_{int} = u_{cr}^2/2 = \text{const}$	Постоянство приращения удельной внутренней энергии	[9]
4	$\frac{du}{dt} \geq 0$	$\frac{du}{dt} = f_1(u) \frac{\partial u}{\partial t} + f_2(u) \rho Q_{p,v} \Gamma w - f_2 \frac{2\rho c^2 u}{r}$ — «критическое ускорение». Условие незатухания фронта инициирующей УВ	[10, 11]
5	$p_{por} = \frac{2Y}{3} \ln \left[ 1 + (\alpha_0 - 1)^{-1} \exp \left( \frac{3e_{int}}{2Y} \right)^h \right]$	Существование порогового давления инициирования очаговой химической реакции	[1]
6	$E_{cr}^{(1)} = \frac{m_{imp} V_0^2}{2} = \text{const}$ $E_{cr}^{(2)} = p_0 u_0 t_0 = \text{const}, E_{cr}^{(3)} = p_0^2 t = \text{const}$	Постоянство удельной критической энергии ударника	[12, 13]
7	$[p_0 u_0 - (pu)_{por}] t_0 = \text{const}$ $(p_0^2 - p_{por}^2) t_0 = \text{const}$	Постоянство минимального инициирующего импульса	[14]
8	$p_0^2 t_0 / (z^{-2} - 1) = \text{const}, z = p_1 / p_0$	Условие развития химического разложения после прихода тыльной волны разрежения	[10, 15]
9	$p_i^N t_i^f = \text{const}$	Гидродинамический масштабный закон	[16]
10	$p_0^n t_0 = \text{const}$	Условие развития реакции после прихода волны разрежения на границу нагружения	[17]
11	$t_0 = t_a = \frac{c_v T^2}{z Q E} \exp \frac{E}{RT}$ $T = T_0 + u^2 / 2c_v$	Условие образования локальных очагов реакции на границе нагружения до прихода волны разрежения	[18]
12	$E_{cr} = \frac{c_v T \rho}{\mu} \left[ \frac{2(1+\nu)\delta Y^2}{Q_f E} \frac{u^2}{\Delta u} \right]^2, T = f(p_0)$	Образование локальных очагов при микродвигах ВВ	[19]
13	$p_0^m l = \text{const}$	Условие возбуждения детонации при ограниченной длине пассивного заряда	[20]
14	$t_{det} = t_a, T = T_0 + u^2 / 2c_v$ $t_{det} = l/D$	Возбуждение детонации при ограниченной длине заряда и условии образования локальных очагов	[21]
15	$t_{det} = t_0 \frac{c_2 + 2\lambda_2 u}{\lambda_2 u}$	Возбуждение детонации при ограниченной длине заряда и условии, что волна сжатия догоняет фронт инициирующей УВ	[19, 22]

Примечание. Здесь  $\Gamma$  — коэффициент Грюнрайзена,  $w$  — степень реагирования среды,  $r$  — радиус кривизны фронта УВ,  $Q_{p,v}$  — теплота взрыва,  $c$  — скорость звука,  $c_2$  — скорость звука в выражении ударной адиабаты,  $Y$  — динамический предел текучести материала,  $m_{imp}$  — масса, приходящаяся на единицу площади ударника,  $\alpha_0$  — параметр пористости,  $e$  — приращение удельной внутренней энергии,  $Q_f$  — теплота плавления,  $\rho$  — плотность ВВ,  $p_0$  — давление в ударной волне,  $p_1$  — остаточное давление после прихода тыльной волны разгрузки,  $t_0$  — длительность действия давления,  $v_0$  — скорость ударника,  $c_v$  — теплоемкость при постоянном объеме,  $D$  — скорость детонации,  $l$  — длина пассивного заряда,  $\nu$  — коэффициент Пуассона,  $\Delta u$  — скорость сдвига,  $t_{det}$  — время задержки инициирования ДВ,  $\delta$  — толщина деформируемого слоя,  $\lambda$  — коэффициент ударной адиабаты,  $t_a$  — адиабатический период индукции,  $n, m, N, f$  — константы.

детонационную [10, 15, 23, 24]. Неучитывание этого фактора означает, что начавшееся в очагах разложение (независимо от интенсивности спада давления) в конце концов приведет если не к выходу на детонационный режим, то к разложению всей массы ВВ. На практике это не так: процесс может перейти в детонацию либо затухнуть. Определяющим фактором является спад давления.

Различные авторы отмечали влияние профиля (спада) давления на критические условия инициирования. Нам представляется удачным следующее объяснение. Многочисленные эксперименты по инициированию гетерогенных ВВ ударными волнами со ступенчато спадающим профилем, генерируемыми ударом пластин из разных материалов, показали, что при одинаковом уровне начальных параметров соударения по критерию  $p^2t = \text{const}$  были получены существенно различающиеся значения критических параметров. Так, например, для состава ТГ-40 (40% тротила, остальное — гексоген) с начальной плотностью  $\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$  значения критерия равны 9,0 и 3,0  $\text{ГПа}^2 \cdot \text{мкс}$  для алюминия и меди соответственно. По нашему мнению, различия связаны с уровнем спада давления за счет тыльной волны разгрузки для различных материалов пластины (рис. 3). Считая, что образование детонационной волны в ВВ определяется не возникновением химической реакции за фронтом инициирующей УВ, а возможностью ее дальнейшего развития после быстрого спада давления, и используя теорию нестационарного горения [15], критерий ударно-волнового инициирования детонации можно представить в виде

$$p^2t = (1/z^2 - 1)C_{\text{ВВ}},$$

где  $C_{\text{ВВ}}$  — константа данного ВВ, характеризующая его чувствительность,  $z = p_1/p_0$  — относительный спад давления (определяется ударными адиабатами ВВ и материала пластины). Приведенное выражение достаточно надежно объясняет разницу чувствительности ВВ при ударе пластинами из различных материалов. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов свидетельствует о существенном влиянии нестационарности процесса горения при разложении ВВ. Данные соображения позволяют судить о роли спада давления и при других видах профиля. Существующие в настоящее время описания кинетики

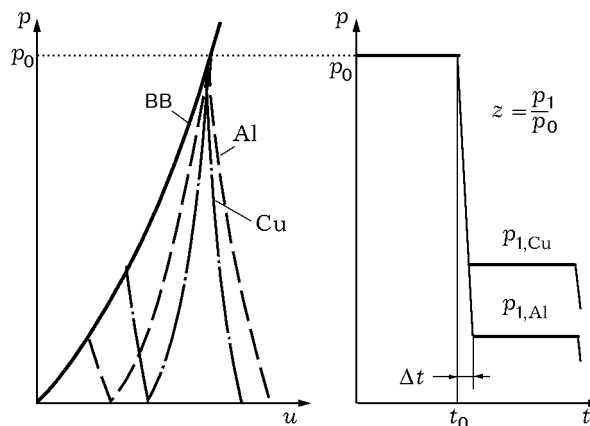


Рис. 3. Диаграммы процесса нагружения ВВ ударом пластин из разных материалов в плоскостях  $p - u$  и  $p - t$

разложения ВВ в форме  $\frac{d\alpha}{dt} = F(\rho, p_f, \alpha)$ , где  $\rho$  — плотность ВВ,  $p_f$  — давление на фронте УВ,  $\alpha$  — степень разложения вещества, непригодны, если исходить из представлений нестационарности горения за фронтом. Данная кинетика подходит только для условий, в которых она получена. В кинетическую зависимость необходимо вводить параметр, учитывающий мгновенное значение градиента температуры на поверхности горения. Не исключено, что уменьшение скорости реакции может быть связано с дивергенцией потока среды [25].

### ИЗБИРАТЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К ФОРМЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИМПУЛЬСА

Установлено, что ВВ обладают избирательной чувствительностью к распределению энергии начального импульса во времени (форма профиля вводимого импульса) [26]. На примере ТНТ и гексогена были получены результаты по избирательной чувствительности для профилей, представленных на рис. 4. Если за характеристику чувствительности принимать амплитуду импульса, формирующего ДВ на определенной глубине заряда, то многочисленные данные свидетельствуют о наибольшей чувствительности ВВ к одноступенчатому прямоугольному импульсу (см. рис. 4, профиль 1). Любое размытие фронта (монотонное, ступенчатое) приводит к падению температуры ударного разогрева и, как следствие, к снижению чувствительности (независимо от того, происходит это в объеме или в окрестностях неоднородностей) в силу увеличения ко-

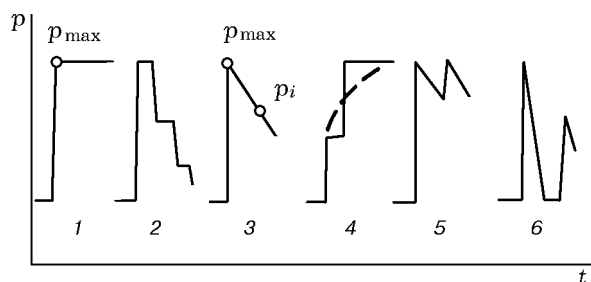


Рис. 4. Монотонные и немонотонные профили нагружения

личества рассеянного тепла и мощности тепловыделения.

Исключение из этого правила составляют немонотонные профили со спадом давления и последующим догружением (см. рис. 4, профили 5, 6), когда импульс давления, предваряющий сжатие, либо генерирует неоднородности в первоначально гомогенном ВВ, либо развивает уже имеющиеся (десенсбилизация ВВ при повторном нагружении).

Принципиальным следует считать тот факт, что в зависимости от формы импульса возможно изменение места ВВ в ряду ударно-волновой чувствительности. Для того чтобы смоделировать реологические характеристики ВВ, был рассмотрен ряд: гексоген при 130 и 20 °С, ТНТ при 20 и 70 °С. Очевидно что для ТНТ при различных начальных температурах изменяются как отношение начальной температуры к температуре плавления, так и предел прочности [27]. Если за показатель чувствительности ВВ к входящей ударной волне взять  $p_{cr}$ , то получим результаты, представленные на рис. 5.

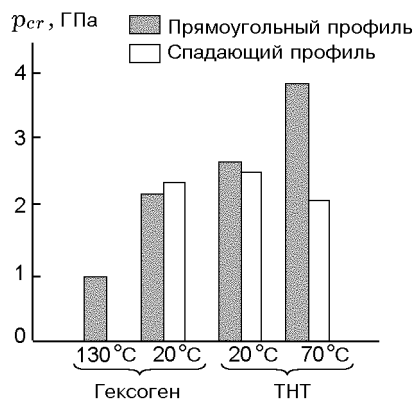


Рис. 5. Влияние профиля нагружения и температуры на ударно-волновую чувствительность

Здесь и далее, не вдаваясь в подробный анализ представленных результатов, отметим следующее. ТНТ при нагружении одноступенчатыми прямоугольными УВ с повышением температуры разлагается медленнее, тогда как для спадающего профиля наблюдается обратная картина. Оказалось, что нагретый гексоген чувствительнее холодного при нагружении не только прямоугольным, но и спадающим профилем.

### ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ «ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ» УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Немногочисленные исследования ударно-волнового инициирования цилиндрическими инициирующими УВ (это связано с трудностью постановки эксперимента) не дают ответа на вопрос о существовании принципиальных отличий в механизмах инициирования и о пригодности существующих критериев оценки критических параметров инициирования для цилиндрического случая. Следует отметить факторы, отличающие плоское нагружение, реализуемое ударом пластины от расходящегося течения при нагружении цилиндрическим ударником, помещенным в отверстие исследуемого заряда ВВ (рис. 6). В этом случае поток за фронтом инициирующей УВ расходящийся, а расходимость потока зависит от начального радиуса (кривизны) соударяющейся пары. Начиная с диаметра трубки 50 мм и более, расходимость потока можно пренебречь. По мере разгона цилиндрический удар-

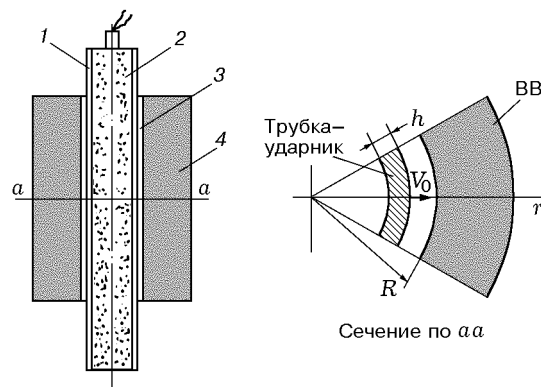


Рис. 6. Схема нагружения «цилиндрическим» ударником:

1 — трубка-ударник (Cu, Al), 2 — металлующий низкоплотный заряд, 3 — зазор, 4 — исследуемое ВВ

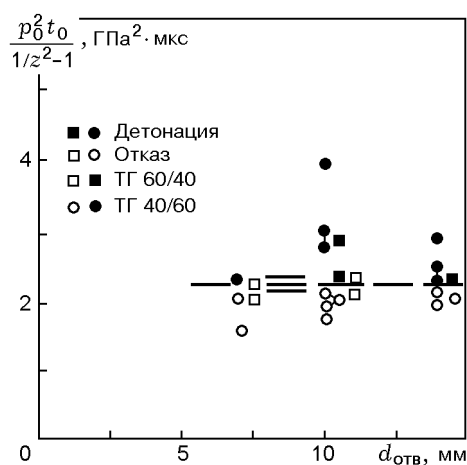


Рис. 7. Критические условия инициирования детонации в «цилиндрически» расходящихся УВ

ник становится тоньше, его толщина зависит от зазора между цилиндрическим ударником и исследуемым зарядом. В наших экспериментах несмотря на то, что трубка разгонялась в «мягком режиме» низкоплотными зарядами ВВ ( $\rho_0 = 0,4 \div 0,6 \text{ г/см}^3$ ), соударение происходило под некоторым углом, и к моменту соударения в трубке сохранялось остаточное давление продуктов детонации-metaющего заряда. Проведенные расчеты для соударяющихся пар Al–ВВ, Си–ВВ, где в качестве исследуемого ВВ взят состав ТГ-40 ( $\rho_0 = (1,64 \pm 0,005) \text{ г/см}^3$ ), показали, что:

- углы взаимодействия цилиндрического ударника с ВВ не превышают  $6 \div 7^\circ$  и не достигают критических значений  $\gamma_{cr}$ ,
- профиль давления на границе раздела подобен тому, какой имеет место в случае плоского соударения, с отличающимися значениями уровня давления,
- в области малых углов соударения ( $\gamma \leq 0,5\gamma_{cr}$ ) наблюдается слабое влияние угла  $\gamma$  на параметры соударения.

Следует отметить, что спад давления за счет расходимости компенсируется остаточным давлением продуктов детонации в трубке-ударнике. Время действия давления в цикле первого волнового взаимодействия легко рассчитывается для данных геометрических размеров схемы с учетом уменьшения толщины трубки. Тогда параметр  $C_{ВВ}$  для цилиндрического случая может быть записан в виде

$$C_{ВВ(ц)} = \frac{p_0^2 t_0}{t(z^{-2} - 1)},$$

где  $C_{ВВ(ц)}$  — аналог константы  $C_{ВВ}$  для цилиндрического случая,  $t_0$  — время прихода тыльной волны разгрузки.

Сравнение полученных данных с результатами [28] представлено на рис. 7.

Таким образом, нам не удалось установить различие процессов инициирования в случаях плоского и цилиндрического течений.

### ИЗМЕНЕНИЕ УДАРНО-ВОЛННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВВ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ СЛАБЫМИ УВ

Потеря чувствительности ВВ при нагружении слабыми ударными волнами получила название ударно-волновой десенсибилизации [29]. Указанное явление было замечено при распространении детонации в шпурах с зазором между ВВ и шпуром, при инициировании экранированных ВВ кумулятивными струями, при переходе детонационной волны через острый угол для зарядов, помещенных в металлические оболочки. Перечислим основные механизмы десенсибилизации:

- гомогенизация заряда: закрытие пор, сведение к минимуму различного рода неоднородностей структуры,
- уменьшение энергосодержания вследствие разложения части ВВ в процессе предварительного сжатия,
- уменьшение температуры ударного разогрева при повторном сжатии.

Следует отметить, что эти процессы релаксационные и протекают в течение некоторого времени.

Необходимым условием десенсибилизации является сохранение достаточно высокого давления к моменту повторного нагружения. В противном случае после предварительного сжатия при спаде давления в волнах разрежения возникают растягивающие напряжения, ВВ меняет свою структуру, что может приводить к сенсбилизации заряда ВВ [27].

В работе [29] экспериментальная методика позволяла нагружать ВВ двумя последовательными калиброванными УВ с требуемой разновременностью. Результаты для гексогена с 5%

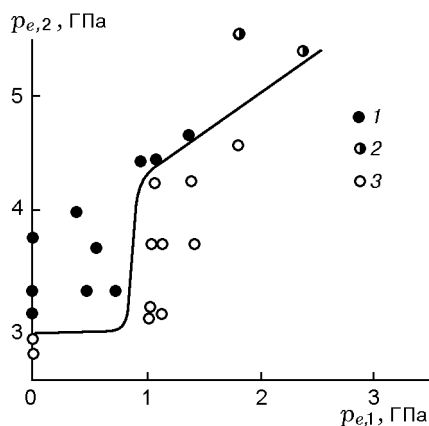


Рис. 8. Критическое давление инициирования детонации в зависимости от амплитуды предварительного нагружения:

1 — детонация заряда ВВ после нагружения второй УВ; 2 — низкоростной волновой режим, сопровождающийся свечением реагирующего ВВ после нагружения второй УВ; 3 — отказ

флегматизатора ( $\rho_0 = 1,625 \text{ г/см}^3$ ) в координатах амплитуды давлений в ВВ первой ( $p_{e,1}$ ) и второй ( $p_{e,2}$ ) ударных волн представлены на рис. 8.

Анализ результатов исследованного явления позволяет отметить основные его особенности. Десенсбилизация в УВ носит пороговый характер, причем пороговый уровень воздействия, необходимый для десенсбилизации, одновременно является пороговым и для начала разложения ВВ. Наиболее контрастно десенсбилизация проявляется у чувствительных ВВ (гексоген, октоген). С увеличением давления в первой УВ давление во второй волне, необходимое для инициирования детонации, увеличивается в  $1,5 \div 2$  раза. Если уровень предварительного сжатия ниже порога десенсбилизации, то увеличение времени между волнами не влияет на конечный результат.

### ЭФФЕКТЫ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И НЕИДЕАЛЬНОСТИ ПРИ ИНИЦИИРОВАНИИ И РАЗВИТИИ ДЕТОНАЦИИ

Эффекты неустойчивости при формировании детонационной волны могут проявляться при неидеальном инициировании, а именно когда начальная скорость фронта и течение за ним существенно отличаются от таковых в установившемся процессе детонации [27]. При критических условиях ударно-волнового инициирования процесс всегда неидеальный. И чем

выше неидеальность, тем в большей степени система способна к проявлению различного рода неустойчивости. То, что при неидеальном инициировании детонация устанавливается на определенной глубине, а динамика ее формирования для различных ВВ отлична, — очевидный факт. Вместе с тем за последние годы накоплен экспериментальный материал, позволяющий шире взглянуть на проблему и в определенной степени систематизировать накопленные факты. На рис. 9 представлена совокупность составляющих неидеальности при инициировании и развитии детонации, в том числе и в схемах более сложных, чем плоское ударно-волновое инициирование.

К причинам появления фронтально-поперечной неустойчивости могут быть отнесены следующие:

- фронтальная неустойчивость при переходе инициирующей УВ в детонационную в момент резкого ускорения фронта,
- структурно-реологическая неоднородность заряда и связанная с ней неоднородность энерговыделения,
- амплитудно-временная характеристика инициирующего импульса,
- появление зон десенсбилизации (сенсбилизации) как следствие сложного профиля нагружения,
- резкие изменения направления движения инициирующей УВ в условиях, близких к пределу распространения детонации.

Возможна и комбинация нескольких факторов. Достаточно изучены системы с так называемой заложенной природной неустойчивостью, такие, как нитрометан — ацетон [2], когда детонационный фронт пульсирующий, что и определяет возможность его распространения. Отметим, что модель детонации, в которой процесс сопровождается множественным упорядоченным взаимодействием косых УВ, не является единственной. Мы столкнулись с результатом, который не укладывается в модель [2]. В экспериментах по отражению пульсирующего фронта от сапфира получены значительно большие длительности задержек воспламенения, чем следовало ожидать. Полученным результатам не противоречит и следующая трактовка. За каждым элементарным взаимодей-

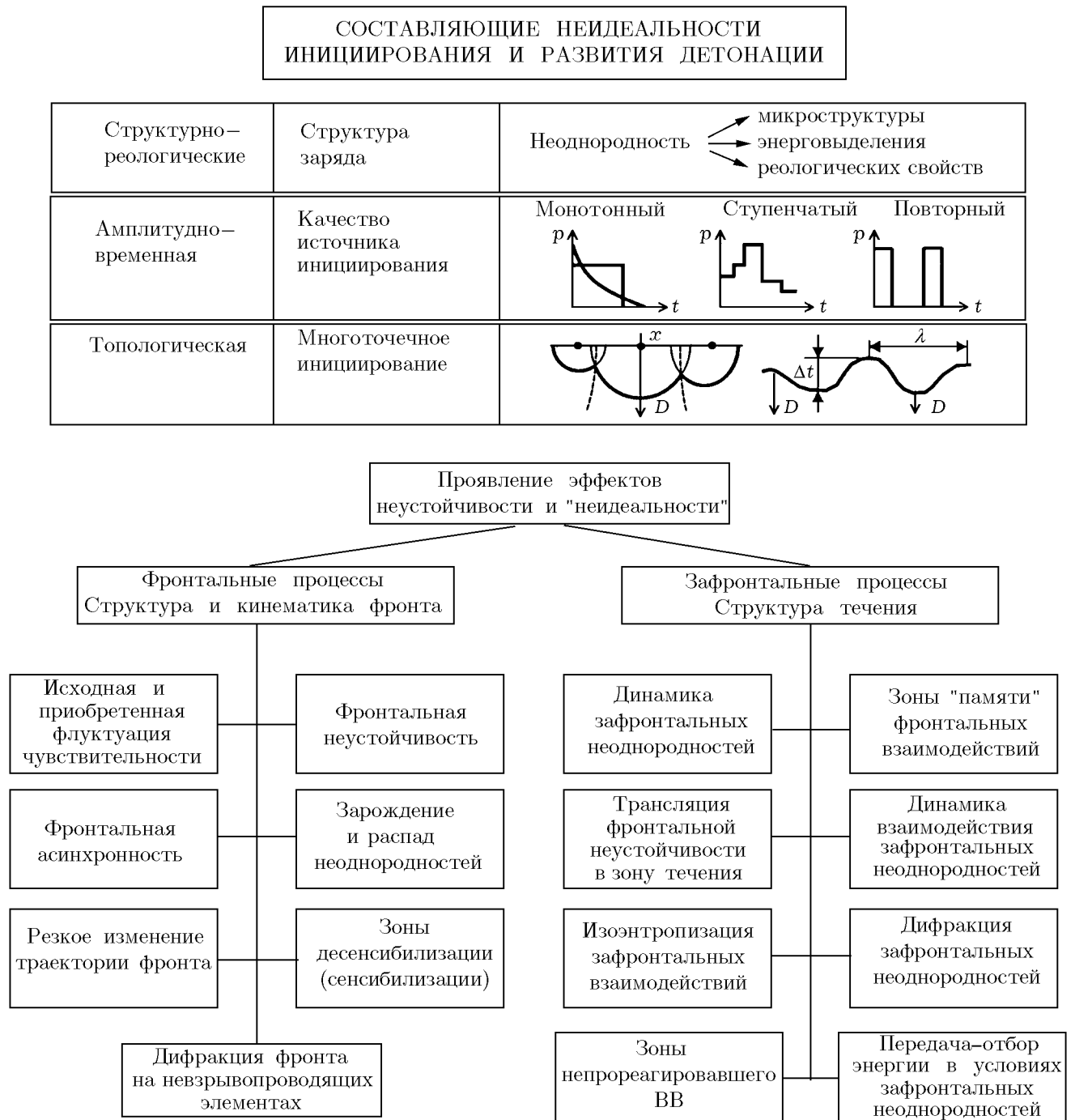


Рис. 9. Составляющие неидеальности



ствием в отраженных волнах возможно понижение плотности ВВ. При взаимодействии «пористой» области с жесткой преградой требуется значительно меньшее давление, чтобы произошел взрыв.

### ЯВЛЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЗАТУХАНИЕ ДВ И ПЕРЕХОД ИНИЦИИРУЮЩЕЙ УВ В ДЕТОНАЦИОННУЮ

Систематических исследований резкого ускорения фронта инициирующей УВ или затухания ДВ в высокоплотных ВВ немного. Структура фронта при ударно-волновом инициировании в критических условиях, когда толщина заряда примерно равна глубине перехода инициирующей УВ в детонационную, свидетельствует о существовании фронтальной неустойчивости, проявляющейся в наличии локальных впадин [30]. По мере увеличения расстояния, пройденного инициирующей УВ со скоростью, практически равной скорости установившейся детонации, неоднородности сглаживаются. Вместе с тем метание относительно тонких медных пластин с торца заряда при установившейся скорости детонации в заряде и его высоте, превышающей как минимум в два раза глубину выхода на стационарный режим, показало, что на пластинах обнаруживаются локальные неоднородности и разрушения с топографией, характерной для формы негладкой инициирующей УВ в зоне перехода ее в детонационную. Эти результаты интерпретируются как проявление «газодинамической памяти» потока за фронтом, длительное время сохраняющего существенную неоднородность за уже гладким фронтом.

Длительное сохранение неоднородностей состояния за фронтом легко воспроизводится при искусственном многоточечном возбуждении детонации в чувствительной смеси тетранитрометан — бензол 70/30 (рис. 10). На фоторегистрограмме отчетливо видны яркие вспышки при выходе ДВ на торец заряда при относительно гладком детонационном фронте. Если на свободную поверхность заряда положить металлическую пластину, она будет разрушена в местах ярких вспышек.

Таким образом, не вдаваясь в подробное обоснование причин появления фронтальной и, как следствие, зафронтальной неустойчивости, отметим следующее: в момент выхода инициирующей УВ на детонационный режим при слабом инициировании и в момент затухания ДВ фронт теряет устойчивость независимо от при-

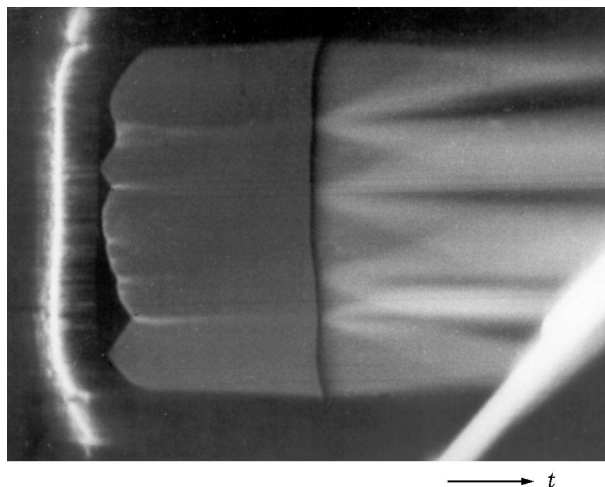


Рис. 10. Фоторегистрограмма выхода детонации на торец при многоточечном инициировании

чин. В рамках сказанного становится неопределенным понятие глубины перехода инициирующей УВ в детонационную. Так как эта характеристика процесса инициирования ВВ определяется, как правило, экспериментально, то измерения проводятся как раз в зоне неустойчивого течения со всеми вытекающими обстоятельствами, в том числе и по точности измерений. Кроме того, существуют ситуации для систем слабого (точечного) инициирования, когда фронтальные асинхронности существенно превышают структурные неоднородности [30] и сохраняются на значительных базах, что приводит к резкой асимметрии детонационного фронта (рис. 11).

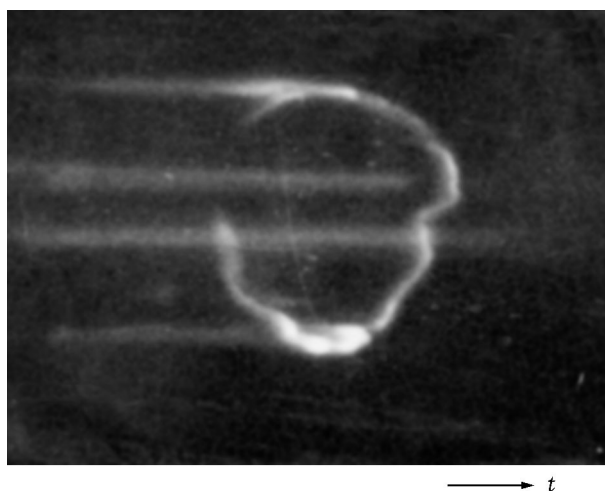


Рис. 11. Торцевая развертка, полученная с использованием круговой щели, при слабом инициировании

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА УДАРНО-ВОЛНОВУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Экспериментальных данных о влиянии повышенных температур на ударно-волновую чувствительность практически нет [21]. Скудность информации по данному вопросу связана с очевидными методическими трудностями. Практический интерес представляют композиции взрывчатых веществ, которые проявляют немонокотонную зависимость физико-механических и структурных свойств в зависимости от начальной температуры (повторная флегматизация, плавление, полиморфные переходы, образование расплавов, растворов, эвтектик и т. д.).

Для определения параметров нагружения необходимо знать ударную адиабату ВВ в исследуемом диапазоне температур. Исследования, проведенные по известным методикам для гексогена, дали следующие результаты. На ударной адиабате гексогена наблюдается излом (рис. 12), аналогичный результат получен в работе [6]. С ростом начальной температуры давление, при котором регистрируется излом, уменьшается. Полученные значения критического давления инициирования составляют 3,0; 2,2 и 1,0 ГПа при начальных температурах  $T_0 = 70, 20$  и  $130$  °С соответственно. Для гексогена следует отметить еще один важный факт:

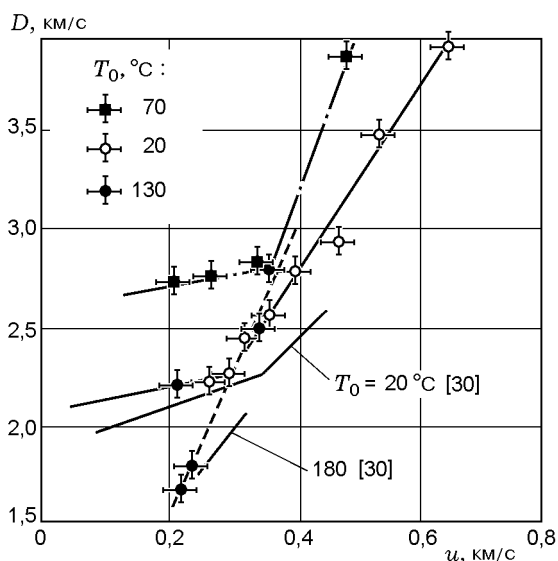


Рис. 12. Ударные адиабаты прессованного гексогена при различных начальных температурах

цикличность, а следовательно, и предыстория нагрева не влияют на чувствительность. Последняя определяется только температурой в момент инициирования.

Большое разнообразие ВВ и составов, применяющихся для различных целей, намечающаяся тенденция структурного усложнения заряда и увеличения количества исходных компонентов составов приводят к необходимости оценивать влияние температурных воздействий на ударно-волновую чувствительность.

По чувствительности составы ВВ можно разделить на две группы. В первую входят такие составы, однородность которых либо не изменяется при нагревании, либо эти заряды становятся более неоднородными. Во вторую группу входят заряды ВВ, нагрев которых ведет к уменьшению степени неоднородности — своеобразной гомогенизации из-за плавления компонентов состава.

Нагрев зарядов первой группы увеличивает их чувствительность. Типичными представителями этой группы являются гексоген, тэн, октоген, ТАТБ, гексанитростильбен, критическое давление инициирования которых при нагреве до  $100$  °С уменьшается примерно вдвое. Ко второй группе относятся тротил, тринитробензол и составы на их основе. Их нагрев приводит к десенсибилизации.

Флегматизированные прессованные составы занимают промежуточное место. При плавлении флегматизатора вследствие капиллярных эффектов возможно его затекание в поровое пространство. При этом процесс вторичной флегматизации определяется временем нахождения заряда при температурах выше температуры плавления флегматизатора. Если это время мало, чувствительность к УВ будет определяться чувствительностью индивидуального ВВ. При больших временах выдержки чувствительность флегматизированных составов будет ниже, чем их чувствительность в исходном состоянии.

На рис. 13 приведены критические давления инициирования ряда ВВ в зависимости от температуры заряда, при этом использовались данные работ [21, 31–34] и наши результаты. Штриховой линией отмечено прогнозируемое изменение чувствительности этих ВВ в зависимости от температуры.

При оценке влияния температуры на ударно-волновую чувствительность ВВ кроме физико-механических свойств зарядов, уровня

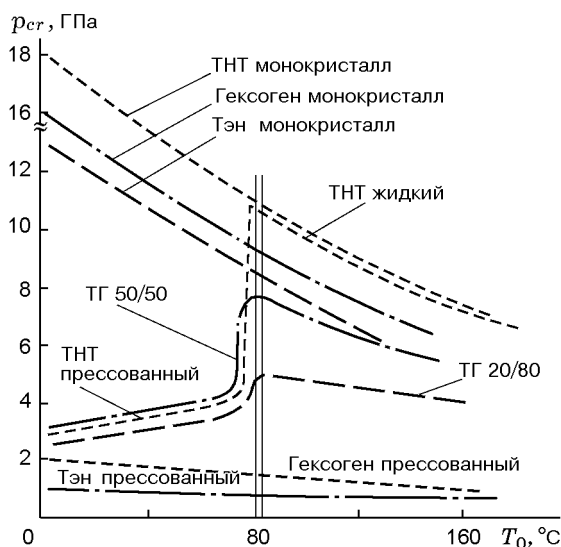


Рис. 13. Влияние начальной температуры на критическое давление инициирования

и характера температурных воздействий необходимо учитывать и профиль давления в инициирующей УВ. В случае нагружения УВ с прямоугольным профилем всё сказанное выше остается в силе, а при нагружении УВ со спадающим профилем чувствительность нагретых зарядов возрастает. Последнее позволяет предположить, что при спаде давления продолжают генерироваться эффективные очаги разогрева. Возможно, причиной этого является ослабление влияния скорости изменения давления за УВ на скорость очагового горения.

Представленный материал лишь частично отражает круг вопросов, связанных с ударно-волновой чувствительностью ВВ и требующих дальнейших исследований. Во многом он дискуссионен и имеет целью привлечь внимание специалистов к постановке последующих работ в этой области.

Ограниченный объем статьи не позволил акцентировать внимание на других не менее важных вопросах в проблеме ударно-волновой чувствительности, таких, как:

- контактная чувствительность ВВ,
- ударно-волновое инициирование экранированных ВВ,
- инициирование ВВ в замкнутом объеме,
- ударно-волновое инициирование низкоплотных ВВ,
- инициирование ВВ кумулятивными струями,

— влияние неидеальности инициирования детонации на передачу энергии на метание

и ряд других.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов В. В., Соловьёв В. С., Сысов Н. Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. М.: Изд-во МГУ, 1990.
2. Детонационные волны в конденсированных средах / А. Н. Дремин, С. Д. Савров, В. С. Трофимов, К. К. Шведов. М.: Наука, 1970.
3. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, Р. П. Челышев, Б. И. Шехтер. М.: Наука, 1975.
4. Афанасьев Г. Т., Бобылев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
5. Дубовик А. В., Бобылев В. К. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.
6. Аттетков А. В., Власова Л. Н., Соловьёв В. С. Влияние структурных особенностей на ударную сжимаемость пористых сред // Тр. IX Междунар. конф. по высокоэнергетическому воздействию на материалы. Новосибирск, 1986. С. 136–140.
7. Хасаинов Б. А., Борисов А. А., Ермолаев Б. С. Ударно-волновая чувствительность и микроструктура твердых энергетических материалов // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация и ударные волны: Материалы VIII Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка, 1986. С. 89–93.
8. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М.: Оборонгиз, 1960.
9. Васильев М. Я. Критическая энергия возбуждения взрыва ударом у различных взрывчатых веществ // Детонация: Материалы VI Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1980. С. 11–15.
10. Исаев А. Н., Соловьёв В. С., Андреев С. Г., Кобылкин И. Ф. Критерий плоского ударно-волнового инициирования гетерогенных ВВ / МВТУ. М., 1982. Деп. в ВИНТИ 12.02.82, № 661-82.
11. Frey R., Melani G., Chawla N., Trimble J. Initiation of violent reaction by projectile impact // Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado, 1976. P. 325–335.
12. Walker F. E., Wasley R. J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives // Explosivstoffe. 1969. V. 17, N 1. P. 9–13.
13. Howe P., Frey R., Taylor B., Boyle V. Shock initiation and critical energy concept // Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado, 1976. P. 11–19.

14. **Stresau R. H., Kennedy J. E.** Critical condition for shock initiation of detonation in real systems // Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado, 1976. P. 68–75.
15. **Соловьев В. С., Исаев А. Н., Кобылкин И. Ф.** Разложение ВВ в условиях газодинамического течения // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 3. С. 98–101.
16. **Cowperthwaite M.** Single shock curve buildup and a hydrodynamic  $P_i^N t_i^f$  criterion for shock initiation of detonation // Seventh Intern. Colloq. Gasdyn. Explos. and React. Syst. Gottingen, 1979. P. 269–281.
17. **Hayes D. B.** A  $P^n t$  detonation criterion from thermal explosion theory // Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado, 1976. P. 76–81.
18. **de Longueville Y., Fauquignon C., Moulard H.** Initiation of several condensed explosives by a given duration shock wave // Ibid. P. 105–114.
19. **Walker E. H.** Derivation of the  $P^2 t$  detonation criterion // Eighth Symp. (Intern.) on Detonation (Preprint). Albuquerque, 1985. P. 490–496.
20. **Ramsay J. B., Popolato A.** Analysis of shock wave and initiation data for solids explosives // Fourth Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965. P. 233–238.
21. **Roth J.** Shock sensitivity and shock Hugoniot of high density granular explosives // Proc. of the Fifth Symp. (Intern.) on Detonation. Pasadena, 1970. P. 219–230.
22. **Ramsay J. B.** Short-duration shock-waves initiation of solid explosives // Acta Astronaut. 1979. V. 6, N 5-6. P. 771–783.
23. **Жученко В. С., Шикунев Н. В.** Чувствительность ВВ к ударной волне со спадающим профилем // Тр. XXI Междунар. пиротехнического семинара, Россия, 1995. М.: РАНХФ, 1995. С. 971–976.
24. **Foan G. C. W., Coley G. D.** Shock initiation in Gap Test configurations // Proc. of the Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. 1981. P. 278–284.
25. **Трофимов В. С., Трофимова Г. П.** Метод извлечения информации по кинетике детонационного превращения ВВ из динамического эксперимента / ОИХФ АН СССР. М., 1980. Деп. в ВИНТИ, № 588-80.
26. **Андреев С. Г., Бойко М. М., Лазарев В. В. и др.** Влияние реологических свойств на избирательную чувствительность ВВ к форме импульса ударно-волнового воздействия // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 3. С. 80–87.
27. **Андреев С. Г., Бойко М. М., Соловьев В. С.** Иницирование ВВ при ступенчатом нагружении // Физика горения и взрыва. 1976. Т. 12, № 1. С. 117–120.
28. **de Longueville Y.** Comportement de divers explosifs condensés soumis à des ondes de choc // Acta Astronaut. 1976. V. 3, N a/10.
29. **Кобылкин И. Ф., Носенко Н. И., Соловьев В. С.** Экспериментальное исследование изменения ударно-волновой чувствительности зарядов ВВ при предварительном нагружении их слабыми ударными волнами // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 6. С. 70–73.
30. **Андреев С. Г., Соловьев В. С., Новицкий А. Е., Шикунев Н. В.** Продольно-поперечная неустойчивость инициирующих ударных волн // Тр. V Всесоюз. совещания по детонации. Красноярск, 1991. С. 330–334.
31. **Titov V. M., Silvestrov V. V., Kravtsov V. V., et al.** Investigation of some cast TNT properties at low temperatures // Proc. of the Sixth Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado, 1976. P. 36–46.
32. **Jackson R. K., Green L. G., Barlett R. H., et al.** Initiation and detonation characteristics of TATB // Ibid. P. 755–765.
33. **Klee Ch., Ludwig D.** The sensitivity to initiation of HE-wax compounds at different temperatures // Proc. of the Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Annapolis, 1981. P. 336–342.
34. **Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М.** Критическое давление инициирования взрывчатых веществ // Взрывное дело № 68/25. М.: Недра, 1970. С. 68–92.

Поступила в редакцию 17/II 2000 г.