

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ
ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ГЕКСОГЕНА***С. А. Бордзиловский, С. М. Караганов**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск*

Исследован процесс инициирования детонации прессованного флегматизированного гексогена. Профили давления в различных сечениях образца регистрировались манганиновыми датчиками и обрабатывались методом лагранжева анализа для реагирующего потока. Проведенный анализ показал, что скорость разложения непосредственно за фронтом инициирующей волны мала и растет с увеличением давления в ней. На зависимости скорости разложения от координаты реакции наблюдается максимум при значениях координаты реакции 0,4–0,6.

Иницирование конденсированных ВВ изучается по двум основным направлениям. В работах первого чувствительность взрывчатых составов определяется в различных тестах, близких к условиям практического использования ВВ, например тест с падающим грузом [1, 2] и др. [3–7]. Здесь обычно определяются условия, влияющие на безопасность обращения с ВВ и на надежность инициирования. Клинт-тест [8, 9] широко используется для определения расстояния, на котором ударная волна (УВ) переходит в детонацию. Эта величина — общепринятая характеристика чувствительности ВВ к ударному инициированию, и в дальнейшем, следуя терминологии [9], будем называть ее «расстоянием или пробегом до детонации». Ее можно определить также путем регистрации эволюции профилей давления или массовой скорости в переходной зоне.

На ударную чувствительность взрывчатого состава влияют многие факторы. Один из способов изменения чувствительности ВВ состоит в варьировании состава, размера зерен и технологии изготовления. В [10, 11] при изучении пластически связанных составов (70 % гексоген + 30 % полиуретан) обнаружено, что классификация чувствительности составов с размером зерен от 6 до 430 мкм зависит не только от размера зерен, но и от диапазона инициирующих давлений. Еще более примечательно обнаруженное в [12] сильное влияние формы кристаллов гексогена на чувствительность пластически связанных ВВ. Изменением состава ВВ и последующим проведением тестовых испытаний установлено десенсибилизирующее влияние вещества связки, однако в [13] сделан вывод, что рост скорости реакции при инициировании пластических ВВ определяется в основном свойствами высокоэнергетического компонента и размером зерна и в меньшей степени — типом связки и механическими свойствами состава.

Экспериментальные результаты, полученные при изучении чувствительности ВВ в различных тестах, создали основу концепций горячих точек [14] и критической энергии для инициирования гетерогенных ВВ [15].

Ко второй группе работ можно отнести исследования, основанные на внутренних методах измерения термодинамических или кинетических параметров состояния ВВ в самом процессе инициирования. Они были начаты в [16–18] с помощью манганиновых либо электромагнитных датчиков, которые позволили проследить эволюцию профилей давления $p(h, t)$ или

массовой скорости $u(h, t)$ вдоль лагранжевой координаты h в плоской иницирующей ударной волне.

В [19, 20] обоснован метод лагранжева анализа для реагирующего потока, позволяющий получать информацию о химической реакции в терминах концентрации продуктов реакции $\lambda(h, t)$ и скорости их образования $d\lambda(h, t)/dt$. Метод привлекает тем, что использует параметры с ясным физическим смыслом по сравнению с различными тестами, однако к его недостаткам можно отнести необходимость получения высокоточных записей сигналов датчиков [21]. В [21–24] уравнения макрокинетики, созданные на основе модельных представлений, уточнялись путем сравнения расчетных профилей $p(h, t)$ или $u_p(h, t)$ с экспериментом.

В настоящей работе продолжены начатые ранее эксперименты [25] по инициированию детонации прессованного гексогена, десенсибилизированного добавкой 5–6 % парафина. Имеющиеся в литературе данные показывают, что флегматизированный гексоген обладает рядом интересных особенностей, таких как понижение ударной чувствительности с ростом начальной температуры в диапазоне от комнатной до 60 °С [4] и необычная форма профиля давления в стационарной детонационной волне (ДВ) [26]. В [27] процесс возбуждения детонации исследовался с помощью манганиновых датчиков, расположенных на границе флегматизированного гексогена с инертной преградой. Результаты дали возможность построить формальное кинетическое уравнение, аналогичное полученному в [18] для тротила.

Цель настоящей работы — определение эволюции профилей давления в процессе движения иницирующей УВ во флегматизированном гексогене и проведение лагранжева анализа полученных данных. Кроме того, определялись параметры ДВ в удлиненных зарядах.

Детонация длинного заряда

В эксперименте одновременно измерялась скорость распространения ДВ и регистрировались профили давления внутри детонирующего заряда.

На рис. 1 показано устройство, использованное для измерения параметров детонации в длинном заряде. Он состоял из четырех цилиндрических таблеток 3 диаметром 51 и высотой 40,2 мм каждая при средней плотности $\rho_0 = 1,60$ г/см³. Детонация инициировалась генератором плоской волны 1 и бустерным зарядом 2 из тротила диаметром 55 и толщиной 20 мм. Заряд оканчивался таблеткой 6 из флегматизированного гексогена толщиной 6 мм. Для определения скорости детонации использовались ионизационные датчики пуска и остановки частотомеров 4, которые были заглублены на 12 мм внутрь заряда и замыкались при прохождении по ним ДВ. Коаксиальный кабель связывал датчик с электронной схемой, формировавшей прямоугольный импульс с временем нарастания 5 нс. Этот импульс подавался на вход частотомера, точность измерения временных интервалов 10 нс. В опыте использовались пять идентичных каналов.

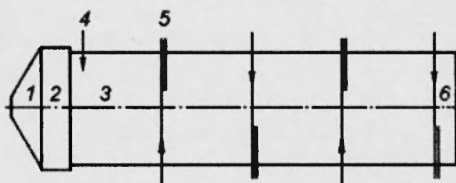


Рис. 1. Схема эксперимента.

Профили давления регистрировались манганиновыми датчиками (см. рис. 1, 5) с размерами чувствительного элемента $0,5 \times 3$ мм, толщиной 15 мкм и начальным сопротивлением $\approx 0,25$ Ом. Датчики и выводы изолировались пленкой из фторопласта-4 толщиной 0,3 мм с каждой стороны. Размеры измерительного пакета (датчик в изоляции) 10×30 мм, толщина 0,65 мм. Для манганиновых датчиков на торце каждой таблетки

сделано углубление с высотой, равной толщине измерительного пакета, при этом его внутренний край располагался на расстоянии 12 мм от оси заряда. Датчики вклеивались в паз эпоксидной смолой. Ионизационный и манганиновый датчики находились на противоположных концах диаметра образца. Чтобы минимизировать возмущения, вносимые в процесс детонации от введения датчиков в заряд, каждая последующая пара датчиков была развернута на 90° относительно предыдущей.

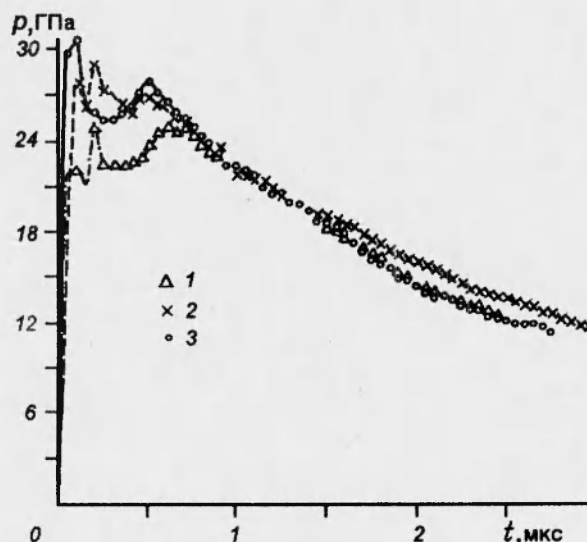


Рис. 2. Профили детонационной волны в цилиндрическом заряде для датчиков 1-3.

Иницирующее давление, создаваемое бустерным зарядом ТНТ, $p_i \approx 18$ ГПа. При этом давлении «пробег до детонации» во флегматизированном гексогене $r_d < 2$ мм, таким образом, в опыте созданы условия для распространения стационарной детонации в заряде на расстояниях, на которых проводились измерения. Измеренная скорость детонации $D = 8,22 \pm 0,02$ км/с, что согласуется с экспериментальными данными [26], где $D = 8,38$ км/с при $\rho_0 = 1,65$ г/см³. Учитывая зависимость $D(\rho_0)$, можно оценить поправку, связанную с увеличением плотности от 1,6 до 1,65 г/см³. Согласно работе [2], в которой приведена зависимость $D = D_1 + M(\rho - \rho_1)$, где D_1 — идеальная скорость детонации (в км/с) при плотности ρ_1 (в г/см³), а M — эмпирический коэффициент, эта поправка составляет 0,2 км/с.

Профили давления, полученные на датчиках 1-3, показаны на рис. 2. Длительность записей ≈ 3 мкс на каждом из датчиков, что свидетельствует об отсутствии нарушений изоляции или выводов, которые могли бы исказить вид профилей. Это замечание представляется необходимым, так как профили имеют не совсем обычный вид: после переходных процессов в течение $\approx 0,12$ – $0,15$ мкс от начала сигнала давление остается примерно постоянным $\approx 0,5$ мкс, и только после этого начинается монотонный спад в волне Тэйлора. Аналогичный вид профилей давления для флегматизированного гексогена наблюдался в [26, 28]. Авторы объяснили появление плато на профиле давления разложением высокомолекулярной добавки парафинового ряда, что приводит к детонации заряда в недосжатом режиме.

Инициирование детонации

Инициирование детонации флегматизированного гексогена изучалось при помощи сборки, показанной на рис. 3.

Генератор плоской волны 1 и бустерный заряд 2 создавали УВ в аттенюаторе 3. Аттенюатор состоял из преград с различным динамическим импедансом (бензин — медь). Толщины преград в аттенюаторе (бензин — 20 мм и медный экран — 10 мм) подобраны так, что вторая УВ, отраженная от границы раздела между продуктами детонации и бензином, приходила на поверхность раздела аттенюатор — образец через 3,6 мкс после входа первой УВ в образец. Образец 4 составлен из дисков диаметром 51 и толщиной ≈ 3 мм каждый. Средняя плотность образцов $\rho_0 = 1,64$ г/см³. Для уменьшения влияния боковой разгрузки и защиты выводов датчика 7 от разрушения образец заливали эпоксидным компаундом 5 с плотностью $\approx 1,64$ г/см³. Монтаж токоподводов выполнен на текстолитовом основании 6.

Первый датчик (на рис. 3 не показан) находился на границе между медным экраном и образцом по оси сборки, а остальные размещались на расстоянии 12 мм от оси и под углом 120° относительно предыдущего. Для датчика в пластине ВВ имелось углубление, в которое он вклеивался эпоксидной смолой. Как видно из рис. 3, взаимное расположение датчиков позволило избежать влияния возмущений, вносимых первыми датчиками, на развитие процесса инициирования в том секторе образца, в котором расположены последующие датчики. Толщина изоляции последовательно увеличивалась от 0,1 на первом до 0,3 мм с каждой стороны на четвертом датчике.

На рис. 4 приведены профили, полученные при различных начальных давлениях иницирующей УВ. Датчики регистрируют ударный фронт

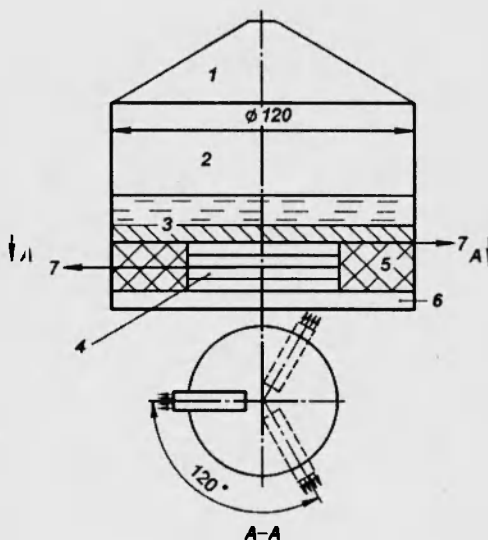


Рис. 3. Схема эксперимента по ударному иницированию детонации.

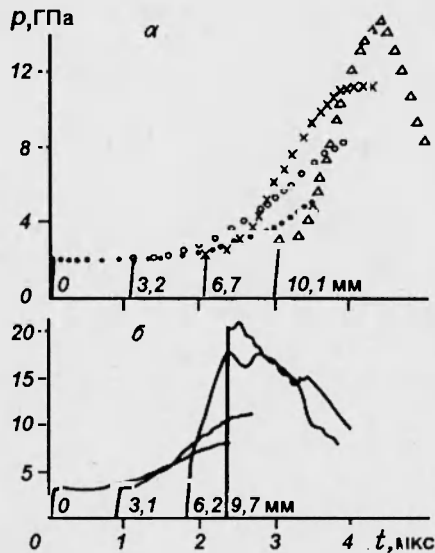


Рис. 4. Развитие процесса при различных иницирующих давлениях.

p_s , движущуюся за ним волну сжатия, рост давления в которой связан с протеканием химической реакции, и последующую волну разгрузки из-за газодинамического разлета продуктов реакции. От датчика к датчику наблюдается эволюция профилей этих волн, которая заключается в последовательном росте амплитуды волны сжатия с одновременным уменьшением длительности ее фронта. При $p_i = 2$ ГПа (рис. 4,а) на расстоянии $h_4 = 10,1$ мм от плоскости инициирования фронт волны сжатия не успевает догнать первый ударный скачок. В этой серии профилей амплитуда скачка p_s и его скорость увеличиваются очень медленно. При $p_i = 3,1$ ГПа (рис. 4,б) между координатами $h_3 = 6,2$ мм и $h_4 = 9,7$ мм фронт волны сжатия догоняет ударный скачок и происходит «опрокидывание» волны сжатия, которое заключается в резком уменьшении длительности переднего фронта до 60 нс (аппаратурное время разрешения) и увеличении скорости УВ с 3,5 до 6,7 км/с. Профиль, зарегистрированный при $h_4 = 9,7$ мм, имеет характерные особенности стационарных профилей, приведенных на рис. 2, однако его амплитуда еще на 20 % меньше. Это указывает на то, что параметры волны не достигли стационарных значений.

По экспериментальным зависимостям $p(h_i, t)$ методом лагранжева анализа для реагирующего потока (RFLA) рассчитывались функции массовой скорости $u(h_i, t)$, удельного объема $v(h_i, t)$ и внутренней энергии $e(h_i, t)$. Этот метод разработан в [18–20, 22, 29] и заключается в численном интегрировании уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения в гидродинамическом потоке вдоль траектории датчика. На первой стадии расчета использовался метод численного интегрирования [20], где для вычисления частных производных предложено построение сетки вспомогательных траекторий в координатах p, h, t . В данной работе использовалась сетка из 69 траекторий. Далее приведены расчеты, выполненные для серии профилей, представленной на рис. 4,а, которая выбрана потому, что при $h_4 = 10,1$ мм зарегистрирован профиль давления достаточно большой амплитуды, но еще не произошло опрокидывания волны сжатия и формирования характерного профиля Зельдовича — Неймана. Это позволяет при построении вспомогательных траекторий ограничиться квадратичным приближением, что повышает точность расчета.

Процесс разложения ВВ в методе RFLA описывается одной переменной — степенью разложения λ , которая представляет собой массовую долю образующихся продуктов. Для расчета степени разложения ВВ использовалась двухкомпонентная модель [21, 29], в которой предполагается, что среда состоит из непрореагировавшего ВВ и продуктов реакции (ПР), при этом ВВ и ПР имеют различную температуру, но находятся при одинаковом давлении. Удельные объемы и внутренняя энергия аддитивны:

$$v = \lambda v_p + (1 - \lambda)v_x, \quad (1)$$

$$e = \lambda e_p + (1 - \lambda)e_x, \quad (2)$$

где v, e — удельные объем и энергия соответственно, а индексы p и x относятся к продуктам и ВВ. Согласно [29], уравнение для частично прореагировавшего ВВ имело вид

$$e = e_x^0 - \lambda q + \frac{pv}{\gamma - 1} + (1 - \lambda) \frac{(c_x^0)^2 (v_x - v_x^0)}{v_x^0 (k - 1)}, \quad (3)$$

где c_x^0 — скорость звука в исходном ВВ; γ — показатель политропы продуктов детонации; k — степень в уравнении Мурнагана для исходного ВВ; e_x^0 — начальная удельная внутренняя энергия ВВ; v_x^0 — начальный удельный объем ВВ; v_x — удельный объем ВВ в ходе реакции; v — удельный объем смеси; p — давление; q — теплота реакции. Для расчета исполь-

зовались следующие значения параметров: $c_x^0 = 2,8$ км/с, $k = 4$, $\gamma = 2,8$, $v_x^0 = 0,61$ см³/г, $q = 5,5$ кДж/г на каждой траектории датчика.

В расчете фронты зарегистрированных профилей представлялись ударными скачками, а дальнейшее сжатие считалось изэнтропическим. Относительно продуктов реакции предполагалось, что реакция разложения ВВ на фазовой траектории любой частицы проходит до конца с образованием одних и тех же продуктов.

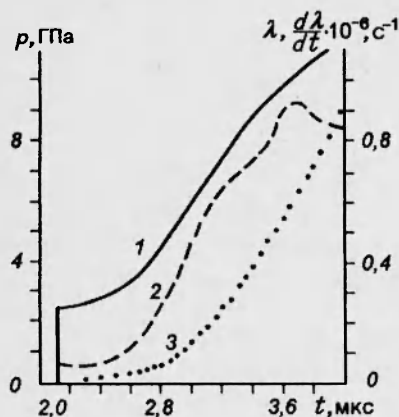


Рис. 5. Профили давления (1), координаты реакции (2) и скорости реакции (3).

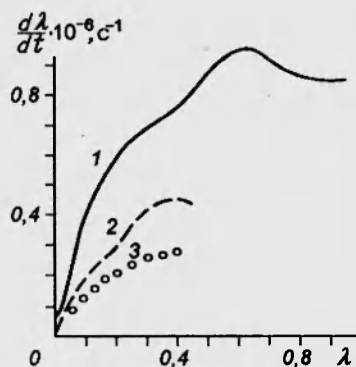


Рис. 6. Зависимость $d\lambda/dt$ от λ для $h = 6,67$ (1) и 3,2 мм (2), а также расчет по кинетике [27] для $h = 3,2$ мм (3).

Важным параметром является тепловой эффект реакции q . Поскольку в литературе отсутствует информация о поведении теплового эффекта реакции в процессе инициирования, то ее обычно полагают равной количеству теплоты Q_V , выделяемой единицей массы ВВ, прореагировавшего в условиях постоянного объема.

В настоящих расчетах использовались только четыре профиля давления без каких-либо дополнительных условий на границах области, где располагались датчики, поэтому производные $\partial p(h)/\partial h$ и $\partial t(h)/\partial h$ плохо определены на границах, и количественная информация могла быть получена только на втором и третьем датчиках, находившихся внутри этой области. Результаты расчета λ и $d\lambda/dt$ вместе с профилем давления на глубине $h_3 = 6,67$ мм представлены на рис. 5. Видно, что скорость разложения непосредственно за фронтом мала. При удалении от фронта давление и скорость разложения растут. Такое развитие процесса характерно для плотных гетерогенных ВВ [17]. Количество разложившегося вещества к определенному моменту времени зависит от координаты h . Зависимости скорости разложения от координаты реакции показаны на рис. 6. По мере развития реакции, скорость разложения проходит через максимум, который в разных сечениях достигается при $\lambda \approx 0,4 \div 0,6$. На этом же рисунке приведены точки, полученные из уравнения макрокинетики для флегматизированного гексогена [27]. Качественно макрокинетика [27] согласуется с

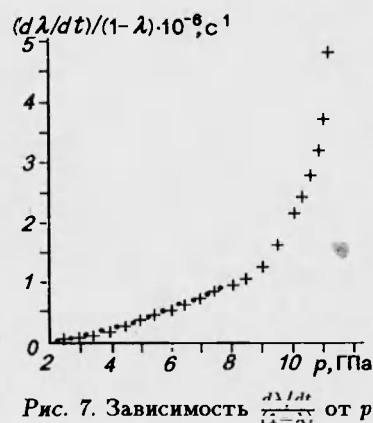


Рис. 7. Зависимость $\frac{d\lambda/dt}{(1-\lambda)}$ от p .

результатами анализа эволюции волновых профилей, однако дает заниженные значения в области максимума скорости разложения.

Для установления корреляции между скоростью разложения и параметрами реагирующего потока построены зависимости скорости разложения, отнесенной к массовой доле непрореагировавшего ВВ, от давления (рис. 7). Из графика видно, что на начальном участке до давлений ≈ 8 ГПа кривые могут быть представлены линейными функциями, как это предполагается при выводе уравнений макрокинетики в [23, 27]. В диапазоне давлений 8–10 ГПа зависимость становится явно нелинейной, что может свидетельствовать об изменении механизма разложения ВВ, например об изменении топологии горения при переходе от горения наружу (горение пор) к горению внутрь (горение зерен) [24]. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

В заключение отметим, что схема расположения датчиков в образце, примененная в настоящей работе, позволила избежать влияния промежуточных слоев изоляции и увеличила стабильность процесса инициирования. Кроме того, все профили, использованные в расчетах, получены в одном эксперименте, что в свою очередь повысило устойчивость полученных результатов к погрешностям, связанным с разбросом данных от опыта к опыту. Проведенный лагранжев анализ эволюции профилей давления в процессе инициирования флегматизированного гексогена подтвердил характерные особенности этого процесса, наблюдавшиеся ранее для плотных гетерогенных ВВ, такие как: низкая начальная скорость разложения за фронтом инициирующей УВ и ее увеличение с ростом давления в реагирующей волне, а также наличие максимума зависимости скорости разложения от координаты реакции при $\lambda = 0,4 \div 0,6$.

ЛИТЕРАТУРА

1. LLNL Explosives Handbook / Ed. by B. M. Dobratz. Livermore: Univ. Calif., 1981.
2. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
3. Tasker D. G. Shock initiation and subsequent growth of reaction in explosives and propellants: the low amplitude shock initiation test, LASI // Proc. Seventh Int. Symp. on Detonation, Annapolis, 1981. P. 285–298.
4. Klee Ch., Ludwig D. The sensitivity to initiation of HE-wax compounds at different temperatures // Ibid. P. 336–342.
5. Kroh M., Thoma K. et al. Shock sensitivity and performance of several high explosives // Eighth Int. Symp. on Detonation, Albuquerque, 1985: Proc. New Mexico, 1985. P. 502–508.
6. Coley G. D. The growth of reaction in secondary explosives under transient confinement // Proc. Sixth Int. Symp. on Detonation, Arlington, Virginia, 1976. P. 290–298.
7. Coley G. D., Whatmore C. E. The influence of the dynamic compressive strength properties of HE formulations on the growth of reaction // Proc. Seventh Int. Symp. on Detonation, Annapolis, 1981. P. 17–23.
8. Campbell A. W., Davis W. C. et al. Shock initiation of solid explosives // Phys. Fluids. 1961. V. 4, N 4. P. 511–521.
9. Ramsay J. B., Popolato A. Analysis of shock wave and initiation data for solid explosives // Proc. Fourth Int. Symp. on Detonation, Washington, 1965. P. 233–238.
10. Moulard H., Kury J. W., Declos A. The effect of particle size on the shock sensitivity of cast PBX formulations // Eighth Int. Symp. on Detonation, Albuquerque, 1985: Proc. New Mexico, 1985. V. 1. P. 248–257.
11. Moulard H. Particular aspect of the explosive particle size effect on shock sensitivity of cast PBX formulations // Ninth Symp. on Detonation: Prepr. Portland, 1989. V. 1. P. 12–17.

12. Van der Steen A. C., Verbeek H. J., Meulenbrugge J. J. Influence of RDX shape on the shock sensitivity of PBX'es // Ibid. P. 23-27.
13. Fleming K. A., Bird R. et al. The influence of formulation variables on the growth of reaction in plastic bonded explosives // Eighth Int. Symp. on Detonation, Albuquerque, 1985: Proc. New Mexico, 1985. V. 1. P. 449-457.
14. Bowden F. P., Yoffe A. D. Initiation and Growth of Explosions in Liquids and Solids. Cambridge: University Press, 1952.
15. Walker F. E., Wasley R. J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives // Explosivstoffe. 1969. V. 17. P. 9.
16. Kennedy J. E. Pressure field in a shock-compressed high explosive // Proc. Fourteenth Symp. on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1973. P. 1251-1258.
17. Wackerle J., Johnson J. O., Halleck P. M. Shock initiation of high-density PETN // Proc. Sixth Int. Symp. on Detonation, Arlington, Virginia, 1976. P. 20-28.
18. Канель Г. И., Дремин А. Н. Разложение литого тротила в ударных волнах // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 1. С. 85-91.
19. Cowperthwaite M., Williams R. F. Determination of constitutive relationships with multiple gauges in nondivergent waves // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 456.
20. Seaman L. Lagrangian analysis for multiple stress or velocity gages in attenuating waves // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 4303-4314.
21. Vantine H. C., Rainsberger R. B., et al. The accuracy of reaction rates inferred from Lagrange analysis and in-situ gauge measurements // Proc. Seventh Int. Symp. on Detonation, Annapolis, 1981. P. 466-478.
22. Lee E. L., Tarver C. M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives // Phys. Fluids. 1980. V. 23. P. 2362-2372.
23. Лобанов В. Ф. Моделирование детонационных волн в гетерогенном конденсированном ВВ // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 6. С. 113-115.
24. Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Лобанов В. Ф. Моделирование ударного инициирования гетерогенных ВВ // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 132-147.
25. Бордзиловский С. А., Караханов С. М. Иницирование детонации во флегматизированном гексогене // Тез. докл. школы-семинара «Фундаментальные проблемы физики ударных волн». Черногоровка, 1987. Т. 1, ч. 1. С. 26-27.
26. Альтшулер Л. В., Балалаев В. В. и др. Особенности детонации флегматизированных ВВ // Детонация. Черногоровка, 1981. С. 36-39.
27. Уткин А. В., Канель Г. И., Фортков В. Е. Эмпирическая макрокинетика разложения флегматизированного гексогена в ударных и детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 115-122.
28. Альтшулер Л. В., Доронин Г. С., Жученко В. С. Режимы детонации и параметры Жуге конденсированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 2. С. 84-103.
29. Cowperthwaite M. A constitutive model for calculating chemical energy release rates from the flow fields in shocked explosives // Proc. Seventh Int. Symp. on Detonation, Annapolis, 1981. P. 498-505.

Поступила в редакцию 31/VIII 1994 г.