

соударения. С помощью этого результата удастся получить физически правдоподобные решения двух классических задач гидродинамики о несимметричном соударении струй идеальной несжимаемой жидкости.

В заключение автор выражает свою благодарность Ю.А. Тришину, Е.И. Биченкову и Л.А. Мержиевскому за полезные обсуждения данной работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. — М.: Наука, 1973. — 416 с.
2. Дерibas А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 221 с.
3. Тришин Ю.А. Несимметричное соударение струй идеальной несжимаемой жидкости // ПМТФ. — 1986. — № 5. — С. 40.
4. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966. — 688 с.
5. Walsh J.M., Shreffler R.G., Willing F.J. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions // J. Appl. Phys. — 1953. — 24, N 3. — P. 349.
6. Chou P.C., Carleone J., Karpp R.R. Criteria for jet formation from impinging shells and plates // J. Appl. Phys. — 1976. — 47, N 7. — P. 2975.
7. Кинеловский С.А., Тришин Ю.А. Физические аспекты кумуляции // ФГВ. — 1980. — 16, № 5. — С. 26.
8. Милн-Томсон А.М. Теоретическая гидродинамика. — М.: Мир, 1964. — 655 с.
9. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. — М.: Наука, 1979. — 536 с.
10. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы, каверны. — М.: Мир, 1964. — 466 с.

630090, г. Новосибирск  
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 26/VI 1993

УДК 622.235.213

*Я.В. Алымова, В.Э. Анников, Н.Ю. Власов,  
Б.Н. Кондриков*

#### ДЕТОНАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА

Изучены детонационные свойства водоэмульсионного взрывчатого состава. Определена ударная адиабата эмульсии при плотности  $1,38 \text{ г/см}^3$ . Получена зависимость критического диаметра и скорости детонации от начальной плотности заряда. Расчетным путем определена температура ударного разогрева.

Эмульсионные взрывчатые составы представляют собой обратные эмульсии раствора окислителей в углеводородном горючем. В качестве окислителей используют пересыщенные водные растворы нитратов, чаще всего  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  в смеси с  $\text{NaNO}_3$  или  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . Органическая фаза — продукты нефтепереработки: индустриальное масло, дизельное топливо, мазут и эмульгатор. Размер капель водного раствора окислителей  $\sim 10^{-3}$  мм. Толщина пленки масла, разделяющей капли,  $\sim 10^{-4}$  мм. Основные преимущества эмульсионных составов по сравнению с обычными порошкообразными промышленными ВВ — высокая водоустойчивость, пластичность, низкая горючесть, безопасность при производстве и применении, большой диапазон изменения рабочей плотности, скорости и давления детонации. Детонационные характеристики водоэмульсионных составов, как и всех остальных ВВ, существенно зависят от плотности заряда, которая может изменяться в широких пределах за счет введения пузырьков газа, стеклянных или полимерных микросфер. В данной работе изучаются детонационные свойства состава на основе обратной эмульсии.

© Я.В. Алымова, В.Э. Анников, Н.Ю. Власов, Б.Н. Кондриков, 1994.

## Приготовление эмульсионного ВВ

Для опытов выбран состав, содержащий 62 % нитрата аммония, 16 % нитрата натрия, 15 % воды, 5 % индустриального масла И-40 и 2 % эмульгатора. Эмульсию готовили на модельной лабораторной установке, состоящей из реактора с рубашкой и мешалкой и термостата. Отдельно при температуре 353 К готовили раствор окислителей. В реакторе при этой же температуре получали раствор эмульгатора в индустриальном масле. При работающей мешалке (скорость вращения 1500 об/мин) в течение 1,5 мин смешивали эти растворы. Плотность приготовленной таким образом эмульсии составляла 1,38 г/см<sup>3</sup>. Расчетная плотность, полученная в приближении аддитивности удельных объемов раствора нитратов и смеси масла с эмульгатором, равна 1,42 г/см<sup>3</sup>. В качестве сенсibilизаторов использовали фенолоформальдегидные микросферы марки БВ-01, средний размер частиц которых  $d = 110$  мкм, насыпная плотность 0,20 г/см<sup>3</sup>. Плотность заряда в диапазоне  $0 \leq \alpha \leq 0,1$ , где  $\alpha$  — массовая доля микросфер в составе,

$$\rho_0 = (0,725 + 2,786 \alpha)^{-1} \text{ (г/см}^3\text{)} \quad (1)$$

(коэффициент корреляции 0,992, относительная погрешность 1,5 %). Из (1) следует, что эффективная плотность микросфер  $\rho_{\text{эф}} = 0,22$  г/см<sup>3</sup>.

## Результаты опытов

Ударная адиабата. Для определения соотношения между волновой и массовой скоростями в ударной волне (УВ) применялся электромагнитный метод [1]. Находились параметры УВ, генерируемых при детонации заряда флегматизированного гексогена (5,5 % флегматизатора) диаметром 20 и высотой 40 мм ( $\rho = 1,66$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 8,05$  мм/мкс,  $p_{CJ} = 26,3$  ГПа), инициируемого плосковолновым генератором из порошкообразного гексогена. Активный заряд располагался на торце сборки и отделялся от исследуемого образца плексигласовой пластиной толщиной 3 мм. Эмульсию помещали в цилиндрическую оболочку из кальки диаметром 20 мм. Использовались два датчика из алюминиевой фольги толщиной 0,1 и шириной 3 мм, установленные на некотором расстоянии друг от друга.

Для построения ударной адиабаты измеряются средние скорости движения среды  $u$  и фронта УВ  $U$  на разных расстояниях  $x$  от нижней поверхности плексигласовой пластины. В первом случае  $x = a$ , где  $a$  — расстояние от пластины до поверхности датчика, во втором  $x = a + b/2$ , где  $b$  — расстояние от первого до второго датчика. Экстраполяция на  $x = 0$  дает  $U_0 = 6u_0 = 2,15$  мм/мкс. Расчет по методу зеркальных отражений ударных адиабат в координатах  $p$ — $u$  для двух ударных адиабат плексигласа [2] дает  $U_0 = 6,5$  (6,3) мм/мкс,  $u_0 = 2,45$  (2,35) мм/мкс.

Ударная адиабата  $U(u)$  для эмульсии с  $\rho_0 = 1,38$  г/см<sup>3</sup> показана на рис. 1. Кривая 3 проведена по уравнению обобщенной ударной адиабаты органических жидкостей, воды и конденсированных N<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> [3]:

$$U - C_0 = 2,77u + 1,14u^2 \quad (u < 0,5 \text{ мм/мкс}),$$

$$U - C_0 = 0,29 + 1,63u \quad (0,5 < u < 2,5 \text{ мм/мкс}).$$

Наилучшее согласие с опытом для эмульсионного состава получается при  $C_0 = 2,20$  мм/мкс. Расчет по [4, 5] дает  $C_0 = 2,09$  мм/мкс.

На рис. 1 приведены также адиабаты, полученные в [6] для эмульсионного взрывчатого состава (77 % нитрата аммония, 16 % воды, 6 % масла и 1 % эмульгатора) при  $\rho_0 = 1,245$  г/см<sup>3</sup> (опыт) и 1,353 г/см<sup>3</sup> (расчет [8]). Первая практически совпадает с нашими данными, вторая лежит несколько выше кривой 3. Ударные адиабаты при  $\rho_0 = 1,02$  и 0,89 г/см<sup>3</sup> (см. рис. 1, 1, 2) рассчитывали, используя метод, предложенный в работе [4].

Критический диаметр и скорость детонации. Опыты по детонации проводили в цилиндрических стеклянных трубках со стенками толщиной

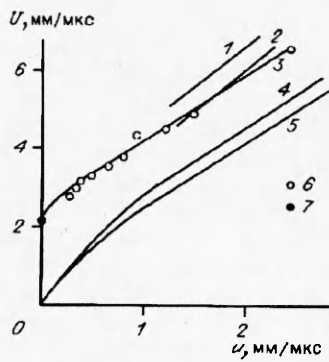


Рис. 1. Ударные адиабаты матрицы эмульсионного взрывчатого состава.

$\rho_0, \text{г/см}^3$ : 1 — 1,353, 2 — 1,245, 3 — 1,38, 4 — 1,02, 5 — 0,89; 1, 2 — [8]; 3—6 — результаты настоящей работы; 7 — расчет по [6, 7].

~1 мм, прикрепленных к стальной пластине-свидетелю, и в стальных трубах внутренним диаметром 10, наружным 36 мм с отверстиями диаметром 1—2 мм, просверленными на расстоянии 15 мм друг от друга вдоль оси трубы. Иницирование осуществляли при помощи электродетонатора ЭД-8. Скорость детонации определяли при помощи прибора СФР-2. В этом случае в качестве детонатора применяли стеклянную трубочку диаметром 7—8 мм с навеской 1 г порошкообразного гексогена, инициируемого взрывом «капельки» азида свинца с коллоксилином на нихромовой проволочке от электродетонатора ЭД-8. Промежуточный детонатор — шашка (состав А-1Х-1) диаметром 11 мм, плотностью 1,66 г/см<sup>3</sup> и массой 2 г.

Критический диаметр детонации  $d_{кр}$  снижается при уменьшении  $\rho_0$ . На рис. 2 кривая 1 отделяет область взрывов от области отказов в диапазоне  $0,89 \leq \rho_0 \leq 1,10 \text{ г/см}^3$ . Для сравнения на рис. 2 приведены зависимости  $d_{кр}(\rho_0)$  для гелеобразного водонаполненного ВВ, не содержащего алюминия (кривая 2) [7] и с добавлением 20 % алюминиевой пудры (кривая 3) [8].

Зависимости скорости детонации от начальной плотности заряда, определенные в стеклянных и стальных трубах, имеют максимум при  $\rho_0 = 0,96 \div 0,98 \text{ г/см}^3$  (рис. 3). Идеальная скорость детонации (кривая 1) вычислена по методу [9]. При расчете приняты суммарные энтальпии образования матрицы эмульсионного состава  $\Delta H_f^0 = -6,16 \text{ МДж/кг}$  и фенолоформальдегидных микросфер  $\Delta \bar{H}_{f,mc}^0 = -1,55 \text{ МДж/кг}$ . В интервале  $0,8 \leq \rho_0 \leq 1,4 \text{ г/см}^3$  расчетная зависимость  $D(\rho_0)$  имеет вид

$$D_{ид} = -0,270 + 4,847\rho_0. \quad (2)$$

Отрицательный свободный член и завышенный по сравнению с обычными ВВ угловой коэффициент связаны, очевидно, с прогрессирующим по мере уменьшения плотности разбавлением состава материалом микросфер. Расчетная скорость детонации при  $\rho_0 = 0,96 \text{ г/см}^3$  практически совпадает с полученной в опыте в стальной трубе. Отклонение экспериментальной кривой от расчетной справа от максимума вполне понятно: критический диаметр при уменьшении пористости возрастает и  $D/D_{ид}$  уменьшается. Слева от максимума при уменьшении  $\rho_0$  расчетная скорость также не совпадает с экспериментальной. Очевидно, при высоком содержании микросфер детонация угнетается избытком инертного вещества.

Зависимость скорости детонации от диаметра заряда определяли для составов, содержащих 6 ( $\rho_0 = 1,02 \text{ г/см}^3$ ) и 10 % ( $\rho_0 = 0,89 \text{ г/см}^3$ ) микро-

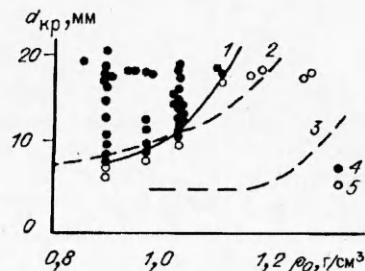


Рис. 2. Влияние начальной плотности заряда на критический диаметр детонации. 1 — результаты данной работы; 2 — [9]; 3 — [10]; 4 — взрыв; 5 — затухание.

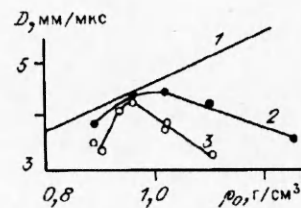


Рис. 3. Влияние начальной плотности заряда на скорость детонации.

1 — расчет по [11]; 2 — опыты в стальных трубах; 3 — опыты в стеклянных трубах ( $d = 18+19 \text{ мм}$ ).

сфер, в стеклянных трубках. Два опыта проведены в толстостенных стальных оболочках. Для них принято значение эквивалентного диаметра  $d_{\text{экр}} = 50$  мм, основанное на опытах с растворами нитроэфиров [10]. В диапазоне  $0,01 < 1/d < 0,1$  мм<sup>-1</sup> получаются прямые, соответствующие уравнениям  $D = 4,78 - 18,3/d$  и  $D = 4,07 - 11,8/d$ . Свободные члены здесь отвечают идеальной скорости детонации, рассчитанной по методу [9]. Из рис. 4 для зависимости  $D/D_{\text{ид}} = f(A/d)$  [11] имеем  $A = 2,91$  и  $3,83$  мм при  $\rho_0 = 0,89$  и  $1,02$  г/см<sup>3</sup> соответственно.

### Обсуждение результатов

Температуру ударного разогрева рассчитывали по методу [5], решая дифференциальное уравнение

$$c_v dT = (u^2/U) dU - (\Gamma c_v T/v) dv,$$

а функцию  $\Gamma$  (параметр Грюнайзена) по формуле [5]

$$\Gamma = 2\omega \left( 1 - \omega + \left( 1 + \frac{2}{\Gamma_0 \pi} \right) t \right)^{-1},$$

где  $\omega = v/v_0$ ;  $\pi = p/p_0$ . Функция  $t$  для ударной адиабаты  $U = C + Bu$  имеет вид

$$t = \left( \frac{\omega}{1 - \omega} + \frac{2\omega B}{1 - B + B\omega} - 2(d \ln c_0 / d \ln v_0) - 1 \right)^{-1}.$$

Здесь  $c_0 = c_0(T_0)$  — зависимость скорости звука от начальной температуры;  $v_0 = v_0(T_0)$  — зависимость удельного объема смеси от начальной температуры. Для расчета использовали эти зависимости в виде  $1/v_0 = 1,839 - 1,422 \cdot 10^{-3} T_0$ ,  $c_0 = 4,139 - 6,609 \cdot 10^{-3} T_0$  [3]. Удельная теплоемкость вычислялась по формуле

$$c_v(T) = c_v^{\text{ид}}(T) + [c_v(T_0) - c_v^{\text{ид}}(T_0)],$$

которая учитывает экспериментальное значение теплоемкости при начальной температуре  $c_v(T_0) = 1173$  Дж/(кг·К) и теоретическую (по Эйнштейну) зависимость теплоемкости от температуры  $c_v^{\text{ид}}(T)$  [5, 6]. Влияние давления на  $c_v$  не учитывалось, поэтому результаты расчета температуры ударного разогрева получаются с некоторым занижением.

Зависимость температуры ударного разогрева при  $D = D_{\text{ид}}$  от плотности состава приведена на рис. 5. При  $d \rightarrow \infty$  ( $D = D_{\text{ид}}$ ) температура во фронте УВ (1400 К) достаточно высока для того, чтобы реакция протекала за счет гомогенного разогрева матрицы эмульсионного состава. Рост плотности практически не влияет на  $T$ . Даже при  $\rho_0 = 1,38$  г/см<sup>3</sup>  $T = 1250$  К. Этот

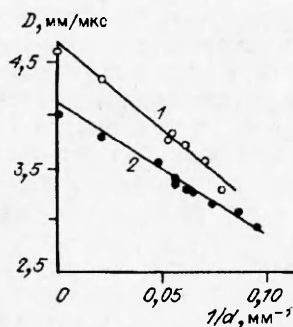


Рис. 4. Влияние диаметра заряда на скорость детонации при  $\rho_0 = 1,02$  (1) и  $0,89$  г/см<sup>3</sup> (2) (точки на оси ординат — расчет по [11]).

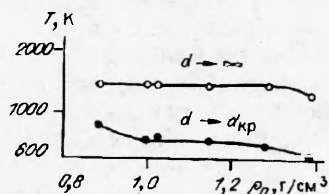


Рис. 5. Влияние начальной плотности заряда на температуру ударного разогрева.

результат представляет интерес с точки зрения обеспечения взрывобезопасности при производстве эмульсионных ВВ, поскольку показывает принципиальную возможность возникновения детонации эмульсионного взрывчатого состава даже при очень высокой плотности. При  $d \rightarrow d_{кр}$  ( $D = 0,67D_{кр}$  [12]) температура гораздо ниже (900—600 К), реакция взрывного превращения, очевидно, имеет гетерогенный характер.

Для расчета скорости тепловыделения за ударным фронтом детонационной волны использовалась теория неидеальной детонации [13]. Метод развит в [14] и применен в [15]. Расчетные зависимости константы скорости реакции  $W$  от давления в координатах  $p$ — $W$  имеют вид кривых, начальный участок которых при  $p \leq 6$  ГПа практически линейный. При более высоком давлении скорость растет слабее. Значения константы скорости, рассчитанные при  $p = p_{ср}$ , приведены ниже:

$\rho_0$	$p_{ср}$	$T_D$	$T_f$	$w$	$u_m(p_{ср})$	$u_{м1}(p_{ср})$
г/см <sup>3</sup>	ГПа	К	К	мкс <sup>-1</sup>	кг/(м <sup>2</sup> ·мкс)	кг/(м <sup>2</sup> ·мкс)
1,02	4,83	1864	750	1,45	0,886	0,024
0,89	3,20	1771	750	1,25	0,458	0,014

Предположим, что тепловыделение обусловлено горением состава, возникающим за счет разогрева при схлопывании микропузырьков. Полагая, что в момент воспламенения поверхность горения равна поверхности микросферы  $\pi d_q^2$ , а концентрация очагов горения  $n = 6\alpha(\pi d_q^3 \rho_{эф})$ , получим массовую скорость горения

$$u_m = W d_q \rho_{эф} / 6\alpha. \quad (3)$$

В работе [16] показано, что нормальная скорость горения водонаполненных составов во многих случаях зависит от адиабатической температуры горения и давления так же, как и нитросоединений [17]:

$$u_{м1} = 705 [T_f^2 / (T_f - T_0)^{3/2}] \exp(-7021/T_f) (p/p_0), \quad (4)$$

где  $T_f$  — температура пламени;  $T_0$  — начальная температура ВВ;  $p_0 = 30$  МПа. Приняв  $T_f = T_D$  (температура детонации),  $T_0 = T_s$ ,  $p = p_{ср}$ , найдем значения  $u_{м1}$  (см. выше).

Величина скорости горения, полученная расчетом, в несколько десятков раз меньше найденной по формуле (3) из данных по зависимости  $D(d)$ . Конечно, можно предположить, что в детонационной волне режим горения не чисто кондуктивный и что реальная скорость горения жидкости выше за счет автотурбулизации по Ландау — Андрееву — Левичу [18], в результате воздействия высокочастотных колебаний [19] или прорыва горячего газа сквозь тонкие прослойки жидкости в межпузырьковое пространство. Весьма вероятно, однако, что никакого упорядоченного горения в детонационной волне вообще нет.

Действительно, при  $\rho_0 = 0,9 \div 1,0$  г/см<sup>3</sup> объем порового пространства составляет 30—40 %. Эта величина — приблизительно та доля вещества, которая должна сгореть, чтобы обеспечить распространение процесса вблизи предела. Средний термодинамически равновесный разогрев пористого вещества за счет ударного сжатия составляет вблизи предела распространения детонации 500—600 К. Если предположить, что это количество тепла в основном выделяется в объеме, примерно равном объему первоначальных пор, разогрев в нем вещества будет гораздо выше полученного в результате термодинамического расчета. При выделении всей энергии ударного сжатия в объеме поры получим 1200—2000 К.

Реакция в объеме, близком к первоначальному объему пор, может быть практически гомогенной, и характерное время ее будет определяться условиями адиабатического теплового взрыва (характерное время охлаждения вещества в объеме поры  $\approx 0,2 d_q^2 / \bar{\kappa} \approx 0,2 (1,1 \cdot 10^{-4})^2 / 10^{-7} \approx 2 \cdot 10^{-2}$  с на четыре порядка величины больше времени реакции). Полагая, что кинетические константы реакции близки к полученным в [16] при горении

водонаполненных ВВ ( $E \approx 20$  ккал/моль,  $\lg k_{01} \approx 10$  [с<sup>-1</sup>]), найдем температуру ВВ, при которой адиабатический период индукции равен характерному времени реакции  $1/W$ :

$$T = E/R \ln(k_{01}/(WK)),$$

где  $K = c_p RT^2/(QE)$  — критерий взрывчатости. При указанных значениях кинетических констант, удельной теплоемкости  $c_p \approx 1,5$  кДж/(кг·К) и теплоты взрыва  $Q \approx 2,5$  МДж/кг получаем температуру очага разогрева  $\approx 1000$  К. Таким образом, в рамках рассмотренного механизма реакция во фронте детонационной волны при любой пористости идет гомогенно, но при  $d \rightarrow \infty$  это происходит во всем объеме реакционной зоны, а при уменьшении  $d$  (и  $D$ ) — в объеме очага воспламенения, в окрестности отдельных пор. По мере уменьшения диаметра заряда и соответственно увеличения потерь объем нагретого до высокой температуры и реагирующего во фронте детонационной волны вещества уменьшается, и при  $d = d_{\text{гг}}$  детонация затухает.

Авторы благодарны В.Г. Хотину и И.О. Черемкину за помощь при экспериментальном определении ударной адиабаты эмульсии и В.Н. Гамезо, рассчитавшему зависимость  $W(p)$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С и др. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970. — 164 с.
2. Deal W.E. Shock Wave Research on Inert Solids // Proc. 4th Symp. (Internat.) on Detonation. — Washington, 1965. — P. 321—345.
3. Кондриков Б.Н., Райкова В.М. Методические указания по курсу «Термодинамика горения и взрыва». Расчет параметров уравнения состояния. — М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1981. — 48 с.
4. Нянь Суэ-Сень. Физическая механика. — М.: Мир. — 544 с.
5. Афанасенков А.Н., Богомолов В.М., Воскобойников И.М. Критические давления инициирования взрывчатых веществ // Взрывное дело, № 68/25. — М.: Недра, 1970. — С. 68—92.
6. Lee J., Sandström F.W., Craig B.G. et al. Detonation and Shock Initiating Properties of Emulsion Explosives // Proc. 9th Symp. on Detonation. — Japan, 1989. — P. 263—271.
7. Анников В.Э., Кондриков Б.Н., Корнеева Н.Н. и др. О механизме детонации газонаполненных водных гелей // ФГВ. — 1983. — 19, № 4. — С. 139—143.
8. Кондриков Б.Н., Анников В.Э. Водонаполненные взрывчатые вещества на основе тонкодисперсного алюминия // Взрывное дело, № 75/32. — М., 1975. — С. 151—158.
9. Кондриков Б.Н., Сумин А.И. Уравнения состояния газов при высоком давлении // ФГВ. — 1987. — 23, № 1. — С. 114—122.
10. Кондриков Б.Н., Райкова В.М. Пределы детонации взрывчатых растворов // Там же. — 1977. — 13, № 1. — С. 55—62.
11. Yoshida M., Iida M., Tanaka K et al. Detonation Behavior of Emulsion Explosives Containing Glass Microballoons // Proc. 9th Symp. on Detonation. — Japan, 1985. — P. 171—177.
12. Кондриков Б.Н., Козак Г.Д., Обломский В.Б. и др. Детонационные превращения в аэрированной жидкости // ФГВ. — 1987. — 23, № 2. — С. 356—360.
13. Bdzil J.V. Steady-State Two Dimensional Detonation // J.Fluid Mech. — 1981. — 108. — P. 195—226.
14. Гамезо В.Н. Кинетика тепловыделения в реакционной зоне детонационной волны: Дис. ... канд. хим. наук. — М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1992. — 233 с.
15. Гамезо В.Н., Козак Г.Д., Кондриков Б.Н. и др. Детонация аэрированного тротила и динитротолуола // Тез. докл. V Всесоюз. совещания по детонации. — Красноярск, 1991. — Т. 2. — С. 356—360.
16. Егоршев В.Ю., Кондриков Б.Н., Яковлева О.И. Горение водонаполненных взрывчатых смесей // ФГВ. — 1991. — 27, № 5. — С. 56—63.
17. Кондриков Б.Н., Райкова В.М., Самсонов Б.С. О кинетике реакций горения нитросоединений при высоком давлении // Там же. — 1973. — 9, № 1. — С. 84—90.
18. Андреев К.К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. — М.: Госэнергоиздат, 1958. — 384 с.
19. Андреев В.В., Ершов А.П., Лукьянчиков Л.А. Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // ФГВ. — 1984. — 20, № 3. — С. 89—93.

125190, г. Москва,  
МХТИ им. Д.И. Менделеева

Поступила в редакцию 9/VII 1993,  
после доработки — 13/X 1993