

5. В. В. Полюдов, В. М. Титов, Г. А. Швецов. ПМТФ, 1973, 6, 41.
6. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва. М., Наука, 1975.
7. Г. В. Прякин, В. М. Титов, Г. А. Швецов. ПМТФ, 1971, 3, 137.
8. В. М. Титов, Г. А. Швецов. ФГВ, 1970, 6, 3, 401.
9. A. J. Hodges. Aeronaut. Sci., 1957, 24, 10, 755.
10. В. В. Сильвестров, В. П. Урушкин.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. VII. Новосибирск, 1971.
11. M. W. Burnham, S. J. Marshall. Proceedings of the Conference on Megagauss Magnetic Field Generation by Explosives and Related Experiments. Frascati, September 1965.
12. J. Teno, O. K. Sonju. Tech. Rep. AFAPL-TR-74-48, 1974.
13. S. C. Lin, E. L. Resler, A. Kantrowitz. J. Appl. Phys., 1955, 26, 95.
14. Л. П. Побережский. ТВТ, 1968, 6, 973.
15. H. E. Koritz, J. C. Keck. RSI, 1964, 35, 201.

ОСОБЕННОСТИ ДЕТОНАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАРЯДОВ СМЕСЕВЫХ ВВ

В. А. Даниленко, В. М. Кудинов
(Киев)

В последнее время для решения практических задач в области обработки металлов взрывом, горном деле и других отраслях народного хозяйства используются крупногабаритные заряды смесевых гетерогенных и дисперсных взрывчатых веществ. Опыт эксплуатации и исследования детонации таких ВВ в крупногабаритных зарядах плоской и цилиндрической симметрии указывает на ряд особенностей ее протекания. В цилиндрических зарядах, размеры которых много больше длины, предсказываемой необходимым условием стационарности [1], иногда происходит обрыв детонации или выход на новый стационарный режим. При использовании плоских зарядов для сварки взрывом заготовок площадью порядка 10 м² также наблюдается нарушение устойчивости процесса, которое не нашло однозначного объяснения с позиций современных представлений о сварке взрывом [2, 3].

Указанные особенности протекания детонационных процессов в крупногабаритных зарядах и трудности при их интерпретации с помощью существующих теорий [4—10] выдвигают в число актуальных задачу экспериментального исследования структуры фронта и устойчивости детонации гетерогенных и дисперсных твердых ВВ. В области исследования устойчивости и структуры фронта детонации твердых взрывчатых веществ выполнены работы [11—16]. Некоторые из них посвящены детонации гетерогенных и дисперсных взрывчатых веществ [13—16].

Выбор взрывчатых веществ и методик исследования

Для исследования структуры фронта и устойчивости детонационной волны использовались следующие группы ВВ:

- 1) дисперсные многокомпонентные, содержащие в своем составе чешуированный и гранулированный тротил, аммиачную селитру, гексоген, а также химически инертные добавки (NaCl, керамзит, алевроит, железистый кварцит 36% Fe + SiO₂);
- 2) дисперсные ВВ с одним взрывчатым (тротил, гексоген) и несколькими химически инертными компонентами;
- 3) смеси аммиачной селитры с нефтепродуктами;
- 4) гетерогенные взрывчатые вещества на основе тротила и аммиачной селитры с добавками воды, насыщенных растворов поваренной соли,

аммиачной, натриевой и кальцевой селитр, а также твердых инертных компонентов.

Для равномерного распределения жидкой фазы по массе в смеси ВВ вводился 1% полиакриламида. Исследовались заряды цилиндрической и плоской симметрии. Детонация инициировалась в режиме пересечения с помощью зарядов индивидуальных ВВ сферической, цилиндрической и плоской симметрии, а также с использованием слоистых систем, позволяющих плавно выводить детонацию на стационарный режим.

При рассмотрении цилиндрически симметричных движений детонационной волны использовались стеклянные (толщина стенки 0,5—1,0 мм) и полиэтиленовые (толщина стенки 0,3 мм) трубы диаметром $d = 120 \div 280$ мм и длиной $l = 2,2 \div 3,5$ м, а также стальные трубы с внутренним диаметром 50—120 мм и длиной 1—5 м (толщина стенки 5—10 мм). В мерзлых и глинистых грунтах¹ проводились исследования вертикальных скважинных зарядов с $l = 12 \div 24$ м и $d = 120 \div 280$ мм, а также горизонтальных зарядов диаметром 240—1000 мм, длиной 30 м, находящихся на глубине 18 м от поверхности грунта. Цилиндрические вертикальные заряды готовились свободным заполнением.

При изучении плоских движений детонационной волны использовались заряды в виде пространственного прямоугольного (а также трапециевидного) параллелепипеда. Ширина зарядов составляла 800—1500, длина 2200—5000, высота 8—200 мм. Плоские заряды готовились свободной засыпкой предварительно приготовленной смеси на подложки из металла. Боковые поверхности ограничивались песчаной оболочкой.

Опыты по изучению структуры фронта и устойчивости детонационных волн проводились при помощи оптических и следовых методов [11, 15, 17—19]. Количество повторений с каждым ВВ по следовой методике составляло 6—7, при подземных испытаниях и в вертикальных скважинах 15—20, при фоторегистрации — 10—12. Для фоторегистрации применялись приборы СФР-2М и СФР-2МТ, работающие в режиме фоторегистратора и лупы времени. Максимальное расстояние до заряда составляло 22,4 м. Оптическая ось фоторегистратора составляла угол 10—20° с осью заряда. При получении торцевых фотографий фронта детонационной волны использовались фоторегистраторы СФР-2МТ со стереоскопической приставкой, работающие в спаренном режиме стереосъемки, параметры которой определялись по методике [19]. В торец заряда помещалась полиэтиленовая сборка, заполненная аргоном и пропаном.

Опыты по следовой методике в цилиндрических зарядах проводились в стальных трубах со свинцовыми и латунными трубными вставками. Трубы помещались в разборные стальные матрицы с $d = 500 \div 1400$ мм. Для получения торцевых отпечатков применялись латунные, медные и свинцовые диски толщиной 10—120 мм, помещенные на слоистые подставки, состоящие из пенопласта, полиуретана и жесткого каучука. Описанная сборка устанавливалась в торец заряда и металась в приемное устройство. При проведении опытов по следовой методике в плоском случае использовались латунные, медные, свинцовые и алюминиевые листы толщиной от 5 до 10 мм, помещаемые на песчаные основания.

Количественная обработка параметров следовых неоднородностей (ячеек) для плоских зарядов производилась оптическими методами в отраженном свете. Измерялся размер ячеек b в направлении распространения детонации, а также угол наклона стороны ячейки β_1 к образующей заряда. Для замера угла наклона спирального следа к образующей заряда при проведении подземных испытаний получали гипсовые отливки следа. Обработка фоторегистрограмм производилась по методике, предложенной в работе [20].

¹ Опыты проводились совместно с И. И. Даниленко.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Некоторые результаты экспериментов по каждой группе ВВ приведены на рис. 1—8 и в табл. 1—6. Для фоторегистрограмм характерен прерывистый (пульсирующий) характер свечения зоны реакции при по-

Т а б л и ц а 1

Состав смесей, %				b, мм	tg β ₁ (±0,8)	$\frac{h_{кр}}{b}$	l, м
NH ₄ NO ₃ (1)	ТНТ (2)	гексоген (3)	алеврит (4)				
60,2	15,0	6	18,8	2,76	1,5	13,0	5,0
41,0	10,2	12	36,8	2,39	1,5	12,0	5,0
44,0	11,2	12	32,8	2,58	1,4	12,9	4,6

Пр и м е ч а н и е. Дисперсность компонентов 1—4—0,1±0,3; 0,02±0,15; 0,01±0,3; 0,08±0,2 мм соответственно.

стоянной скорости детонации (см. рис. 1—3). Исследование фоторегистрацией с торца и следовыми методами показывает, что неоднородности фронта детонации имеют регулярную структуру (см. рис. 4—6). Результаты статистической обработки следовых поверхностей плоских зарядов

Т а б л и ц а 2

Состав смесей, %				b, мм	tg β ₁ ±0,8	$\frac{h_{кр}}{b}$	l, м
NH ₄ NO ₃ (1)	ТНТ (2)	гексоген (3)	перлит (4)				
60,2	15,0	6	18,8	3,52	1,6	11,8	4,8
46,0	11,0	10	33,0	3,15	1,6	11,1	4,5
41,0	10,2	12	36,8	3,01	1,4	12,4	5,0
44,0	11,2	12	32,8	3,10	1,6	11,8	4,9

Пр и м е ч а н и е. Дисперсность компонентов 1—4—0,5±1,0; 0,02±0,15; 0,01±0,3; 0,03±0,15 мм соответственно.

смесевых ВВ, содержащих измельченный до дисперсности 0,02—0,15 мм тротил, представленные в табл. 1—4 и на рис. 7, показывают, что средний размер ячеек зависит от физических свойств добавки и ее дисперсности δ. Замена химически активного компонента (например, аммиачной селитры) инертным уменьшает размер пульсаций фронта и при определенном соотношении компонентов приводит к гашению пульсаций. На величину амплитуды колебаний сильное влияние оказывает также качество исходного смешения компонентов и их взаимное размещение.

Т а б л и ц а 3

Состав смесей, %			b, мм	tg β ₁ (±0,8)	$\frac{h_{кр}}{b}$	l, м
NH ₄ NO ₃ (1)	ТНТ (2)	кварцит (3)				
35	38	27	2,5	1,5	12,8	5,0
25	20	55	1,58	1,6	12,0	4,8
18	20	62	1,40	1,5	12,1	4,6
18	25	57	1,53	1,5	12,2	5,0
11	20	69	1,29	1,5	12,6	5,0
9	40	51	1,80	1,5	12,8	5,0

Пр и м е ч а н и е. Дисперсность компонентов 1—3—0,5±0,8; 0,02±0,15; 0,08±1,0 мм соответственно.

Т а б л и ц а 4

Состав смесей, %		b, мм	tz β ₁ (±0,8)	$\frac{h_{кр}}{b}$	l, м
NH ₄ NO ₃	дизельное топливо				
94	6	4,27	1,3	11,8	4,9
92	8	5,73	1,3	10,6	5,3
86	14	6,0	1,3	10,6	18,0
75	25	6,1	1,5	11,2	10,0

П р и м е ч а н и е. Дисперсность NH₄NO₃ — 0,5+1,3 мм.

Так, например, введение ультразвуковых колебаний в игданит, детонирующий по диффузионному механизму, способствуя гомогенизации смеси, полностью убирает пульсации фронта.

Таким образом, зависимость размера ячейки следа, а также амплитуды неоднородности свечения фронта от физико-химических и геометрических свойств добавки, их соотношения и пространственного расположения указывают на связь пульсаций фронта детонационной волны и его устойчивости с особенностями кинетических процессов, а также процессов переноса в зоне реакции. Об этом же свидетельствует постоянство

Т а б л и ц а 5

d, мм	l, м	Состав смесей, %			Дисперсность кварцита, мм	tz β ₂ (±0,9)
		ТНТ	H ₂ O	кварцит		
180	5,0	51	27	22	2,1—3,0	7,6
180	4,9	51	27	22	0,1—0,2	7,2
180	5,0	51	27	22	0,01—0,2	7,4
160	5,6	26,4	31,6	42	1,5—3,0	7,0
160	5,7	19,5	41,5	40	1,5—3,0	6,8

П р и м е ч а н и е. Дисперсность тротила — 4—5 мм.

отношения высоты заряда ВВ, при которой происходит прекращение детонации $h_{кр}$, к продольному размеру ячейки (см. табл. 1—4). Величина $h_{кр}$ получена в опытах с плоскими зарядами клиновидного сечения (начальная высота 200, конечная — 8 мм).

Таким образом, в результате потери устойчивости стационарной детонационной волны в исследуемых смесевых ВВ происходит образование пульсирующих детонационных волн. Эти волны, распространяющиеся в зарядах с размерами больше критических, в свою очередь, могут терять устойчивость. После потери устойчивости пульсирующей волны детонация может внезапно обрываться (см. рис. 1—2) или переходить на спи-

Т а б л и ц а 6

Состав смесей ВВ добавка, %	Дисперсность ВВ добавка, мм	d, мм	l, м	tz β ₂ (±0,9)
6ЖВ; 70 алеврит; 30	$\frac{3,68}{0,1 \div 0,3}$	218	18	6,7
ПЖВ-20; 70 алеврит; 30	$\frac{3,62}{0,1 \div 0,3}$	180	16	7,6
NH ₄ NO ₃ ; 94 диз. топливо; 6	4,01	250	24	7,3
ТНТ; 100	5,0	1000	30	7,1

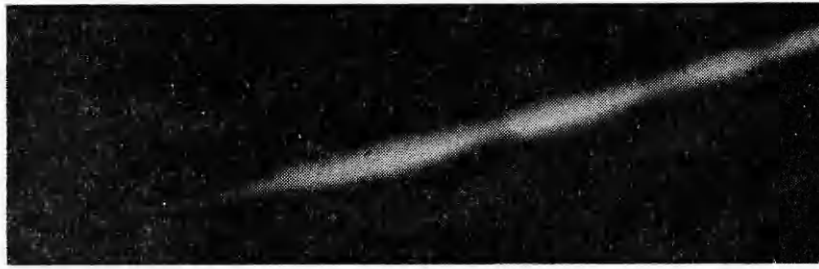


Рис. 1. Фоторегистрограмма распространения детонации в смеси 6ЖВ/насыщенный раствор аммиачной селитры (85/15); $d=160$ мм, $l=2,5$ м; материал оболочки заряда — полиэтилен; обрыв детонации на длине 2,0 м.

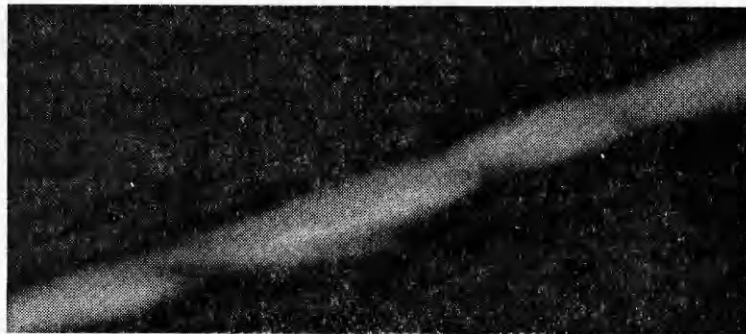


Рис. 2. Фоторегистрограмма распространения детонации в заряде водонаполненного зерногранулиита 30/70+40% железистого кварцита дисперсностью 1,5 мм; $d=5$ м, $l=0,180$ м; материал оболочки — полиэтилен; обрыв детонации на длине 3,5 м.



Рис. 3. Фоторегистрограмма распространения детонации в смеси водонаполненного гранулированного тротила с добавкой 40% железистого кварцита с $\delta=1,5$ мм; $d=160$ мм, $l=3,5$ м, материал оболочки полиэтилен (а) и торцевой отпечаток фронта детонации этой же смеси на латунном диске (б).



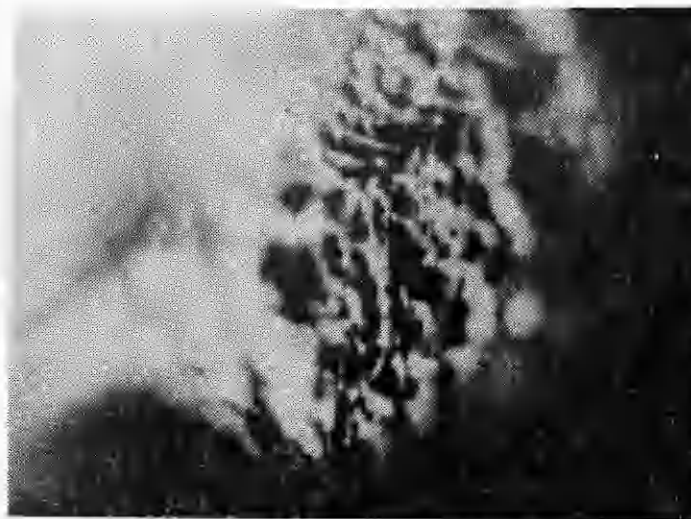


Рис. 4. Фотография фронта детонации смеси $\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{TNT}$ (92/8).

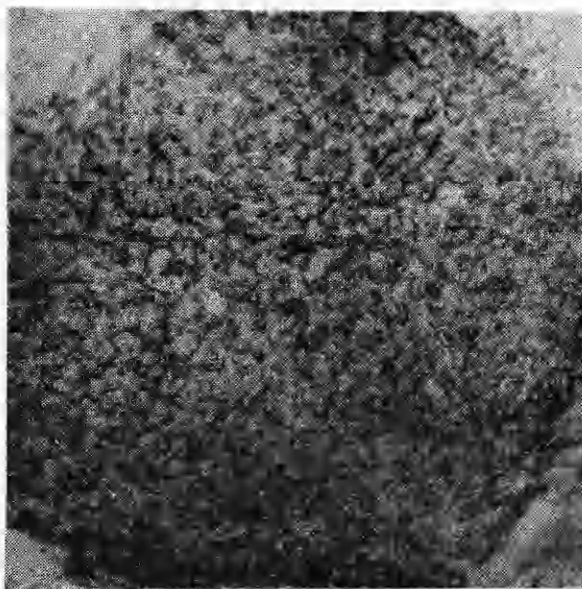


Рис. 5. Торцевой отпечаток фронта детонации смеси $\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{TNT}$ /гексоген (82/8/10) на отожженном медном диске. Размер неоднородности 1,7 мм.

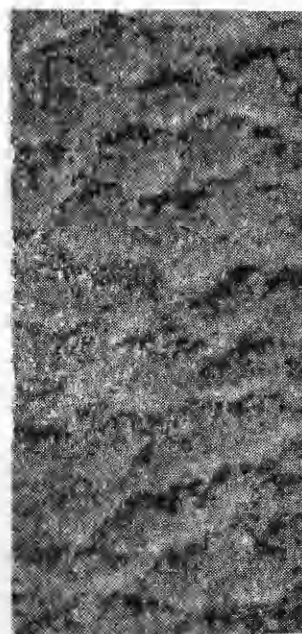


Рис. 6. Следовой отпечаток фронта скользящей детонации плоского заряда ($950 \times 50 \times 2200$ мм) для смеси $\text{NH}_4\text{NO}_3/\text{TNT}$ /гексоген (82/8/10) на свинцовом листе толщиной 20 мм; средний размер ячейки 2,3 мм.

новой стационарный режим. Для поиска этого режима были проведены специальные исследования с каждой из упомянутых выше групп взрывчатых веществ. Статистическая обработка результатов этих испытаний представлена в табл. 5, 6, а некоторые фотографии следовых поверхностей и фоторегистрограммы — на рис. 3, 8.

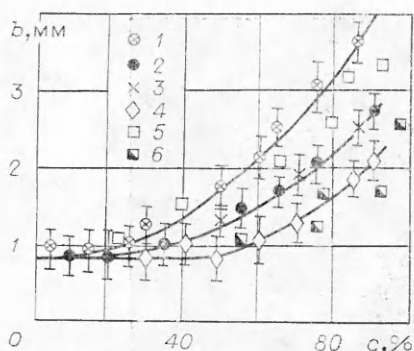


Рис. 7. Зависимость среднего размера неоднородности следа от процентного содержания c и свойств добавки в смесь гексоген/БЖВ.

1 — железистый кварцит, $\delta = 0,1 \pm 3,0$ мм; 2 — железистый кварцит, $\delta = 1,0 \pm 0,2$ мм; 3 — алевроит, $\delta = 0,01 \pm 0,2$ мм; 4 — NaCl, $\delta = 0,08 \pm 0,2$ мм; 5 — NH_4NO_3 , $\delta = 0,08 \pm 0,1$ мм; 6 — NH_4NO_3 , $\delta = 0,5 \pm 2,0$ мм.

рис. 3, а). Поэтому представляет интерес произвести поиск параметров подобия для таких режимов детонации.

Обращаясь к результатам статистической обработки (см. табл. 1) следовых поверхностей и фоторегистрограмм, можно убедиться, что для пульсирующих детонационных волн, оставляющих регулярный след на поверхности, а также имеющих неоднородный характер свечения фронта и обрывы детонации (см. рис. 1, 2), остается постоянным в пределах среднеквадратичного отклонения тангенс угла наклона стороны ячейки к образующей заряда ($\text{tg } \beta_1$). Для установившихся режимов детонации со спиральным путем распространения (см. рис. 3, б, 8) и регулярным характером свечения ее фронта (см. рис. 3, а) при выполнении определенных условий постоянным остается тангенс угла наклона спирального следа к образующей ($\text{tg } \beta_2$).

Обращаясь к результатам экспериментальных исследований по детонации пульсирующих (многофронтовых) и спиновых режимов в газовых смесях [17, 22, 23], можно убедиться, что и при детонации газовых смесей выполняется подобие по таким же величинам.

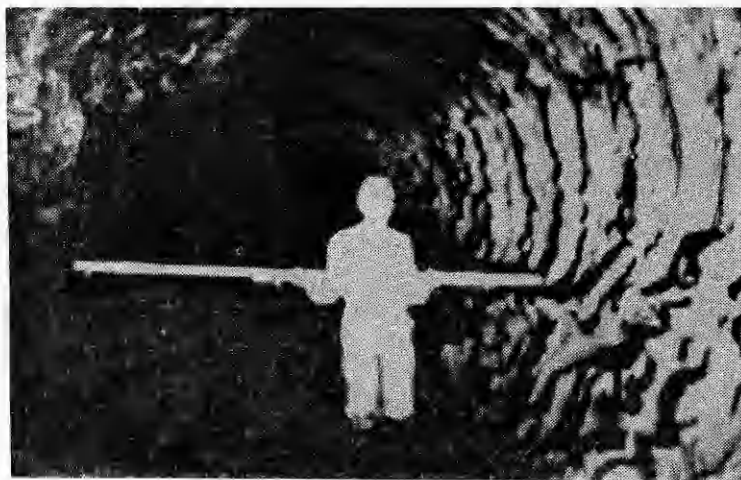


Рис. 8. След детонации горизонтального заряда тротила в глинистом суглинке; заряд с $d = 1,0$ м, $l = 30$ м находится на глубине 18,0 м от поверхности земли. Масштаб длины 2,2 м.

Из представленных снимков следовой поверхности после прохождения детонационной волны в заряде тротила (см. рис. 8), а также торцевого отпечатка фронта детонационной волны (см. рис. 3, б) и фоторегистрограммы ее распространения в смеси тротила с инертными добавками (см. рис. 3, б) следует, что по внешнему проявлению исследованные процессы подобны процессам спиновой детонации газовых смесей [17, 18]. Так, след, оставляемый на стенках штольни после прохождения детонационной волны в тротиле (см. рис. 8), является спиральным и напоминает след спиновой детонации газовых смесей, оставляемых на следовой поверхности. Об этом же свидетельствуют торцевые отпечатки (см. рис. 3, б) и фоторегистрограммы (см.

Выполнение подобия по одним и тем же безразмерным параметрам позволяет предположить [21], что наблюдаемые явления при детонации гетерогенных и дисперсных ВВ, описанные выше и в работе [15], аналогичны явлениям пульсирующей и спиновой детонации газовых смесей.

Таким образом, полученные в данной работе экспериментальные результаты показывают, что фронт стационарной детонационной волны, распространяющийся в крупногабаритных зарядах дисперсных и гетерогенных ВВ, неустойчив. Это приводит к образованию в ВВ режимов детонации, аналогичных пульсирующим и спиновым режимам детонации газовых смесей. При этом для пульсирующей детонационной волны амплитуды пульсаций свечения зоны реакции, а также параметры ячеистой структуры, оставляемой этой волной на следовой поверхности, зависят от геометрических и физико-химических свойств компонентов, входящих во взрывчатое вещество, а также от их пространственного расположения. Пульсирующие волны, распространяющиеся в зарядах с размерами больше критических, могут терять устойчивость, в результате чего происходит внезапный обрыв детонации или переход на новый стационарный режим.

Описанное в данной работе поведение детонационных волн, распространяющихся в гетерогенных и дисперсных ВВ, не находит объяснения с позиций существующих теорий [4—10] и требует новых теоретических подходов. Вместе с тем полученные результаты позволяют разработать полезные в практическом отношении рекомендации для стабилизации процесса плакирования взрывом крупногабаритных изделий.

Авторы выражают признательность А. Н. Афанасенкову и И. И. Даниленко за сотрудничество при выполнении работы, В. Г. Петренко за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
14/III 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Cook, J. S moot et al. J. Appl. Phys. 1956, 27, 3.
2. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, Наука, 1972.
3. В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. Сварка взрывом в металлургии. М., Металлургия, 1978.
4. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. М., ГИТТЛ, 1955.
5. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1945, 50, 2.
6. Z. Euging, R. F. Powell et al. Chim. Rev., 1949, 45, 144.
7. M. W. Evans, S. M. Ablon. Chem. Rev., 1961, 61, 2.
8. Н. М. Кузнецов. ЖЭТФ, 1967, 52, 1.
9. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., Наука, 1970.
10. К. М. Михайлюк, В. С. Трофимов. ФГВ, 1977, 13, 4.
11. P. Howe, R. Frey, J. Melani. Comb. Sci. and Technol., 1976, 14, 1.
12. А. Н. Дремин, В. М. Нелин, В. С. Трофимов. ФГВ, 1977, 13, 4.
13. В. В. Дунне. Science, 1970, 167, 3921.
14. T. Urbanishi. Zeitschrift. gesamte Schieß. Sprengst., 1927, 10.
15. В. А. Даниленко, А. Н. Афанасенков. Письма в ЖТФ, 1978, 4, 8.
16. В. Г. Хотин, В. А. Пономарев. ФГВ, 1973, 9, 2.
17. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчян. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск. Изд-во СО АН СССР, 1963.
18. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
19. А. С. Дубовик. Фотографическая регистрация быстродействующих процессов. М., Наука, 1975.
20. J. Z. Shott. Phys. Fluids, 1965, 8, 5.
21. А. И. Уемов. Аналогия в практике научного познания. М., Наука, 1970.
22. J. A. Fay. J. Chem. Phys., 1952, 20, 6.
23. А. А. Васильев. Канд. дис. ИТ СО АН СССР, Новосибирск, 1977.