

ДРОБЛЕНИЕ ТВЕРДЫХ ВВ В УДАРНОЙ ВОЛНЕ

Е. Н. Александров, В. А. Веретенников,
А. Н. Дремин, К. К. Шведов

(Москва)

Изучение поведения ВВ при ударном нагружении необходимо для решения вопросов, касающихся механизма их детонационного превращения.

Исследовать поведение частиц ВВ во фронте самой детонации трудно, так как весь процесс сжатия и превращения исходного вещества в продукты взрыва длится доли микросекунды. Поэтому, хотя бы для развития качественных представлений, важно найти способ исследования, сохранив по возможности те специфические условия, которые имеют место в реальной детонации.

В настоящей работе описана методика сохранения образцов пористых ВВ после ударного нагружения до 1,5—2,0 тыс. атм и приведены результаты анализа сохраненных в этих условиях образцов полистирола, тротила, гексогена, баллиститного пороха НБ и аммиачной селитры.

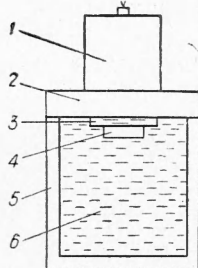


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — заряд ВВ; 2 — стальная преграда; 3 — парафин; 4 — исследуемый образец; 5 — емкость; 6 — вода.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Активный заряд (аммонит ПЖВ-20, $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$) с диаметром и высотой 100 мм генерирует ударную волну в стальном диске диаметром 200 мм и толщиной 30 мм. Между стальным диском и образцом помещалась пластина из парафина толщиной 15 мм и диаметром 80 мм. Наличие парафиновой пластины облегчало определение параметров ударной волны, входящей в образец, и исключало возможное влияние на исследуемое вещество упругой волны, выходящей из стали. Из парафина ударная волна переходит в исследуемые образцы, заключенные в стальную или стеклянную оболочку диаметром 40 мм и высотой 20 мм. Образец погружался в сосуд с водой, что обеспечивало более благоприятные условия сохранения, исключающие дробление вещества при ударе о дно и стенки сосуда.

Эффектом отражения ударной волны, переходящей из образца в воду, в рассматриваемых условиях можно пренебречь, так как различия в динамических жесткостях образца и воды, по-видимому, невелики.

Вес активного заряда и размеры элементов конструкции были подобраны таким образом, чтобы активный заряд не пробивал стальную преграду, а возможный взрыв исследуемого образца не разрушал сосуд, заполненный водой.

На рис. 2 показаны различные варианты эксперимента, использованные для выяснения факторов, связанных с действием на вещество ударной волны.

В опытах по схеме рис. 2, а длительность действия ударной волны на образец определяется в основном геометрией активного заряда и составляет $\sim 15\text{--}20$ мксек. Вариант 2, б отличается от описанного выше откачкой воздуха до давления $p_0 \approx 1$ мм рт. ст. В двух других случаях вещество после нагружения может разлетаться, а время действия ударной волны определяется толщиной испытуемого образца и составляет приблизительно 3—5 мксек (см. рис. 2, в).



Рис. 2. Различные варианты опытов.

а — образец в оболочке (время действия высоких давлений $\sim 15\text{--}20$ мксек); б — время действия высоких давлений $\sim 15\text{--}20$ мксек, давление воздуха $p_0 \leq 1$ мм рт. ст.; в — время действия высоких давлений $\sim 3\text{--}5$ мксек, г — схема исследования действия ударной волны на отдельную гранулу полистирола. 1 — стальная преграда; 2 — парафин; 3 — пористый образец; 4 — металлическая оболочка; 5 — стеклянная оболочка; 6 — к вакуумной системе; 7 — вакуумное уплотнение; 8 — пластилин; 9 — бумажная оболочка; 10 — отдельные гранулы полистирола.

Осциллограмма профиля массовой скорости в ударной волне в парафине на глубине 15 мм от поверхности стального диска показана на рис. 3. Ударная волна имеет достаточно резкий фронт и несет давление $P_{уд} = 1,7$ тыс. атм.

Непосредственно в исследуемых образцах амплитуда ударной волны не измерялась. Однако незначительные различия в начальных плотностях парафина и исследуемых веществ позволяют считать, что давления в последних были приблизительно такие же, как и в парафине, т. е. 1,5—2,0 тыс. атм.

Сохраненные после сжатия ударной волной образцы изучались под микроскопом с целью выявления нарушений структуры исходных частиц, и производился их гранулометрический анализ.

Они представляли собой, как правило, крупные конгломераты, легко разрушавшиеся под нагрузкой менее 1 кг/см². Разделение частиц, составлявших такие конгломераты, производилось ультразвуковым диспергатором УЗДН-1 в воде. Этот способ выявляет изменение структуры именно после ударного воздействия, так как обработка ультразвуком исходного вещества даже в течение значительно большего времени не разрушает частиц. После разделения частиц определялось относительное количество (n/n_0) и весовая

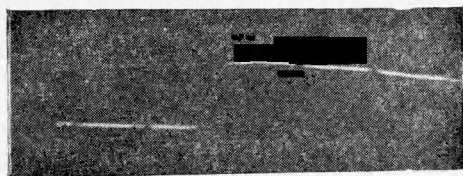


Рис. 3. Осциллограмма профиля массовой скорости за фронтом ударной волны в парафине.

доля (P/P_0) частиц данного размера (знаком Σ отмечены полное число частиц и вес анализируемой пробы).

Чтобы заведомо исключить возможное в рассматриваемых условиях инициирование реакции разложения (горение, взрыв), первые эксперименты были проведены с инертным веществом — блочным полистиролом. Рис. 4, б иллюстрирует результат воздействия ударной волны на отдельную гранулу полистирола с поперечным размером $\delta = 3\text{--}5$ мм

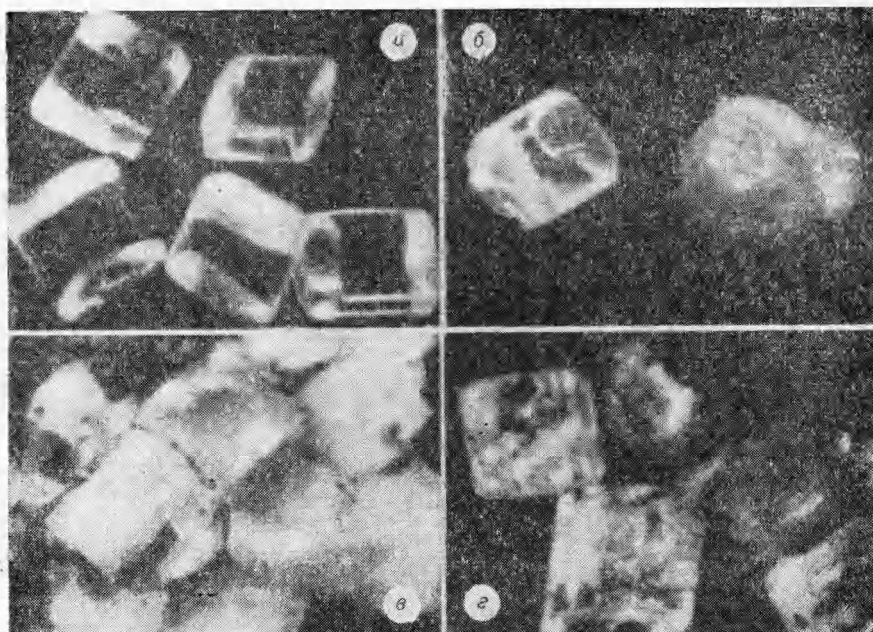


Рис. 4. Результаты воздействия ударной волны на образцы полистирола.
 а — исходные гранулы; б — отдельная гранула после ударного воздействия; в — сохранный пористый образец; г — гранулы из сохраненного образца с заполненными водой полостями. Ув. в 3 раза.

(схема опыта показана на рис. 2, а). Исходная частица превращается в раздробленный и спекшийся конгломерат, расплюснутый по границе парафиновой пластины поперек направления распространения ударной волны.

Сохраненный образец насыпной плотности ($\rho_0 = 0,7 \text{ г/см}^3$), составленный из тех же частиц, показан на рис. 4, в. Если полости в образце насыпной плотности заполнить водой, то после воздействия ударной волны частицы пронизываются трещинами, однако сохраняют свою первоначальную форму (см. рис. 4, г).

В табл. 1 представлены результаты гранулометрического анализа сохраненных образцов полистирола различной начальной дисперсности.

Таблица 1

Исходный размер $\delta = 3,0-5,0 \text{ мм}$			Исходный размер $\delta = 1,0-1,5 \text{ мм}$		
$l, \text{ мм}$	n/n_{Σ}	P/P_{Σ}	$l, \text{ мм}$	n/n_{Σ}	P/P_{Σ}
0,4	0,95	0,03	0,1	0,83	0,009
0,4-1,0	0,03	0,04	0,1-0,2	0,13	0,04
1,0-1,5	0,01	0,05	0,2-0,4	0,03	0,07
1,5-3,0	0,007	0,32	0,4-1,0	0,01	0,24
3,0-5,0	0,003	0,56	1,0-1,5	0,004	0,64

Действие ударной волны на пористые образцы различной ВВ должно отличаться большим многообразием эффектов, связанных с возможностью возбуждения реакции разложения.

Образцы ТНТ с начальной плотностью $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ были составлены из частиц чешуированного вещества с размерами $\delta = 0,4-1,0 \text{ мм}$ (рис. 5, а). При больших временах действия ударной волны (схему

опыта см. на рис. 2, а) частицы дробятся и сплавляются в конгломераты. Отдельные обгоревшие конгломераты размерами 3-10 мм вкраплены в виде очагов реакции в массу незатронутого разложением веще-

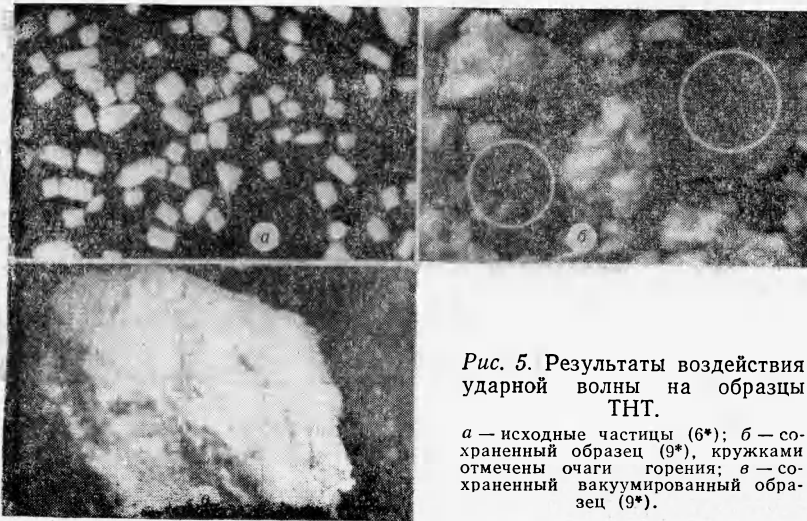


Рис. 5. Результаты воздействия ударной волны на образцы ТНТ.

a — исходные частицы (6*); *б* — сохраненный образец (9*), кружками отмечены очаги горения; *в* — сохраненный вакуумированный образец (9*).

ства (см. рис. 5, б). На фотографии эти очаги — темные области.

После уменьшения времени действия высокого давления до 3—5 мксек (схема опыта показана на рис. 2, в) в раздробленном и спекшемся образце видны лишь зародыши очагов реакции с концентрацией 5·10 см⁻³. На степень изменения структуры вещества изменение длительности волны не влияет. Результаты гранулометрического анализа представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2

<i>l</i> , мк	1	2	3	5	10	15	20	30	40	50	60	80	90	100
<i>n/n_Σ</i>	0,02	0,03	0,04	0,11	0,22	0,23	0,19	0,09	0,04	0,02	0,01	0,003	0,001	—
<i>P/P_Σ</i>	—	—	—	—	0,01	0,04	0,16	0,16	0,16	0,17	0,12	0,09	0,06	0,02

Образцы гексогена, составленные из монокристаллических частиц ($\delta=0,4-1,0$ мм) с начальной плотностью $\rho_0=1,0$ г/см³, удалось сохранить лишь в опыте по схеме рис. 2, б, когда заполняющий полости воздух откачивался до давления $p_0 \leq 1$ мм рт. ст. В опыте по схеме рис. 2, а образец гексогена взрывался, о чем свидетельствовало разрушение оболочки. Следы разложения гексогена в сохраненном образце, представляющем собой конгломерат, составленный из раздробленных и спекшихся частиц, не удалось обнаружить даже под микроскопом (рис. 7).

Результаты гранулометрического анализа образцов гексогена представлены в табл. 3 и на рис. 8. Эти данные получены после воздействия на образцы ударными волнами раз-

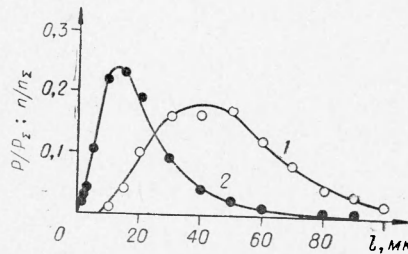


Рис. 6. Результаты гранулометрического анализа сохраненных образцов ТНТ. 1 — весовое распределение (*P/P_Σ*); 2 — количественное распределение (*n/n_Σ*).

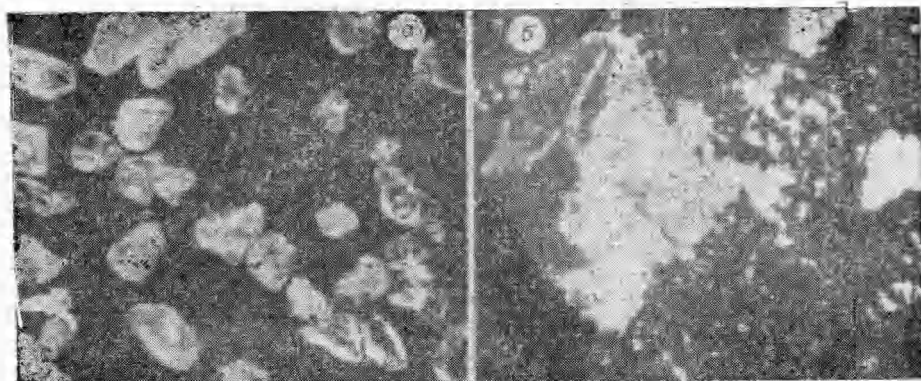


Рис. 7. Результаты воздействия ударной волны на образцы гексогена.
а — исходные частицы (6*); б — сохранный вакуумированный образец (9*).

личной амплитуды. Ударная волна с амплитудой $p_{уд} < 1,5$ тыс. атм была достигнута от того же активного заряда посредством изменения толщины металлической преграды. Параметры ударной волны не измерялись. О заметном уменьшении ее амплитуды можно качественно судить по уменьшению деформации стального диска.

Таблица 3

$l, \text{мк}$		1	2	3	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$p_{уд} \approx 1,5-2$ тыс. атм	n/n_{Σ}	0,08	0,13	0,56	—	0,14	0,05	0,02	0,09	0,003	—	—	—	—	—
	P/P_{Σ}	—	—	—	0,02	0,07	0,22	0,28	0,17	0,14	0,19	—	—	—	—
$p_{уд} < 1,5$ тыс. атм	n/n_{Σ}	0,02	0,02	0,06	0,12	0,23	0,31	0,13	0,06	0,02	0,01	—	—	—	—
	P/P_{Σ}	—	—	—	—	0,01	0,15	0,18	0,20	0,16	0,10	0,08	0,06	0,02	—

После воздействия ударной волны (схема опыта показана на рис. 2, а) на образцы баллиститного пороха НБ-40, представляющего собой пластический нитрополимер с удельным весом $\rho = 1,63 \text{ г/см}^3$, под микроскопом видны лишь следы деформации отдельных гранул. Образец имел начальную плотность $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ и был составлен из сферических частиц $\delta = 0,37-0,50 \text{ мм}$.

При исследовании образцов гранулированной аммиачной селитры ($\delta = 0,4-1,0 \text{ мм}$) с начальной плотностью $\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$ стальной цилиндр водой не заполнялся, чтобы не растворить сохранный образец. Обработка последнего ультразвуком проводилась также не в воде, а в метиловом спирте. Результаты гранулометрического анализа представлены в табл. 4 и на рис. 9. Точность анализа в этом случае ниже, чем для других веществ, так как селитра, хотя и незначительно, все же растворяется в спирте. Однако качественно результаты те же, что и для ТНТ и гексогена.

Из экспериментальных данных видно, что даже при небольшой (в сравнении с детонацией) амплитуде ударной волны происходит сильное изменение исходной структуры пористых образцов различных веществ.

Если в случае полистирола еще около 60% (по весу) частиц не меняет своего исходного размера (см. табл. 1), то более 90% массы сохраненных образцов гексогена, ТНТ и аммиачной селитры составляют частицы, размер которых на порядок меньше исходного (см. табл. 2—4). Максимум весового распределения отвечает в этих случаях примерно одинаковому конечному размеру частиц ($l \approx 15-40$ мк).

Результаты, приведенные на рис. 8, позволяют сделать качественный вывод о том, что степень изменения исходной структуры в рассматриваемых условиях зависит от амплитуды, действующей на образец ударной волны. С увеличением амплитуды растет весовая

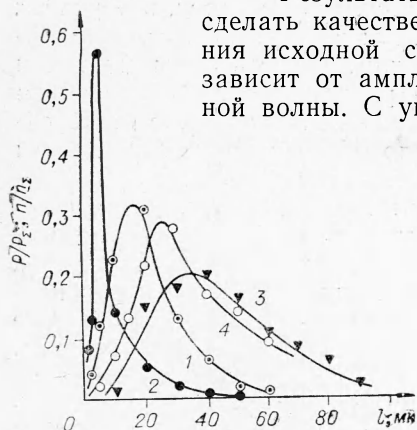


Рис. 8. Результаты гранулометрического анализа сохраненных образцов гексогена.

1 — количественное распределение (n/n_{Σ}) при $P_{уд} < 1,5$ тыс. атм; 2 — количественное распределение (n/n_{Σ}) при $P_{уд} \approx 1,5-2,0$ тыс. атм; 3 — весовое распределение (P/P_{Σ}) при $P_{уд} \approx 1,5$ тыс. атм; 4 — весовое распределение (P/P_{Σ}) при $P_{уд} \approx 1,5-2,0$ тыс. атм.

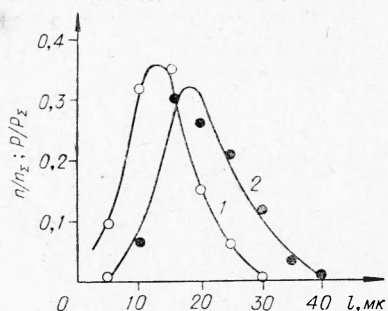


Рис. 9. Результаты гранулометрического анализа сохраненных образцов гранулированной аммиачной селитры.

1 — количественное распределение (n/n_{Σ}); 2 — весовое распределение (P/P_{Σ}).

доля мелких частиц, и максимум распределения смещается в сторону уменьшения их конечного размера.

Таблица 4

$l, \text{ мк}$	5	10	15	20	25	30	35	40
n/n_{Σ}	0,10	0,32	0,35	0,15	0,06	0,02	—	—
P/P_{Σ}	0,003	0,07	0,31	0,26	0,20	0,12	0,03	—

Отмеченное изменение исходной структуры пористого ВВ — результат интегрального действия на образец нескольких факторов, из которых в первую очередь следует отметить ударное сжатие во фронте и последующее действие высокого давления в волне разрежения.

Важно выяснить, какой из указанных выше факторов определяет изменение структуры вещества в рассматриваемых условиях, чтобы показать, могут ли полученные результаты иметь прямое отношение к детонации. Ведь в условиях детонации важно лишь то, что происходит с исходным веществом на ударном фронте и за времена, не превосходящие времени реакции ($\tau \lesssim 1$ мксек [1]).

Полученные в настоящей работе результаты позволяют считать, что физико-механические превращения исследованных веществ (дробление частиц и их оплавление) происходят в основном во фронте ударной волны, где упаковка вещества идет путем истечения его в полости и последующего сжатия.

Об этом свидетельствуют результаты опытов с полистиролом и тротилом. Так, пористые образцы полистирола сильно дробятся, в образцах же с заполненными водой полостями частицы не утрачивают своей первоначальной формы, несмотря на то, что длительность фазы сжатия и расширения не изменялась, а амплитуда ударной волны в последнем случае даже возросла (так как увеличилась начальная плотность образца). Заполнение полостей водой сделало образец более однородным и уменьшило возможность подвижек вещества во фронте.

Эксперименты с пористыми образцами ТНТ показали, что изменение длительности действия ударной волны не влияет на конечное распределение частиц по размерам, но сильно влияет на степень обгорания конгломератов. Из этого следует, что горение инициируется и развивается за времена, значительно большие, чем время сжатия во фронте ударной волны, а дробление и образование конгломератов идет в самом фронте ударной волны.

Отмеченные помимо дробления исходного вещества очаги реакции в ТНТ представляют важный результат воздействия на ВВ ударной волны.

То обстоятельство, что откачка воздуха из образцов ТНТ и гексогена до давлений $p_0 \leq 1$ мм рт. ст. в первом случае исключает появление обгоревших конгломератов, а во втором — взрыв образца во время опыта, позволяет считать, что основным источником инициирования горения является разогрев сжатого воздуха.

Сложность процесса ударного сжатия пористого вещества затрудняет оценку разогрева воздуха, который, по-видимому, претерпевает многократное сжатие. Минимальной оценкой будет температура, достигаемая при адиабатическом сжатии до давлений $p = p_{уд}$. В рассматриваемых опытах при амплитуде ударной волны $p_{уд} \simeq 2,0$ тыс. атм воздух был нагрет не менее, чем до $T \simeq 1000^\circ \text{K}$ [2].

Дробление пористого ВВ во фронте ударной волны с амплитудой $p_{уд} \simeq 1,5-2,0$ тыс. атм и инициирование реакции разложения нагретым при сжатии воздухом можно было бы рассматривать как аргумент в пользу справедливости механизма превращения пористых твердых ВВ в зоне реакции детонационной волны путем быстрого горения, инициируемого либо нагретым воздухом и проникающими в полости продуктами реакции [3], либо локализованным в точках контакта исходных частиц ударным разогревом [4]. Однако такой вывод не является бесспорным. Дело в том, что в рассматриваемых условиях инициирующая роль воздуха и разложение заметной доли ВВ путем горения проявляются за времена, более чем на порядок превосходящие характерные для детонации времена реакции. Но, с другой стороны, высокие давления детонации могут ускорить эти процессы.

Прямое экспериментальное определение времени реакции при детонации пористых ВВ, из которых воздух либо откачивался, либо вытеснялся водой, не обнаруживает заметного изменения времени реакции, несмотря на то, что была не только исключена инициирующая роль воздуха, но и значительно изменена проницаемость среды для продуктов реакции (во втором случае) [5]. Эти результаты позволяют отвести решающую роль в инициировании реакции при детонации неравномерному разогреву самого ВВ в детонационном фронте. Очагами реакции

в этом случае, очевидно, являются очаги, аналогичные мелким черным точкам, наблюдаемым в представленных выше экспериментах в образцах ТНТ, так как появление последних не зависит от наличия воздуха в порах и времени действия ударной волны. Очаги подобной структуры наблюдали и в работе [6] после достаточно быстрой деформации литых образцов ТНТ, так что причиной инициирования в них реакции можно считать пластический разогрев ВВ при упаковке во фронте ударной волны.

В рассматриваемых экспериментах давления во фронте ударной волны очень малы в сравнении с детонацией, и поэтому подобным способом инициируется разложение очень малой доли ВВ, однако важно отметить, что задержка реакции в этих очагах оказывается заметно меньше задержки зажигания ВВ нагретым воздухом. Очевидно, что с увеличением амплитуды ударной волны увеличится и число очагов, разогрева в которых станет достаточно для быстрого возбуждения реакции, и разложение основной массы ВВ будет протекать в форме очагового теплового взрыва.

Авторы благодарят Е. А. Лукьянова за помощь в проведении экспериментов.

*Поступила в редакцию
12/11 1968*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2.
2. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. Физматгиз, 1959.
3. А. Я. Апин. Докл. АН СССР, 1945, 50.
4. H. Eyring, R. E. Powell, J. H. Duffley, R. V. Parlin. Chem. Revs., 1949, 45.
5. Е. Н. Александров, В. А. Веретенников, А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 4.
6. В. А. Сухих, Ю. Б. Харитон. Вопросы теории взрывчатых веществ. Изд-во АН СССР, 1947.