

УДК 662.215.4;662.215.5

ЗАВИСИМОСТЬ ДЛИНЫ ПРЕДДЕТОНАЦИОННОГО УЧАСТКА В ОБРАЗЦАХ ФЛЕГМАТИЗИРОВАННОГО ОКТОГЕНА ОТ СКОРОСТИ И РАЗМЕРА СФЕРИЧЕСКОГО УДАРНИКА

Г. В. Белов, А. А. Седов, И. В. Олейников, Н. И. Шустова, А. В. Кудашов, А. В. Шишканов, Е. С. Митин, Г. А. Козлов, И. Н. Порошин, М. А. Тяпин, А. Н. Тюрин, А. М. Груздев

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Представлены экспериментальные данные по параметрам формирования детонационного процесса в образцах флегматизированного октогена в зависимости от скорости и размера сферических ударников. Получены данные по пороговой скорости ударника, приводящей к инициированию детонации, и по длине преддетонационного участка в диапазоне скоростей $882 \div 1333$ м/с. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными по протяженности преддетонационного участка для плоских ударных волн. Показана информативность радиоинтерферометрической методики регистрации развития взрывного процесса при воздействии ударника.

Ключевые слова: флегматизированный октоген, ударник, детонация, преддетонационный участок.

DOI 10.15372/FGV20210610

ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования параметров взрыва деталей из взрывчатых веществ (ВВ) в условиях ударного воздействия важно иметь информацию о динамике взрывного превращения, которая характеризуется, в первую очередь, возможностью возбуждения детонационного режима взрыва и длиной участка ВВ, на котором этот режим устанавливается (преддетонационный участок). Такая информация может быть получена путем численного моделирования условий конкретной задачи с использованием адекватной модели инициирования. Для создания и верификации модели инициирования необходим набор экспериментальных данных в представительном диапазоне начальных и граничных условий. Большинство таких данных, например [1, 2], получены в условиях плоского ударно-волнового нагружения образцов ВВ. В то же время, согласно [3], на динамику развития взрывного превращения оказывает влияние и геометрия фронта входящей в образец ударной волны (УВ). Масштаб этого влияния

определен недостаточно. Поэтому целью данной работы было экспериментальное изучение изменения длины преддетонационного участка в образцах флегматизированного октогена в зависимости от скорости и размера сферического ударника вблизи пороговых условий инициирования детонации.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1.

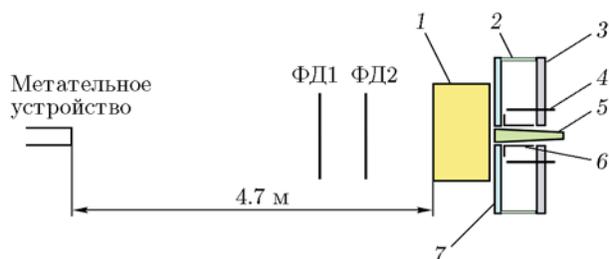


Рис. 1. Схема проведения экспериментов:

ФД1, ФД2 — датчики регистрации скорости ударника; 1 — исследуемый образец ВВ, 2 — шпилька, 3 — кольцо из пенопласта, 4 — контактные датчики (четыре пары), 5 — облучатель (полистирол), 6 — защитный экран, 7 — стальная пластина-индикатор ($\varnothing 150$ мм, $h = 2$ мм) с отверстием

Исследуемые образцы из флегматизированного октогена (типа РВХ-9501) имели форму цилиндра диаметром 120 мм и высотой 60 мм.

Нагружение образцов ВВ осуществлялось стальным ударником сферической формы (диаметр 14.3 мм) и имитатором сферического ударника (диаметр 30 мм) (рис. 2). Параметры конструкции имитатора стального сферического ударника подбирались таким образом, чтобы при скорости удара ≈ 1000 м/с (ожидаемая пороговая скорость удара) диаметр контактной площадки, не разгруженной боковыми волнами разрежения, (≈ 11 мм) был меньше диаметра сферической части ударника (19 мм) с некоторым «запасом». «Запас» обеспечивал получение корректных результатов при отклонении оси ударника до $\approx 18^\circ$. Ударники разгонялись метательным устройством калибра 20 мм. Скорость удара варьировалась массой навески пластического ВВ и регистрировалась с помощью электроконтактных датчиков и радиоинтерферометра.

Регистрация параметров взрывного процесса в образце ВВ проводилась двумя методами: электроконтактной и радиоинтерферометрической.

С помощью электроконтактной методики определялись скорость ударника и тип взрывного процесса (детонация или низкоскоростной режим взрывного превращения), выходящего к тыльной поверхности образца. Для этого на тыльной поверхности образца крепилась пластина-индикатор. Скорость пластины-индикатора на базе $2 \div 8$ мм служила характеристикой взрывного процесса: ≈ 0.5 км/с — низкоскоростной режим, ≈ 2.5 км/с — детонация [4]. Погрешность измерения скорости $\approx 12\%$.

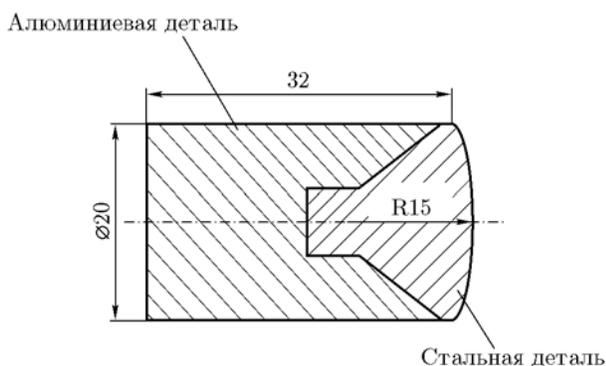


Рис. 2. Имитатор сферического ударника

Радиоинтерферометрическая методика использовалась для регистрации взрывного процесса от момента удара до его выхода на тыльную поверхность образца ВВ. Кроме того, она позволяла регистрировать и скорость ударника при подлете к образцу ВВ. В экспериментах использовался радиоинтерферометр ПРИ-03 с длиной волны зондирующего излучения 3.2 мм [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

Результаты регистрации процесса взаимодействия ударника с образцом ВВ радиоинтерферометрической методом на примере опыта с иницированием детонации и двух опытов с иницированием низкоскоростного режима взрывного превращения представлены на рис. 3, 4.

На рис. 3, а приведена исходная интерферограмма опыта с иницированием детонации в образце ВВ под действием ударника диаметром $d = 30$ мм со скоростью удара $v = 997$ м/с. Низкочастотный колебательный процесс до момента времени ≈ 6537 мкс соответствует подлету ударника к образцу ВВ. В промежутке времени $\approx 6537 \div 6543$ мкс зарегистрирован режим ста-

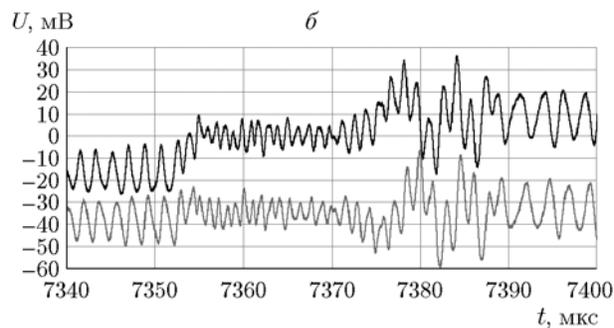
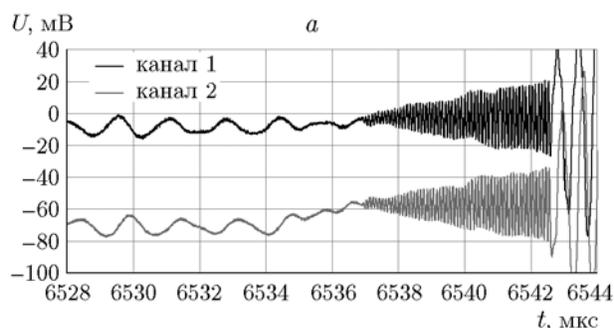


Рис. 3. Интерферограммы в опытах с ударником диаметром 30 мм и скоростями удара 997 (а) и 882 м/с (б)

ционарной детонации (высокочастотный процесс) в образце. После 6 543 мкс детонация выходит на тыльную поверхность образца.

На рис. 3,б приведена исходная интерферограмма опыта с отказом инициирования детонации ВВ при воздействии ударником диаметром $d = 30$ мм со скоростью $v = 882$ м/с. По сравнению со случаем инициирования детонации, здесь в период времени позже момента удара (7 353 мкс) интерферограмма имеет достаточно сложный и многочастотный общий вид.

Для определения скорости ударника строилась $X-t$ -диаграмма его полета. Чтобы минимизировать влияние отклонения траектории ударника относительно оси антенны радиointерферометра, для аппроксимации использовался максимально удаленный от образца ВВ участок траектории. Коэффициент наклона аппроксимирующей прямой позволил оценить скорость ударника. Для определения точного времени касания ударником образца ВВ зависимость, описываемая аппроксимирующей прямой, вычиталась из $X-t$ -диаграммы.

На рис. 4 представлена $X-t$ -диаграмма детонационного процесса. Видно, что сред-

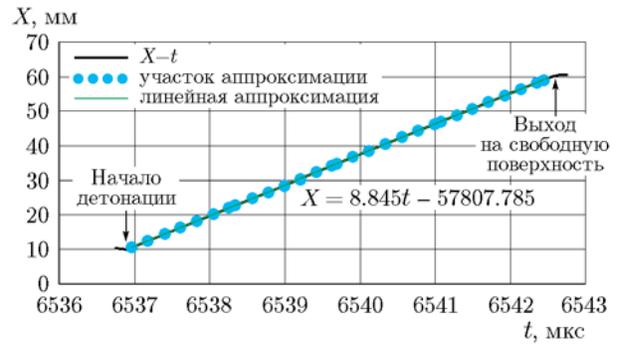


Рис. 4. $X-t$ -диаграмма детонационного процесса ($d = 30$ мм, $v = 997$ м/с)

няя скорость детонации составила в опыте 8 845 м/с. Моменты возникновения стационарной детонации и ее выхода на свободную поверхность образца определялись вычитанием аппроксимирующей прямой из $X-t$ -диаграммы детонационного процесса. Глубину возникновения детонации определяли совмещением момента окончания детонации с толщиной образца ВВ.

Условия и результаты экспериментов

Номер опыта	v , м/с	p , ГПа	l , мм	t_{del} , мкс	r , мм	w , км/с
Стальной сферический ударник диаметром 14.3 мм						
1	1 336	9.626	5.4	0.95	1.99	2.8
2	1 333	9.598	5	0.9	1.99	2.4
3	1 296	9.258	7.8	1.5	1.95	—
4	1 253	8.877	16	2.5	1.90	2.5
5	1 232	8.680	20	4.75	1.88	—
6	1 216	8.546	>60	—	1.87	0.53
Имитатор стального сферического ударника диаметром 30 мм						
7	1 179	8.06	5.7	1.0	3.85	2.6
8	1 098	7.20	6.4 ÷ 6.6	1.25	3.76	2.6
9	997	6.36	9.7	2.09	3.53	2.6
10	940	5.86	19.5 ÷ 20.5	4.9	3.39	2.4
11	935	5.86	18.9 ÷ 19.2	4.88	3.38	2.5
12	882	5.44	>60	—	3.25	0.6

Примечания. v — скорость ударника, p — давление входящей в образец УВ, l — длина преддетонационного участка, t_{del} — время задержки инициирования детонации, r — радиус кривизны входящей в образец УВ, w — скорость пластины-индикатора.

Результат регистрации скорости взрывного превращения в образце ВВ в отсутствие детонации при воздействии ударника диаметром $d = 14.3$ мм ($v = 1216$ м/с) показан на рис. 5,а. Момент удара и момент смещения пластины-индикатора на базу 2 мм показаны вертикальными линиями. Как видно, скорость распространения взрывного процесса W по мере прохождения по образцу ВВ снижается примерно от 1500 до 600 м/с. Время от момента удара до момента возникновения взрывного превращения составило ≈ 5 мкс.

Результат регистрации скорости взрывного превращения в образце ВВ в отсутствие детонации при воздействии ударника диаметром $d = 30$ мм ($v = 882$ м/с) показан на рис. 5,б. Время касания ударником образца ВВ показано на диаграмме вертикальной линией. Стрелкой указан момент смещения пластины-индикатора на базу 2 мм. Время от момента удара до возникновения взрывно-

го превращения составило ≈ 11 мкс. В момент $t = 7364$ мкс на интерферограмме проявляется слабовыраженная спектральная компонента, соответствующая скорости ≈ 1300 м/с, которая наблюдается до $t = 7370$ мкс со спадом скорости до $W = 1150$ м/с. В районе $t = 7373$ мкс виден отчетливый отклик процесса, идущего со скоростью $W = 2100 \div 2200$ м/с.

Результаты опытов представлены в таблице.

Средние скорости движения пластины-индикатора на базе $2 \div 8$ мм при инициировании детонации составили $w = 2.4 \div 2.8$ км/с, а при инициировании низкоскоростного режима взрывного превращения — $0.5 \div 0.6$ км/с. Задержка инициирования детонации определялась временем от момента удара до момента формирования детонационного режима. Давление рассчитывалось по ударным адиабатам для стали и флегматизированного октогена. Радиус кривизны УВ, входящей в образец ВВ, оценивался по соотношению

$$r = R \cdot v/D,$$

где R — радиус ударника, D — скорость УВ в образце ВВ.

Данные таблицы по условиям инициирования детонации в образцах ВВ свидетельствуют о том, что пороговая скорость (с учетом погрешности ее измерения ≈ 4 м/с) составила 1224 ± 16 м/с для ударника диаметром 14.3 мм и 909 ± 31 м/с для ударника диаметром 30 мм.

Для наглядности данные из таблицы представлены на рис. 6 в виде зависимости длины преддетонационного участка от скорости

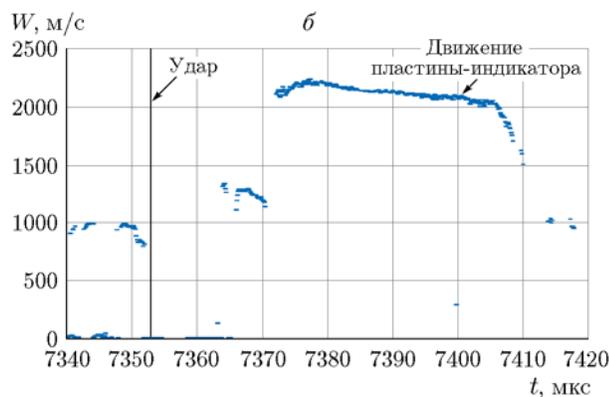
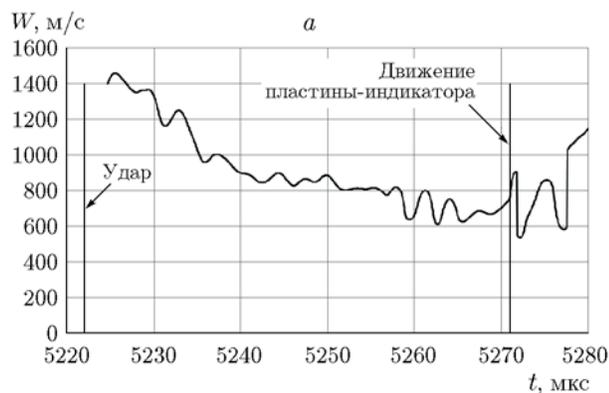


Рис. 5. W - t -диаграммы взрывного превращения в опытах с различными ударниками и скоростями удара:

а — $d = 14.3$ мм, $v = 1216$ м/с, б — $d = 30$ мм, $v = 882$ м/с

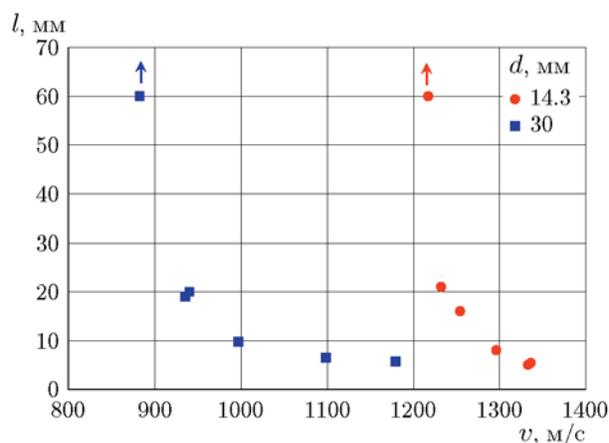


Рис. 6. Зависимость длины преддетонационного участка от скорости ударника

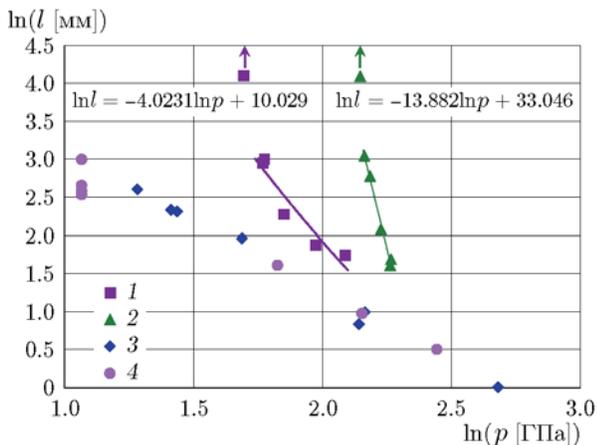


Рис. 7. Зависимость длины преддетонационного участка от логарифма давления для флегматизированного октогена (1–3) и РВХ-9404 (4):

1, 2 — эксперименты авторов при $d = 30$ (1), 14.3 мм (2); 3, 4 — эксперименты [1, 2] соответственно, плоская волна

ударника, а на рис. 7 — от давления входящей в образец УВ (в логарифмических координатах). Результаты опытов, в которых не зарегистрировано формирование детонации в пределах толщины образца (60 мм), представлены символами со стрелкой вверх, означающей, что длина преддетонационного участка больше 60 мм. Возможность перехода в детонацию в этом случае будет уже определяться динамикой развития низкоскоростного режима взрывного превращения, которая, как известно [3], зависит от размеров образца, наличия и параметров конструктивных ограничений (корпус и его прочность). Возможность реализации такого перехода в данной работе не рассматривалась.

Как видно из таблицы и рис. 6, 7, зависимость длины преддетонационного участка от скорости ударника и давления довольно сильная. При снижении скорости ударника диаметром $d = 14.3$ мм на ≈ 100 м/с ($\approx 10\%$) и ударника с $d = 30$ мм на ≈ 240 м/с ($\approx 20\%$), а давления соответственно на 1 и на ≈ 2.2 ГПа длина преддетонационного участка увеличивается с 5 до 20 мм (для $d = 14.3$ мм) и с 5.7 до 20 мм (для $d = 30$ мм). При достижении пороговых условий происходит отказ в возбуждении детонации (т. е. увеличение преддетонационного участка более чем на 40 мм) при снижении скорости ударника диаметром $d = 14.3$ мм всего на ≈ 30 м/с (2.5%), а в случае $d = 30$ мм —

примерно на 60 м/с (6.6%).

На рис. 7 представлены для сравнения экспериментальные данные [1, 2] по инициированию аналогичного и близкого по составу ВВ плоскими УВ длительностью 0.4 ÷ 5 мкс. В условиях данной работы длительность импульса под точкой удара $\approx 1.6 \div 2.3$ мкс. Как видно из графика, длина преддетонационного участка при инициировании плоскими УВ существенно слабее зависит от амплитуды входящей в образец УВ, по сравнению со случаем расходящейся УВ от сферического ударника. В одинаковом диапазоне длин преддетонационных участков (5 ÷ 20 мм) амплитуда плоских УВ изменяется более чем в два раза, в то время как для сферических ударников — на 10 ÷ 20%. При увеличении радиуса кривизны УВ, входящей в образец ВВ, примерно с 2 мм ($d = 14.3$ мм) до 3 ÷ 4 мм ($d = 30$ мм) происходит смещение экспериментальных точек в сторону результатов для случая инициирования плоской УВ, проявляющееся в уменьшении угла наклона аппроксимирующей прямой.

Отдельного внимания заслуживают результаты регистрации взрывного процесса в опытах с отказом инициирования детонации. Время от момента удара до начала формирования волны взрывного превращения составило в этих опытах 5 ÷ 11 мкс. Однако несмотря на то, что полученные скорости распространения взрывного процесса по образцу (600 ÷ 2200 м/с) не противоречат установленному диапазону скоростей в режиме низкоскоростного взрывного превращения (согласно [6] — от верхней границы скорости распространения конвективного горения приблизительно до скорости звука), пространственно-временной анализ записей не позволяет пока однозначно отнести полученные скорости к определенной части характерного для низкоскоростного режима волнового комплекса (к фронту волны сжатия, зоне химической реакции или к положению максимального градиента давления на профиле волны).

В режиме низкоскоростного взрывного превращения профиль волнового комплекса эволюционирует и место отражения радиоизлучения может меняться. С этим, возможно, связан скачок на записи скорости в опыте с ударником диаметром 30 мм (см. рис. 5, б). Однако, несмотря на существующую пока неоднозначность в интерпретации интерферограмм в опытах с отсутствием детонации, использова-

ние данной методики при изучении низкоскоростного режима позволяет рассчитывать на перспективы получения полезной информации для понимания процесса инициирования и распространения такого режима взрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты по параметрам взрыва и формированию детонационного процесса в образцах из флегматизированного октогена в зависимости от скорости и размера сферических ударников показали следующее.

1. Пороговые скорости, приводящие к инициированию детонации, составили 1224 ± 16 м/с для ударника диаметром 14.3 мм и 909 ± 31 м/с для ударника диаметром 30 мм.

2. Изменение длины преддетонационного участка от 20 до ≈ 5 мм может быть представлено зависимостями $\ln(l) = -13.882\ln(p) + 33.046$ для ударника диаметром 14.3 мм и $\ln(l) = -4.0231\ln(p) + 10.029$ для ударника диаметром 30 мм (l — [мм], p — [ГПа]).

3. Длина преддетонационного участка при инициировании ВВ плоскими ударными волнами существенно слабее зависит от амплитуды входящей в образец ударной волны по сравнению со случаем расходящейся волны от сферических ударников. При увеличении диаметра сферического ударника различие зависимостей уменьшается.

4. При снижении скорости удара ниже пороговой детонационный процесс в образцах толщиной 60 мм не формируется.

5. Использование радиоинтерферометрической методики позволяет рассчитывать на получение в дальнейшем полезной информации при исследовании процесса инициирования и распространения низкоскоростного режима взрывного превращения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов Е. Н., Бельский В. М., Родионов А. В., Шаврин М. Е., Буренин В. И. Особенности ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ на основе октогена и триаминотринитробензола (ТАТБ) // XIX Харитоновские тематические научные чтения: сб. тр. междунар. конф. — Саров, 2017. — Т. 1. — С. 31–38.
2. Уокерли Дж., Раби Р., Гинсберг М., Андерсон А. Исследование ударно-волнового инициирования РВХ-9404 // Детонация и взрывчатые вещества: сб. ст. / под ред. А. А. Борисова. — М.: Мир, 1981. — С. 269–290.
3. Чен П., Кеннеди Дж. Влияние химической кинетики и кривизны фронта на динамику развития ударных волн во взрывчатых веществах // Детонация и взрывчатые вещества: сб. ст. / под ред. А. А. Борисова. — М.: Мир, 1981. — С. 358–374.
4. Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Екимчев С. Н., Жиембетов А. К., Кудашов А. В., Олейников И. В., Шишканов А. В., Шустова Н. И. Влияние скорости ударника на параметры взрыва образцов из двух типов бризантных ВВ // XV Харитоновские тематические научные чтения: сб. тр. междунар. конф. — Саров, 2013. — С. 111–118.
5. Бельский В. М., Михайлов А. Л., Родионов А. В., Седов А. А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 29–41.
6. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973.

Поступила в редакцию 29.01.2021.

Принята к публикации 21.04.2021.