

УДК: 662.221.4

DOI: 10.53816/23061456_2022_3-4_153

**ОСОБЕННОСТИ НАЧАЛА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ
ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА АММОНИЯ**

**FEATURES OF THE START OF THERMAL DECOMPOSITION
OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS BASED ON AMMONIUM NITRATE**

Канд. техн. наук С.Г. Андреев, М.М. Бойко

Ph.D. S.G. Andreev, M.M. Boyko

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Рассмотрено влияние ряда органических компонентов, включая взрывчатые, и алюминия на начальную стадию ответной реакции на внешнее тепловое воздействие зарядов на основе нитрата аммония. Эксперименты проводились с использованием тепловой бани для определения температуры вспышки, дополненной термопарой для регистрации динамики изменения температуры на поверхности контакта заряда со стеклом. Добавление к нитрату аммония таких добавок, как сахарная пудра, тротил, порошок алюминия, приводило к снижению температур, при которых начинается стадия предвзрывного разогрева, и к возможности повторного возникновения теплового взрыва.

Тепловые взрывы модельных зарядов на основе НА по сравнению с традиционными штатными бризантными веществами на основе гексогена являются сильно вырожденными

Ключевые слова: самодельные взрывные устройства, тепловое воздействие, тепловой взрыв, нитрат аммония, сахарная пудра, алюминий, тротил, добавка, катализатор, термопара.

The influence of a number of organic components, including explosive, and aluminum on the initial stage of the response to the external thermal effect of charges based on ammonium nitrate is considered. The experiments were carried out using a heat bath to determine the flash point, supplemented with a thermocouple to register the dynamics of temperature changes on the surface of the charge-glass contact. The addition of such additives as powdered sugar, TNT, and aluminum powder to ammonium nitrate led to a decrease in temperatures at which the stage of pre-explosive heating begins. and the possibility of reoccurrence of a thermal explosion.

Thermal explosions of model charges based on ND are highly degenerate compared to traditional standard blasting substances based on RDX.

Keywords: improvised explosive devices, thermal effect, thermal explosion, ammonium nitrate, powdered sugar, aluminum, TNT, additive, catalyst, thermocouple.

Введение

Индивидуальные взрывчатые вещества и взрывчатые смеси, в частности конденсированных окислителей и горючих, являются одними из основных компонентов взрывных устройств

различного назначения: военного (боеприпасов) и промышленного (для ведения взрывных работ в промышленности) [1, 2]. В течение последних десятилетий приходится учитывать еще и наличие взрывных устройств так называемого террористического и криминального назначения

(далее самодельных взрывных устройств (СВУ)). Традиционно рассматриваемыми характеристиками всех взрывчатых веществ (ВВ) разрывных зарядов этих устройств являются показатели, определяющие их поражающее действие, стойкость к внешним эксплуатационным воздействиям, также степень риска при обращении с изделиями, их содержащими [3–5]. В случае СВУ важное значение имеет знание характеристик ВВ, необходимое для разработки работоспособных устройств и методов их обезвреживания или нейтрализации.

Одной из таких характеристик являются показатели ответной реакции ВВ и заряда ВВ в составе взрывного устройства на внешнее тепловое воздействие. Строго говоря, эти показатели можно определить, проводя натурные испытания [6]. Наряду с такими испытаниями, достаточно (или чрезмерно) дорогими для исследования широкого круга ВВ, проводят лабораторные исследования, которые, не являясь точным физическим моделированием, оказываются полезными на стадии поиска принципиально новых технических решений повышения стойкости СВУ и боеприпасов к различным режимам теплового воздействия [7–9]. Эксперименты такого типа, проведенные с «моделями» изделий или их частей, снаряженных штатными ВВ с фиксированными структурными характеристиками, как и следовало ожидать, исходя из известных результатов теоретических представлений и лабораторных исследований, подтверждают сильное влияние на поведение взрывных устройств как состава, так и химических свойств компонентов разрывного заряда, а так же их конструктивных особенностей.

Для СВУ характерно разнообразие рецептов взрывчатых составов (ВС), а также использование нетрадиционных для штатных изделий индивидуальных ВВ. При этом специфика условий изготовления ВВ и ВС для этих устройств может приводить к значительному неоднородию взрывчатых свойств зарядов даже одной рецептуры. Это усложняет выбор и разработку достаточно универсальных способов нейтрализации.

Исходя из этих представлений, можно прийти к выводу о том, что в случае этих взрывных устройств, на ответные реакции при тепловых воздействиях могут влиять не только конструктивные особенности изделий и физико-химиче-

ские особенности отдельных индивидуальных компонентов, но и такие характеристики заряда, как интегральная пористость, дисперсность заряда и однородность перемешивания компонентов, наличие неконтролируемых примесей. Для опытного установления наличия и проявления этих факторов в прикладных исследованиях, связанных с поиском и разработкой методов обезвреживания СВУ, необходимы лабораторные устройства, сочетающие простоту их изготовления и последующего проведения экспериментов, с достаточно высокой информативностью, которая позволяла бы анализировать, по крайней мере, динамику изменения температуры изучаемого образца.

Экспериментальная часть

Для оценки ответных реакций на тепловое воздействие снаряжения СВУ (самодельное взрывное устройство) мы ограничились использованием устройства, представляющего собой один из вариантов тепловой бани для опытного нахождения температуры вспышки со стандартным значением задержки [5], дополненной термопарой для непрерывной регистрации динамики изменения температуры у поверхности исследуемого образца.

Мы использовали хромель-алюмелевую термопару из проволочек диаметром 0,3 мм, чувствительный элемент который имел форму шарика диаметром 0,3...0,5 мм и прижимался к донной части пробирки с внутренним диаметром 14 мм с засыпанным в нее порошкообразным зарядом плотностью 0,75...0,8 г/см³ и массой 1,5 г. Запуск цикла регистрации сигнала с термопары осуществлялся с пятисекундным упреждением момента погружения полностью снаряженной пробирки в тепловую баню со сплавом Вуда, имеющего постоянную контролируемую температуру.

Были проведены опыты с различными модельными составами на основе аммиачной селитры (нитрата аммония (НА)) и с традиционными штатными энергетическими материалами. Обозначения и состав основной части использованных в наших опытах взрывчатых материалов приведены в табл. 1.

Состав смеси НА/СП/ТНТ/АI близок к одному из вариантов снаряжения СВУ, изготовленного в преступных целях. Для того чтобы выявить роль

Состав зарядов

№ п/п	Состав заряда	Массовое содержание, %					
		НА	Al	СП	ТНТ	Гексоген	Церезин
1	НА/СП/ТНТ/Al	76	8	13	3		
2	НА	100					
3	НА/Al	90,4	9,5				
4	НА/СП	86,4		13,6			
5	НА/ТНТ	96			4		
6	НА/СП/ТНТ	82,6		13,1	4,3		
7	ГФА		20			76	4

Примечание: СП сахарная пудра; Al — алюминиевая пудра ПАП-2 ГОСТ 5484-95; ТНТ — мелко размолотый порошок тринитротолуола; ГФА — смесь флегматизированного гексогена с алюминиевым порошком.

каждого добавочного по отношению к основному (НА) компоненту смеси НА/СП/ТНТ/Al, мы проводили также опыты со смесями НА с каждым компонентом в отдельности, и рассматривалось совместное влияние добавок тротила (ТНТ) и порошка алюминия (Al) на разложение трехкомпонентной смеси. При этом массовое содержание (в процентах) добавок по отношению к массе основы (НА) в двух или трехкомпонентных смесях было принято приблизительно таким же как

и процентное содержание масс этих компонентов в четырехкомпонентной смеси НА/СП/ТНТ/Al, (рис. 1).

Обсуждение результатов

При обсуждении полученных экспериментальных зависимостей $T_s(t)$, регистрируемых термопарой, мы воспользуемся их упрощенными, сглаженными изображениями на рис. 2, об-

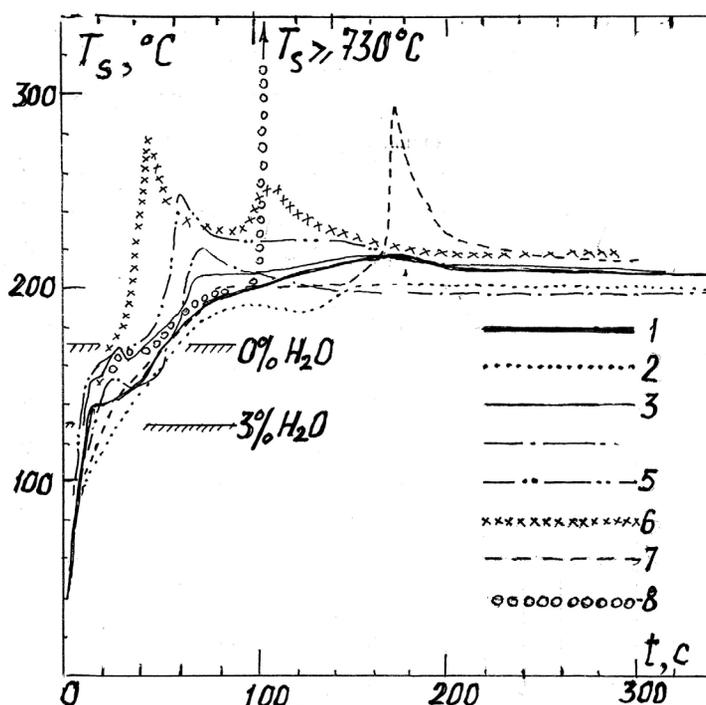


Рис. 1. Зависимости $T_s(t)$ в основной серии экспериментов: 1 — НА; 2 — НА/Al; 3 — НА/ТНТ; 4 — НА/СП; 5 — НА/СП/ТНТ; 6 — НА/СП/ТНТ/Al; 7 — ГФА; 8 — СВУ; 0% и 3% — уровни температур плавления НА, содержащего, соответственно, 0% и 3% воды

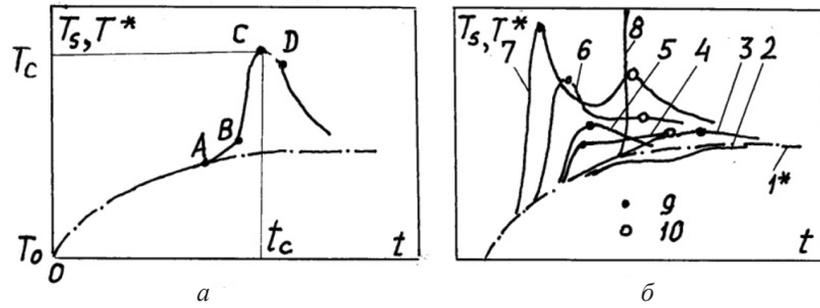


Рис. 2. Упрощенные стилизованные изображения участков температурных зависимостей для штатного ВВ и инертного теплофизического имитатора порошкообразных ВВ (а); нитрата аммония и составов на его основе (б): 1 — ГФА; 1* — инертный теплофизический имитатор порошкообразных ВВ; 2 — НА; 3 — НА/АI; 4 — НА/ТНТ; 5 — НА/СП; 6 — НА/СП/ТНТ; 7 — НА/СП/ТНТ/АI; 8 — СВУ; 9 — точка первого максимума зависимости $T_s(t)$; 10 — точка второго температурного максимума

рашая внимание лишь на особенности, которые представляются нам интересными и принципиальными. Количественные характеристики этих обсуждаемых особенностей приведены в табл. 2.

Зависимость (рис. 2, а), характерная для традиционных штатных ВВ, имеет одну точку максимума С. Эта зависимость отображает сложный нестационарный процесс в заряде с неоднородным пространственным распределением температуры, включающий экзотермическую самоускоряющуюся химическую реакцию, протекающую с большой скоростью и сопровождаемую интенсивным выделением тепла и газов [10–12], называемую тепловым взрывом. В первом приближении его задержку появления и интенсивность будем характеризовать, соответственно, величинами t_c и T_c . Участок зависимости $T_s(t)$ между точками А и В, на котором уже проявляются различия температур, регистрируемых в случае ВВ и его инерт-

ного теплофизического имитатора, называется предвзрывным разогревом.

Температурные зависимости у зарядов НА и смесей на его основе (рис. 2, б) в общем случае имеют по две точки максимумов: первую — черную, и вторую — светлую. Значения абсцисс черных точек обозначены t_{c1} а светлых — t_{c2} . Значения этих абсцисс для разных зарядов приведены в табл. 2.

Задержка появления температурного пика у НА t_c (на линии 2) незначительно меньше, чем t_c у ГФА. Предвзрывное разложение НА проявляется раньше (при меньшей температуре), чем у ГФА, а нарастание температуры, отображающее возникновение теплового взрыва, происходит медленнее. При этом температурный пик в случае НА значительно меньше, чем у ГФА. Такую трансформацию температурного профиля, а следовательно, и тепловыделения НА по отношению к ГФА называют вырождением теплово-

Таблица 2

Задержки появления температурных пиков (локальных максимумов) на регистрациях $T_s(t)$ при одностадийных t_c и двухстадийных t_{c1} и t_{c2} тепловых взрывах

№	Обозначение заряда	t_c , с	t_{c1} , с	t_{c2} , с
1	НА	175		
2	НА/АI	>300		
3	НА/ТНТ		70	160
4	НА/СП	75		
5	НА/СП/ТНТ		62	130
6	НА/СП/ТНТ/АI		50	110
7	СВУ	105		
8	ГФА	175		

го взрыва. Этот эффект можно объяснить следующим образом. НА более реакционно-способен (имеет меньшую энергию активации), но менее калориен (характеризуется меньшей удельной теплотой разложения) в сравнении с ГФА. Это приводит к тому, что начальная стадия теплового взрыва начинается при меньших температурах и с меньшей скоростью ее нарастания, вследствие чего на предвзрывной стадии расходуется «излишнее» количество ВВ, которое при высоких температурах и скоростях реакции могло бы усиливать интенсивность тепловыделения до взрывных скоростей.

Добавка к НА горючего в виде порошка алюминия (линия 3) не привела к дополнительному тепловыделению, что могло бы придать разложению взрывной характер. В основном это связано с тем, что окисная пленка на поверхности частиц алюминия препятствует контакту последнего как с НА, так и продуктами его разложения.

Взрывное увеличение скорости тепловыделения в смеси НА с ТНТ, температура плавления которого равна приблизительно восьмидесяти градусам Цельсия, происходит при температуре существенно меньшей (линия 4) в сравнении с «чистым» НА (180 °С у НА/ТНТ против 200 °С у НА). Смесь НА с ТНТ является не только более реакционно-способной, но и более калорийной по сравнению с «чистым» НА. Повышенная теплота разложения смеси компенсирует влияние снижения энергии активации, которое могло бы привести к вырожденности теплового взрыва. Отсутствие резкого спада температуры вслед за стадией взрывного нарастания тепловыделения, по-видимому, свидетельствует о продолжительном дореагировании смеси двух жидких компонентов, прилегающей к первоначальной зоне теплового взрыва. На температурном профиле у смеси НА/ТНТ в отличие от НА наблюдаются уже две, хотя и слабо выраженные точки максимумов.

Линия 5 рис. 2, б получена в результате опыта, в котором к НА была добавлена сахарная пудра (ее температура плавления равна 170–188 градусов Цельсия, в то время как температура плавления НА равна 170 °С–130 °С). Эта добавка снижает температуру, при которой начинается проявление взрывного ускорения тепловыделения в возникающей зоне теплового взрыва, так же как и ТНТ. Температурный

пик при тепловом взрыве выше, чем в случае добавки ТНТ, и спад температуры вслед за ним аналогичен таковому при тепловом взрыве ГФА. Однако скорости изменения температуры в окрестности температурного пика меньше в сравнении с ГФА. Химическая активность СП по отношению к НА, если считать, что она проявляется в снижении температуры, при которой тепловыделение от химической реакции начинает существенно превышать теплоотвод, приблизительно такая же как у ТНТ. Мы не исключаем возможности объяснения различий температурных профилей при добавках ТНТ и сахарной пудры тем, что массовое содержание добавки к окислителю горючего (повышающего тепловой эффект разложения НА), каковым является СП, значительно больше, чем ТНТ.

Добавка к высококалорийной смеси НА и СП приблизительно четырех процентов ТНТ (линия 6) значительно изменяет температурный профиль. При этом, во-первых, задержка проявления предвзрывного разогрева уменьшается и существенно увеличивается температурный пик, вызванный тепловым взрывом; во-вторых, наблюдается сравнительно быстрое падение температуры после пикового ее значения, сменяющееся плавным нарастанием и появлением второго слабо выраженного экстремума зависимости. Температурный профиль отображает (предположительно) возникновение зоны первого теплового взрыва и области к ней примыкающей, в которой саморазогрев приводит к зарождению второго слабо выраженного, вырожденного теплового взрыва. Предвзрывной разогрев первого теплового взрыва начинается приблизительно при температуре плавления сухого (обезвоженного) НА и компенсирует временное снижение темпа нагрева смесей на основе НА, которое вызывается плавлением основного компонента заряда. Добавка ТНТ при этом проявляет себя как наиболее активный катализатор сложной гетерогенной многостадийной реакции.

Введение порошкообразного алюминия в смесь НА с сахарной пудрой и катализирующей добавкой ТНТ (линия 7) привело к уменьшению задержки и температуры появления предвзрывного разогрева. Взрывная ответная реакция заряда проявилась в форме последовательности двух явно выраженных тепловых взрывов в одном заряде, что согласуется с нашим предполо-

жением о возможности эффекта возникновения двух зон теплового взрыва в одном заряде при числе Био порядка 0,4. Заметим, что тенденция к появлению такой двухстадийной взрывной реакции обнаруживается в опытах со смесями НА/ТНТ и НА/ТНТ/СП, но отсутствует в случае состава НА/СП. Добавка алюминиевого порошка к смеси НА/ТНТ/СП усилила не только эффект двухстадийности взрывного разложения заряда, но и общее тепловыделение без видимого воспламенения частиц алюминия. Это дает основание предположить возможность преодоления способности пленки окисла алюминия изолировать алюминий от остальных компонентов смеси и продуктов их разложения, а также возможность существования беспламенной формы реакции алюминия с умеренно разогретой смесью и промежуточными продуктами ее разложения.

Последовательное изменение температурных профилей по мере нарастания числовых индексов, обозначающих компонентный состав зарядов в проведенной серии опытов, не следует рассматривать как проявление общей тенденции изменения ответной реакции на внешнее тепловое воздействие по мере увеличения активных добавок к НА. Это подтверждается особенностью графика с индексом 8 зависимости $T_s(t)$ для заряда СВУ. В отличие от зависимости $T_s(t)$ в случае смеси НА/СП/ТНТ/АІ, характерной для явно вырожденных тепловых взрывов (замедленное нарастание тепловыделения в первом температурном пике) заряд СВУ отвечает на тепловое воздействие нормальным тепловым взрывом с практически скачкообразным нарастанием температуры. Возникновение в опыте с СВУ наибольшего температурного пика при тепловом взрыве, приводящего к прекращению функционирования термодары, вызвано наблюдаемым невооруженным глазом сгоранием частиц алюминиевой добавки. Воспламенение частиц алюминия можно объяснить либо достижением при тепловом взрыве, еще при инертном состоянии этих частиц, температур, необходимых для зажигания алюминия, или высокой способностью продуктов реакции смеси органических компонентов с НА вступать в контакт и реакцию с чистым алюминием, преодолевая изолирующую способность окисной пленки.

Выводы

Тепловые взрывы модельных зарядов НА, НА/ТНТ, НА/СП, НА/СП/ТНТ, НА/СП/ТНТ/АІ, приведенных в порядке возрастания интенсивности ответной реакции на внешнее тепловое воздействие, по сравнению с традиционными штатными бризантными веществами являются сильно вырожденными. Порядок расположения составов в приведенном списке соответствует уменьшению температуры, при которой тепловыделение от химического взаимодействия начинает существенно превышать теплоотвод, что является признаком зарождения теплового взрыва. Повышенная реакционная способность смеси при рассмотрении результатов опытов интерпретируется как причина эффекта вырожденности взрыва. Отличительной особенностью состава НА/СП/ТНТ/АІ явилось последовательное возбуждение двух тепловых взрывов в одном заряде.

Литература

1. Бабкин А.В., Велданов В.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В. и др. Боеприпасы. В 2 т. В.В. Селиванов, ред. Т. 1. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 506 с.
2. Бабкин А.В., Велданов В.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В. др. Боеприпасы. В 2 т. В.В. Селиванов, ред. Т. 2. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 551 с.
3. Кармолин А.Л., Чернюгов А.Д., Коршунов Ю.В. Безопасная перевозка взрывчатых веществ железнодорожным транспортом. — Москва: Транспорт, 1992. 383 с.
4. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Взрывобезопасность. Под ред. В.С. Артамонова. — СПб.: Астерион, 2006. 392 с.
5. Физика взрыва / Под ред. Л.Л. Орленко. Изд 3-е, испр. В 2 т. Т. 1. — М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 832 с.
6. Мачеевич Б.В. и др. Боеприпасы повышенной стойкости к опасным внешним воздействиям: особенности конструирования, испытаний и эксплуатации. — Красноармейск: ОАО «КНИИМ». 2014. 168 с.

7. Андреев С.Г., Ладов С.В., Федоров С.В. Моделирование начальной стадии взрывного превращения разрывных зарядов в условиях пожарного воздействия на боеприпасы // Оборонная техника. 1996. № 8–9. С. 13–19.

8. Андреев С.Г., Пруденский. Г.А. Исследование поведения зарядов взрывчатых веществ при тепловых воздействиях. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 27 с.

9. Андреев С.Г., Ладов С.В., Федоров С.В. Моделирование воздействия теплового поля пожара на заряды взрывчатых веществ в условиях лабораторного эксперимента // Наука и инновации. 2019. Вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1837>

10. Мержанов А.Г., ред. Тепломассообмен в процессах горения. — Черногловка: ОИФХ АН СССР, 1980. 152 с.

11. Мержанов А.Г., Аверсон А.Э. Современное состояние тепловой теории зажигания. — М.: Институт химической физики АН СССР, 1970. 64 с.

12. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. — М.: Мир, 1985. 384 с.

References

1. Babkin A.V., Veldanov V.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V. et al. Ammunition. In 2 volumes. V.V. Selivanov, ed. Vol. 1. — Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman. 2016. 506 p.

2. Babkin A.V., Veldanov V.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V. et al. Ammunition. In 2 volumes V.V. Selivanov, ed. Vol. 2. — Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman. 2016. 551 p.

3. Karmolin A.L., Chernyugov A.D., Korshunov Yu.V. Safe transportation of explosives by railway transport. — Moscow. Transport. 1992. 383 p.

4. Gelfand B.E., Silnikov M.B. Explosion safety. V.S. Artamonov, ed. — SPb.: Asterion. 2006. 392 p.

5. Explosion physics / Ed. L.L. Orlenko. 3rd ed., rev. 2 vols. Vol. 1. — M.: FIZMATLIT. 2004. 832 p.

6. Matseevich B.V. etc. Ammunition of increased resistance to dangerous external influences: design, testing and operation features. — Krasnoarmeysk: JSC «KNIIM». 2014. 168 p.

7. Andreev S.G., Ladov S.V., Fedorov S.V. Modeling of the initial stage of explosive transformation of explosive charges in conditions of fire impact on ammunition // Defense technology. 1996, № 8–9. Pp. 13–19.

8. Andreev S.G., Prudensky. GA Investigation of the behavior of explosive charges under thermal influences // — Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 1999. 27 p.

9. Andreev S.G., Ladov S.V., Fedorov S.V. Modeling the effect of the thermal field of a fire on explosive charges in a laboratory experiment // Science and Innovation. 2019. № 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1837>

10. Merzhanov A.G., ed. Heat and mass transfer in combustion processes. — Chernogolovka, OIFKh AN SSSR, 1980. 152 p.

11. Merzhanov A.G., Averson A.E. Modern state of the thermal theory of ignition. — Moscow: Institute of Chemical Physics, Academy of Sciences of the USSR. 1970. 64 p.

12. Maider Ch. Numerical simulation of detonation. — Moscow: Mir. 1985. 384 p.