### ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 535.71

## ПЕРЕХОД КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ В НИЗКОСКОРОСТНУЮ ДЕТОНАЦИЮ В НИЗКОПОРИСТОЙ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ СМЕСИ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТОМ В УСТРОЙСТВЕ С ОТСТРЕЛОМ МАССЫ

© 2021 г. В. Е. Храповский<sup>1\*</sup>, Б. С. Ермолаев<sup>1</sup>, А. А. Сулимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия \*E-mail: khrapovsky@mail.ru Поступила в редакцию 13.04.2020; после доработки 13.04.2020; принята в печать 20.05.2020

Исследовано распространение волн химического превращения в прессованных образцах из смеси перхлората аммония с полиметилметакрилатом стехиометрического состава. Горение инициировалось электровоспламенителем через переходник из прессованной смеси тротила с гексогеном в соотношении 30/70, размещенный в метаемом теле. Наряду с фоторегистрацией свечения через ряд отверстий в оболочке получены записи давления в трех точках по длине образца. Варьировались масса метаемого тела и размер частиц перхлората аммония. Размеры образца, плотность заряда, способ инициирования и свойства оболочки были одинаковыми. В предыдущих исследованиях было показано, что при размещении инициатора у закрытого торца в исследуемом образце легко возбуждается низкоскоростная детонация. В данной работе обнаружено, что при инициировании смеси от метаемого тела развитие процесса существенным образом зависит от его массы. В случае легкого тела в образце с крупными частицами перхлората аммония возникает конвективное горение, распространяющееся на всю длину образца. Если увеличить массу метаемого тела или уменьшить размер частиц перхлората аммония, горение ускоряется и переходит в низкоскоростную детонацию. Записи давления показали, что при увеличении массы метаемого тела давление, создаваемое инициатором, а также темп роста и максимум давления в волне возрастают. При измельчении перхлората аммония максимум давления в волне растет, а скорость вылета метаемого тела из канала оболочки снижается. Обнаружено формирование мощных волн давления треугольного профиля амплитудой до 1–1.2 ГПа с крутым передним фронтом.

*Ключевые слова:* конвективное горение, низкоскоростная детонация, стехиометрическая смесь, устройство с отстрелом массы.

**DOI:** 10.31857/S0207401X21010040

### введение

Потенциал практического применения конвективного горения (КГ) и низкоскоростной детонации (НСД) для быстрого контролируемого сжигания твердых энергетических материалов в импульсных метательных и сопловых устройствах, а также в струйных инжекторах остается главным стимулом исследований в этой области. В предыдущих работах [1–9] были выбраны подходящие объекты – смеси перхлората аммония (ПХА) с алюминием и органическими горючими порошками. При использовании этих смесей отсутствует риск перехода в нормальную детонацию в зарядах приемлемых размеров, изготавливаемых путем прессования до относительной плотности 0.9–0.95.

Однако оценка полноты химического превращения, проведенная для смеси ПХА с полиметилметакрилатом (ПММА) стехиометрического состава в лабораторном устройстве с отстрелом массы [8. 9], показала, что ее пока не удается поднять выше 50-60%. Выбор устройства с отстрелом массы для исследования полноты превращения при НСД связан со следующими свойствами процесса. Во фронте волны НСД выделяется лишь малая часть химической энергии смеси, основная же ее часть локализуется в облаке горящих частиц в зоне разрежения позади фронта волны. Если НСД распространяется от метаемого тела, то ускорение этого тела, зависящее от его массы, позволяет контролировать давление в зоне разрежения, тем самым воздействуя на степень химического превращения.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: *1* – стальная оболочка; *2* – исследуемый состав; *3* – мета-емое тело; *4* – инициатор; *5* – электровоспламенитель; *6*, *7* – отверстия для оптической регистрации; *8* – датчики давления.

При выборе инициатора в устройстве с отстрелом массы использовались результаты проведенных ранее экспериментов [2, 7]. Согласно этим результатам, под действием инициатора (таблетка диаметром и высотой 12 мм, полученная прессованием навески смеси тротила с гексогеном в соотношении 30/70 (ТГ 30/70) массой 2 г до пористости 10%, с выемкой под электровоспламенитель), размещаемого у закрытого торца исследуемого образца, в нем легко возбуждается волна НСД. Однако дальнейшие исследования [10] показали, что при инициировании смеси от метаемого тела динамика процесса может изменяться. В данной работе эти изменения исследуются подробно.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты проводились в прочных стальных цилиндрических оболочках наружным диаметром 60 мм с центральным каналом диаметром 16 мм и длиной 160 мм. Схема эксперимента приведена на рис. 1. На боковой поверхности оболочки вдоль образующей с шагом в 20 мм имеются шесть радиальных отверстий минимальным диаметром 2 мм. Первое отверстие находилось на расстоянии 50 мм от открытого торца оболочки, последнее — на расстоянии 10 мм от дна канала. Эти отверстия использовались для фотосъемки. Три других отверстия, сделанные на расстоянии 50, 110 и 150 мм от открытого торца оболочки, предназначались для датчиков давления. Они располагались под прямым углом к заряду в одном сечении с тремя отверстиями, которые использовались для фоторегистрации. Далее, при описании результатов измерений верхний, средний и нижний датчики давления будут обозначены  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  соответственно.

Исследуемые образцы длиной ~110 мм собирались из таблеток смеси 15% ПММА + 85% ПХА. Смеси готовили из перхлората аммония четырех различных фракций (средний диаметр частиц – 500, 150, 90 и 20 мкм), порошок ПММА имел частицы размером 4 мкм. Таблетки изготавливали прессованием; они имели следующие характеристики: диаметр – 15 мм. высота – около 11 мм. пористость – около 10%. Образец покрывался по боковой поверхности тонким слоем эпоксидной смолы и после ее затвердевания вставлялся в канал оболочки. Зазор между наружной поверхностью образца и внутренней поверхностью канала оболочки заполнялся эпоксидной смолой. После окончательной полимеризации верхний торец образца и отверстия очищались от смолы. Верхний торец образца с точностью до нескольких мм совпадал с положением первого ряда отверстий, которые располагались на расстоянии 50 мм от открытого конца оболочки.

Метаемое тело наружным диаметром 15.9 мм свободно укладывалось на верхний торец заряда. Между боковой поверхностью метаемого тела и каналом оболочки имелся зазор размером около 0.05 мм. Через него были возможны утечки продуктов горения. Внутри метаемого тела имелась полость, в которой размещались таблетка инициатора диаметром 12 мм и длиной 12 мм и электровоспламенитель ЭВФ-2 диаметром 5 мм и длиной 7 мм. Инициатор изготавливался прессованием навески смеси ТГ 30/70 массой 2 г до пористости 10%. Провода-контакты воспламенителя выводились через тонкое отверстие по оси метаемого тела диаметром 1 мм. Отверстие заливалось эпоксидной смолой. Вся сборка в полости метаемого тела также крепилась на эпоксидной смоле. В опытах использовались метаемые тела массой 52, 102 и 153 г, различающиеся длиной цилиндрической части.

Давление измерялось с помощью высокочастотных пьезокварцевых датчиков Т-6000 (номинальная частота – 250 кГц). Фоторегистрация проводилась с помощью ждущего фоторегистратора ЖФР-2 при скорости развертки 100 м/с. Для улучшения свечения в отверстия помещали навески мелкодисперсного тэна массой 5 мг. Типичная фоторазвертка свечения приведена на рис. 2а. В этом опыте отсутствует свечение ТЭНа во втором отверстии. По передним точкам пятен засветки на рис. 2а строили траекторию фронта свечения, которая приведена на рис. 26. При построении этого графика в качестве нулевой точки отсчета расстояний вдоль канала оболочки взято положение открытого торца образца, который обычно находился вблизи верхних отверстий для фоторегистрации и датчика давления D<sub>1</sub>. Этот же подход использован ниже для представления последующих результатов измерений. Соответственно, координаты по направлению к закрытому дну канала имеют знак минус, а координаты по направлению к открытому торцу канала — знак плюс.

В примере на рис. 26 экспериментальные точки с небольшим разбросом укладываются на прямую линию, по наклону которой определена средняя скорость волны, составившая 540 м/с. Процесс, распространяющийся с такой скоростью, следует отнести к конвективному горению [7]. В тех случаях, когда точки явно не укладываются на прямую линию, по этим точкам подбирался полином, проходящий через них с приемлемой точностью. Дифференцируя полином, определяли скорость волны свечения. Разброс скорости в параллельных опытах не превышал 10%.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Давление, создаваемое при сгорании инициатора

В первой серии опытов канал оболочки заполнялся не исследуемой смесью, а поваренной солью (размер частиц – 300 мкм, плотность – 1.93 г/см<sup>3</sup>). Записи давления для трех опытов с разной массой метаемого тела, полученные датчиком, размещенным в начальной точке, приведены на рис. 3. Положение начальной точки по времени выбрано произвольно. При массе 52 г максимальное давление составляло 55 МПа, время нарастания давления около 50 мкс. Фото метаемого тела,

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 40 № 1 2021



**Рис.** 2. *а* — Фоторегистрация свечения при распространении конвективного горения вдоль образца; *б* обработка фоторегистрограммы в координатах расстояние—время.

найденного после опыта, представлено на рис. 4. Можно видеть остатки несгоревшего инициатора массой около 0.3 г, образующего в полости воронку вокруг того места, где был размещен воспламенитель. Верхний слой образца поваренной соли оказался раздробленным, на стенках канала обнаружены частицы ТГ 30/70 и соли.

При увеличении массы метаемого тела до 102 и 153 г максимальное давление возросло до 360 и 513 МПа соответственно. Время нарастания давления составляло 50–70 мкс. Инициатор сгорал полностью, следов ВВ после опыта не было обнаружено.

На фоторазвертках во всех опытах высвечивалось только первое отверстие. Амплитуда давления и темп роста давления оказались тем выше, чем больше масса метаемого тела. Это, очевидно, вызвано перемещением метаемого тела, скорость которого тем меньше, чем больше масса тела.



**Рис. 3.** Давление, создаваемое при сгорании инициатора, при различной массе метаемого тела (г): 1 - 52, 2 - 102, 3 - 153.

# Влияние массы метаемого тела на воспламенение и горение смеси

Эта серия опытов проводилась на образцах смеси с ПХА крупной фракции: размер частиц – 500 мкм. При массе метаемого тела 52 г инициатор сгорал, но образец не поджигался. Образец удалось поджечь лишь после того, как на его торец была помещена таблетка высотой 10 мм, изготовленная из смеси с ПХА средней фракции: размер частиц – 150 мкм. Диаграмма перемещения фронта свечения в этом опыте приведена на рис. 5. Фронт воспламенения по всей длине образца распространялся со средней скоростью 350 м/с.

При массе метаемого тела 102 г фронт свечения поначалу распространяется с такой же скоростью, что и в опыте с метаемым телом меньшей массы. Однако затем скорость увеличивается и на расстоянии 100 мм от места инициирования достигает 900 м/с. Те же свойства на начальных базах измерения демонстрирует фронт свечения в опыте с метаемым телом массой 153 г. Но на следующих базах фронт ускоряется быстрее и на расстоянии 54 мм достигает скорости 1000 м/с, а на расстоянии 100 мм - 2050 м/с. Эти скорости выше минимальных скоростей (800-900 м/с), характерных для низкоскоростной детонации [7], что указывает на переход конвективного горения в НСД. После опыта с метаемым телом массой 153 г в оболочке оказались разрушены стенки нескольких отверстий диаметром 2 мм для фоторегистрации. Из-за возможного повреждения датчиков Т-6000 измерения давления в опытах с метаемым телом этой массы не проводились.



**Рис. 4.** Фото метаемого тела массой 52 г с остатками инициатора после попытки воспламенить смесь на основе ПХА с размером частиц 500 мкм.

На рис. 6 приведены записи с трех датчиков давления, полученные в опыте с метаемым телом массой 52 г. Действие инициатора было усилено таблеткой смеси с ПХА средней фракции (размер частиц – 150 мкм). Усиленный эффект инициатора можно оценить, сравнивая начальную фазу сигнала датчика  $D_1$  с записью давления тем же датчиком в опыте с поваренной солью. Все три записи давления, полученные в опыте с исследуемым образцом, имеют куполообразные максимумы на уровне 600–650 МПа. Затем следует спад давления, вызванный вылетом метаемого тела из канала.

Синхронизация записей давления с фоторазверткой проведена по точке свечения в отверстии, которое расположено в одном сечении с датчиком  $D_2$ . Начало свечения соотнесено с серединой участка фронтального роста давления от 18 до 122 МПа. Полученное время синхронизации, составившее 155 мкс, использовано при построении оси абсцисс на рис. 6. В результате свечение в первом отверстии с точностью до 10 мкс совпало с резким подъемом давления на записи датчика  $D_1$ , а начало спада давления после максимума (350 мкс) — с вылетом метаемого тела из канала. Соответствующие расчеты ускорения метаемого тела будут рассмотрены ниже. Здесь же следует

40

отметить, что если для оценки времени распространения волны конвективного горения вдоль образца использовать фоторазвертку, то его величина составит около 200 мкс. Это почти вдвое меньше, чем время вылета метаемого тела из камеры. Таким образом, заключительная стадия роста давления на всех трех датчиках скорее всего вызвана догоранием взвеси, образовавшейся после охвата горением всего образца.

На рис. 7 приведены записи давления с двух датчиков,  $D_1$  и  $D_3$ , полученные в опыте с метаемым телом массой 102 г. Здесь же для сравнения дана запись, полученная с датчика давления  $D_1$  в опыте с образцом из поваренной соли. Видно, что начальные стадии записей почти полностью совпадают. Синхронизация с фоторегистрацией показала, что к моменту, когда горение распространилось на всю длину образца (около 200 мкс), давление на записи с датчика  $D_1$  приблизилось к 400 МПа. Последующее догорание взвеси до вылета метаемого тела из канала оболочки привело к повышению давления до 900 МПа.

### Влияние размера частиц окислителя на скорость распространения фронта пламени

Серия опытов по влиянию дисперсности перхлората аммония проводилась с метаемым телом массой 52 г. Результаты обработки фоторазверток приведены на рис. 8. Для образцов смеси с частицами ПХА размером 150 мкм распространение фронта свечения проходило со средней скоростью в 480 м/с. При уменьшении размера частиц до 90 мкм скорость возросла до 650 м/с. При использовании частиц размером 20 мкм процесс быстро ускоряется и после прохождения второго отверстия (-35 мм) достигает скорости выше 800 м/с. что указывает на переход к НСД. Скорость распространения фронта пламени в нижней части образца составила 1600 м/с. После опыта оболочку разорвало на две части. Измерение давлений для этой смеси не проводилось.

На рис. 9 приведены записи давления тремя датчиками в опыте для образцов смеси с частицами ПХА размером 150 мкм. Запись, полученная с датчика D<sub>1</sub>, указывает на затянутое инициирование, в ходе которого в течение почти 300 мкс давление почти не повышается, оставаясь на уровне 50-60 МПа. Синхронизация записей давления с фоторегистрацией, проведенная по участку начального роста давления на записи с датчика D<sub>2</sub> (момент времени – 500 мкс), показывает, что свечение верхнего отверстия началось, когда давление на датчике D<sub>1</sub> достигло 250 МПа. Распространение свечения по всей длине образца завершилось до того, как на записях с датчиков D<sub>2</sub> и D<sub>3</sub> произошел резкий рост давления: до 800-900 МПа. Практически одновременный взрывной рост давления на

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 40 № 1 2021



**Рис. 5.** Траектории распространения фронта свечения для смеси на основе ПХА с размером частиц 500 мкм при различной массе метаемого тела (г): *1* – 52, *2* – 102, *3* – 153.



**Рис. 6.** Записи, полученные с трех датчиков давления  $(D_1-D_3)$ , размещенных по длине образца из смеси на основе ПХА с размером частиц 500 мкм, и запись с датчика  $D_1$  для образца из поваренной соли  $(D_1)$ . Метаемое тело массой 52 г.

двух датчиках, расположенных на расстояниях 60 и 100 мм от верхнего торца образца, означает, что источник взрыва локализован посредине между ними.

На рис. 10 приведены записи давления, полученные с трех датчиков в опыте для образцов смеси с частицами ПХА размером 90 мкм. И вновь запись, полученная с датчика  $D_1$ , указывает на затянутое инициирование, в ходе которого в течение 100 мкс давление не поднялось выше 50 МПа. Синхронизация записей давления с фоторегистрацией, проведенная по участку начального роста давления на датчике  $D_2$  (момент времени 350 мкс) показывает, что свечение верхнего отверстия на



**Рис.** 7. Записи, полученные с двух датчиков давления (D<sub>1</sub>, D<sub>3</sub>), размещенных по длине образца из смеси на основе ПХА с размером частиц 500 мкм, и запись с датчика D<sub>1</sub> для образца из поваренной соли (D<sub>1</sub>). Метаемое тело массой 102 г.

чалось, когда давление на записи с датчика  $D_1$  составило около 300 МПа. Распространение свечения на всю длину образца завершилось в момент, когда на записи с датчика  $D_3$  начался резкий рост давления, превысивший 1200 МПа. Можно предположить, что взрыв был инициирован отражением волны от закрытого торца образца.



**Рис. 8.** Траектории распространения фронта свечения, образцы из смесей ПХА с разным размером частиц (мкм): *1* – 150, *2* – 90, *3* – 20. Метаемое тело массой 52 г.

### Траектория перемещения и скорость вылета метаемого тела из канала оболочки

Полученные результаты указывают на то, что инициирование и развитие волнового процесса в исследуемых образцах существенным образом зависит от перемещения метаемого тела. Оценочные расчеты траектории и скорости вылета мета-



**Рис. 9.** То же, что и на рис. 6, для образца из смеси на основе ПХА с размером частиц 150 мкм.

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА том 40 № 1 2021

емого тела из канала оболочки проводились с использованием простейшей формы уравнения движения:

$$M\frac{dV}{dt} = SP(t), \quad V = \frac{dX}{dt},$$
$$X = V = 0 \text{ при } t = 0.$$

Здесь M, V, X и S — масса, скорость, координата и площадь поперечного сечения метаемого тела соответственно; t — время; P(t) — давление, действующее на торец и являющееся известной функцией времени. В качестве P(t) принималось давление, регистрируемое датчиком  $D_1$ . Интегрируя уравнения движения по времени, вычисляли скорость и траекторию перемещения метаемого тела, а также момент его вылета из канала оболочки.

Следует отметить, что предложенные уравнения упрощают процесс вычисления. Так как реальное давление, действующее на торец метаемого тела, меньше величины P(t), это приводит к тому, что расчетная скорость будет завышена, а время вылета занижено. Но, с другой стороны, в уравнениях не учитываются особенности, связанные с действием инициатора. Горение инициатора, размещенного в метаемом теле, начинается раньше, чем появляется сигнал на датчике давления  $D_1$ . Это обстоятельство приводит к тому, что начальные условия в момент времени t = 0 должны включать ненулевые значения скорости и перемещения, которые здесь не учитываются.

Расчеты для четырех опытов со смесями с разным размером частиц ПХА и разной массой метаемого тела приведены в табл. 1. Следует отметить снижение скорости вылета от 450 до 290 и 345 м/с при уменьшении размера частиц ПХА от 500 до 150 и 90 мкм соответственно. Сравнение расчетных времен вылета с величинами, определенными по началу спада давления на датчике D<sub>1</sub>, дало приемлемые результаты.

Интересно сопоставить время вылета тела и время окончания распространения волны свечения по всей длине образца. В двух опытах со смесями с частицами ПХА размером 500 мкм время вылета оказалось почти вдвое больше времени



Рис. 10. То же, что и на рис. 6, для образца из смеси на основе ПХА с размером частиц 90 мкм.

окончания распространения. Как следствие, повышение давления, вызванное догоранием смеси после распространения волны по образцу, успело внести свой вклад в ускорение метаемого тела, и скорость вылета оказалась достаточно большой. В двух других опытах со смесями с частицами ПХА размером 150 и 90 мкм эти времена оказались близкими по величине. Вследствие этого резкое повышение давления в камере, которое произошло вблизи дна оболочки, не успело внести какой-либо вклад в ускорение метаемого тела, и скорость вылета оказалась низкой.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование распространения волн химического превращения в прессованных образцах из смеси ПХА с ПММА стехиометрического состава при инициировании горения электровоспламенителем через переходник из прессованной смеси ТГ 30/70, раз-

Масса метаемого тела (г)/средний размер частиц ПХА (мкм)	Скорость вылета метаемого тела из канала оболочки, м/с	Расчетное время вылета, мкс	Время вылета, определенное по началу спада давления на датчике D <sub>1</sub> , мкс	Время окончания распространения, мкс
52/500	450	350	365	~200
102/500	380	395	375	210
52/150	290	625	720	560
52/90	345	430	480	390

Таблица 1. Оценки скорости и времени вылета метаемого тела из канала оболочки

мещенный в метаемом теле. Наряду с фоторегистрацией свечения через ряд отверстий в оболочке получены записи давления в трех точках по длине образца. Размеры образца и свойства оболочки, плотность прессования и средство инициирования были одинаковыми. Варьировались масса метаемого тела и размер частиц ПХА.

В предыдущих исследованиях было показано, что при размещении инициатора у закрытого торца в исследуемом образце легко возбуждается низкоскоростная детонация. Данные исследования показали, что при инициировании смеси от метаемого тела развитие процесса существенным образом зависит от его массы. В случае легкого тела в образце с крупным размером частиц возникает конвективное горение, распространяющееся по образцу со средней скоростью в 350 м/с. При увеличении массы метаемого тела горение ускоряется и на определенной длине заряда переходит в НСД. Длина переходного участка тем меньше, чем больше масса тела. При уменьшении размера частиц ПХА инициирование затягивается, однако возникающая волна конвективного горения имеет более высокую скорость, и в случае ПХА самой тонкой фракции (с размером частиц 20 мкм) горение переходит в НСД на длине заряда 35 мм.

Измерения давления проводились с помощью высокочастотных пьезокварцевых датчиков в трех точках по длине образца. Довольно гладкие записи давления амплитудой от 650 до 900 МПа при времени нарастания 350–500 мкс получены на смесях с крупной фракцией ПХА. В этих опытах время окончания распространения волны свечения по всей длине образца оказалось почти вдвое меньше, чем полное время, затраченное на ускорение и вылет метаемого тела из канала оболочки. Как следствие, повышение давления, вызванное догоранием смеси после распространения волны по образцу, успело внести свой вклад в ускорение метаемого тела, и скорость вылета оказалась достаточно большой.

При измельчении ПХА наблюдалось затянутое инициирование длительностью от 100 до 300 мкс.

Однако распространение волны свечения проходило с более высокими скоростями. Ближе к концу фазы распространения или при отражении волны от закрытого торца формировалась взрывная волна треугольного профиля с резко нарастающим передним фронтом и амплитудой 900— 1200 МПа. Время от формирования этой волны до вылета метаемого тела оказалось недостаточным, чтобы она успела внести вклад в ускорение метаемого тела, и скорость вылета оказалась довольно низкой.

Работа выполнена за счет субсидирования, выделенного Институту химической физики РАН (с мая 2019 г. – ФИЦ ХФ РАН) на выполнение государственного задания по теме 49.230082-2019-0018 (номер государственной регистрации ААААА18-1180331590088-8).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Романьков А.В. и др. // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. Вып. 7. М.: Торус Пресс, 2014. С. 369.
- Мартынюк В.Ф., Сулимов А.А., Чамров В.А. и др. // Хим. физика. 1983. Т. 2. № 10. С. 1435.
- 3. Храповский В.Е., Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Беляев А.А. и др. // Хим. физика. 2007. Т. 1. № 1. С. 27.
- 4. *Храповский В.Е., Худавердиев В.Г. //* Хим. физика. 2010. Т. 29. № 1. С. 39.
- 5. *Худавердие В.Г., Сулимов А.А. Ермолаев Б.С. и др. //* Хим. физика. 2015. Т. 34. № 11. С. 33.
- 6. *Сулимов А.А., Ермолаев Б.С.* // Горение и взрыв. 2016. Т. 9. № 1. С. 125.
- 7. *Ермолаев Б.С., Сулимов А.А.* Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. М.: Торус Пресс, 2017.
- 8. *Ермолаев Б.С., Сулимов А.А.* // Горение и взрыв. 2017. Т. 10. № 3. С. 82.
- 9. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С., Храповский В.Е. и др. // Горение и взрыв. 2018. Т. 11. № 1. С. 97.
- Ермолаев Б.С., Беляев А.А., Романьков А.В. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 80.