

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НА ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НИТРАТ АММОНИЯ

В.Н. Попок, Н.И. Попок, Л.А. Савельева, Е.С. Синогина

В работе представлены результаты анализа влияния ультрадисперсных порошков металлов и неметаллов на закономерности горения смесевых конденсированных систем с нитратом аммония в качестве окислителя. Показана возможность регулирования в широких пределах скорости горения, массы шлаков и предельных условий воспламенения смесей.

ВВЕДЕНИЕ

Смесевые конденсированные энергетические материалы (конденсированные системы - КС), реализующие самоподдерживающееся горение, находят широкое применение в качестве источников рабочего тела энергетических установок, газогенераторов в системах обеспечения безопасности: ракетные двигатели на твердом топливе, мощные лазерные установки, источники низкотемпературной плазмы; устройства пожаротушения, автомобильных мешков безопасности; системы управления газопроводами, реанимации нефтяных скважин и др. В качестве основных окисляющих компонентов высокоэффективных высокоэнергетических КС применяются перхлорат аммония (ПХА), мощные вторичные взрывчатые вещества типа октогена (НМХ) и гексогена (РДХ), что выдвигает задачи обеспечения экологической и взрывобезопасности при производстве и эксплуатации КС на их основе [1]. Одним из основных продуктов сгорания КС на основе ПХА является HCl, массовое содержание которой может достигать сотен тонн при работе, например, твердотопливных ускорителей космического корабля многоразового использования типа Шаттл [2]. Введение в КС на основе ПХА нитрамина (НМХ, РДХ) позволяет существенно снизить массовое содержание HCl в выхлопе двигателей при одновременном росте параметров опасности таких КС, выражающихся в их детонационной способности и меньшей стойкости к поражающим факторам внешних воздействий [1].

В качестве перспективного компонента КМ, удовлетворяющего требованиям экологической и взрывобезопасности, дешевого, имеющего практически неограниченную сырьевую и промышленную базы, рассматривается нитрат аммония (НА). Разработка и применение КС на основе нитрата аммония в качестве рабочего тела энергетических систем связано с необходимостью решения ряда задач, связанных с блокированием поли-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2007

морфных переходов в кристаллической решетке НА в технологическом и эксплуатационном интервале температур, с повышением эффективности их горения: улучшение воспламеняемости КС, уменьшение значений нижнего предела (по давлению) горения, увеличение скорости горения, полноты сгорания горючих элементов. Применение в КС металлических горючих, прежде всего, порошков алюминия, для повышения их энергомассовых характеристик приводит к реализации больших энергетических потерь в результате агломерации и неполного сгорания алюминия. В целом эта проблема является общей для составов, содержащих нитрамина (НМХ) и составов на основе НА в качестве окислителя [3-4].

Решению проблемы полиморфных переходов в НА посвящено большое количество работ, показывающих, что найдены эффективные добавки и технологии их сокристаллизации с НА, обеспечивающие фазовую стабилизацию НА в широком интервале температур: от -50 °С до +100 °С [5-6].

Одним из базовых подходов к решению вопросов повышения эффективности горения КС на основе различных типов окислителей является применение ультра- и нанодисперсных порошков металлов и катализаторов скорости горения [7-8].

В предлагаемой работе рассматриваются результаты анализа влияния ультрадисперсных порошков металлов и катализаторов горения на закономерности горения КС на основе НА и углеводородных связующих.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматриваются смеси (КС): двухфракционный НА с размером частиц ~50 мкм и ~300 мкм- соотношение фракций 30/70, % в смеси соответственно, углеводородное горюче-связующее (ГСВ) на основе каучука СКД пластифицированного нефтяным маслом - плотность 0,9 г/см³, брутто формула $\cong C_{72}H_{129}$,

энтальпия образования $\Delta H_f = -260$ ккал/кг, порошок алюминия микронных размеров (марки АСД-6, средний размер частиц $\sim 2...5$ мкм) и ультрадисперсный алюминий (УДП-АI- средний размер частиц 100 нм); в качестве каталитических добавок используются ультрадисперсные порошки Cu (УДП-Cu), Fe (УДП-Fe), Ni (УДП-Ni), В (УДП-В) и сажи с размером частиц менее 100 нм. В качестве катализатора скорости горения, позволяющего снизить нижний предел (по давлению) горения смесей применяется хлорид олова (SnCl_2) [9] с характерным размером частиц ~ 20 мкм. Катализаторы вводились в количестве 2% по массе сверх 100% к смеси. Содержание, по массе, базовых компонентов в смеси в %: НА-72%; ГСВ-13%; АСД-6 (УДП-АI) - 15%. Коэффициент избытка окислителя $\alpha \approx 0,5$. Все эксперименты проводились в температурных и влажностных условиях, обеспечивающих отсутствие полиморфных переходов в НА и влияния влажности на скорость горения смесей. Закономерности горения смесей определялись в приборе постоянного давления в интервале давлений 0,1...12 МПа. Использовались цилиндрические образцы, бронированные по боковой поверхности и одному торцу. Тип бронировки (тонкий слой эпоксидного клея, текстолитовые или стеклянные формы) не влиял на результаты испытаний. Подготовка образцов для испытаний и методы определения параметров их горения описаны в [10, 11]. Погрешность определения массы шлаков $\pm 0,01$ г. Погрешность определения скорости горения $\pm 2\%$. Определены зависимости скорости горения смесей от давления в виде $u = Vp^v$, характер структуры и масса шлаков, характеристики агломератов, что, в целом, рассматривается в качестве показателей эффективности горения смесей.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ОКИСЛИТЕЛЕЙ И СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ

Анализ основных характеристик горения окислителей (ПХА, НМХ, НА), как монотоплив, и их смесей с ГСВ (например, ГСВ- углеводородные типа полибутадиенового каучука с гидроксильными концевыми группами (НТРВ), полиуретана (PU), смеси нитроглицерина с нитроцеллюлозой (NG/NC)) показывает, что НМХ как монотопливо имеет самые большие значения адиабатической температуры (T_f) и скорости горения u при следующих других характеристиках (при давлении $p=7$ МПа, [2,12]): НМХ- $T_f=3200$ К, $u \sim 10$ мм/с, кислородный баланс $K_b = -21,6\%$, молекулярная масса продуктов горения $MM=24,3$ г/моль,

$l_{уд}=266$ с; ПХА- $T_f=1400$ К, $u \sim 10$ мм/с, $K_b=34\%$, $MM=27,9$ г/моль, $l_{уд}=157$ с; НА- $T_f=1247$ К, $u \sim 1$ мм/с, $MM=22$ г/моль, $K_b=20\%$, $l_{уд}=161$ с. Смесей на основе рассматриваемых окислителей и связующего, например НТРВ, реализуют следующие показатели горения (при давлении $p=7$ МПа): смеси на основе НМХ - $T_f \approx 2500$ К, $u \sim 1...5$ мм/с, $l_{уд}=230$ с; ПХА - $T_f=3000$ К, $u \sim 10...40$ мм/с, $l_{уд}=230...250$ с; НА (с использованием катализаторов скорости горения) - $T_f \sim 1500...1800$ К, $u \sim 1...7$ мм/с, $l_{уд}=210...220$ с. Кроме этого, ПХА и НА, как монотоплива, имеют высокие значения нижних пределов горения по давлению [8]. Смесей на основе ПХА и органических горючих способны к устойчивому горению при нормальных условиях, в то время, как аналогичные некатализованные смеси на основе НА имеют нижний предел горения по давлению на уровне 4...10 МПа. При сравнительном анализе термодинамических характеристик необходимо учитывать, что разработчиками КС считается приемлемым некоторое снижение величины удельного импульса при эффективном решении экологических вопросов, улучшении "сигнатуры" выхлопа и параметров взрывобезопасности [1, 12].

Наличие одинаковых активных продуктов разложения НМХ и НА в целом объясняет низкую эффективность горения смесей на их основе, выражающуюся в низких значениях скорости горения и больших потерях на агломерацию и неполное сгорание в случае введения в смеси металлического горючего [12]. В свою очередь, введение металлического горючего в смеси с ПХА приводит к существенному увеличению температуры горения (до 3500-3900 К, [1]), что приводит к необходимости ограничения в уровне давления в рабочих камерах энергетических установок. Частичная замена в таких смесях ПХА на НМХ приводит к снижению температуры горения и возможности увеличения давления в камерах сгорания, что благоприятно сказывается на эффективности горения. Уникальную возможность регулирования эффективности горения за счет повышения давления в камерах сгорания можно реализовать на смесях на основе НА. С учетом того, что удельный импульс связан с параметрами горения соотношением $l_{уд} \sim (T_f/MM)^{0,5}$, положительный эффект от использования НА в составах, в том числе и с металлическим горючим, с сопутствующим увеличением рабочего давления в камерах сгорания, очевиден [2, 12]. Введение в смеси на основе рассматриваемых окислителей металлического горючего

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НА ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НИТРАТ АММОНИЯ

(как правило, порошка алюминия) приводит к увеличению энергомассовых характеристик смесей и скорости горения, улучшает показатели воспламеняемости смесей, но сопровождается появлением новых механизмов потерь - за счет агломерации алюминия и его не догорания. Особую важность эти процессы приобретают для составов на основе нитрамина и НА, имеющих низкие значения скорости горения, адиабатической температуры пламени T_f и температуры поверхности конденсированной фазы при горении [2, 12]. Это обусловлено наличием окисной пленки, имеющей высокие значения температуры плавления (~2000 К – для окиси алюминия) и реализацией диффузионного механизма окисления металла. Введение в составы на основе рассматриваемых окислителей ультрадисперсных порошков металлов приводит к значительному увеличению их скорости горения и, как следствие, к снижению потерь на агломерацию алюминия на горячей поверхности [7, 12, 10]. При этом необходимо учитывать, что введение алюминия в составы с НА в качестве окислителя более эффективно, чем в составах на основе ПХА, из-за меньшей молекулярной массы продуктов сгорания. Наиболее изученными в плане закономерностей горения являются КС на основе ПХА и органических горючих (типа НТРВ) с добавками ультрадисперсных порошков металлов [2,11,12]. С учетом изложенного, выглядит целесообразным провести экспериментальный анализ параметров горения КС на основе НА с добавками ультрадисперсных порошков металлов и катализаторов скорости горения с целью изучения особенностей и оценки эффективности их применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как определено выше, рассматривается горение базовой смеси на основе углеводородного ГСВ, нитрата аммония, и порошка микронного алюминия и анализируются влияние на параметры ее горения при замене крупного алюминия на УДП-Ал, а также, катализ горения ультрадисперсными порошками металлов и некоторых неорганических веществ (таблица 1).

Выбор катализаторов скорости горения определен с одной стороны рядом энергетической эффективности (теплота сгорания металлов в кислороде) при горении добавок [2, 11], а, с другой стороны, каталитической активностью сажи и хлоридов металлов при

термическом разложении и горении НА. Выбор хлорида олова определялся наблюдаемым его влиянием на процессы окисления УДП-Ал [9]. Ионы хлора рассматриваются в качестве наиболее эффективных катализаторов термического разложения НА [8].

Таблица 1
Шифры и состав смесей

№ смеси	Наименование и содержание компонентов				
	НА, %	ГСВ, %	АСД-6, %	УДП-Ал, %	Добавка, %
1	72	13	15		-
2	72	13	-	15	-
3	72	13	-	-	15% AlB_2 (*)
4	72	13	15	-	УДП-Ал, 2%
5	72	13	15	-	УДП-Сu, 2%
6	72	13	15	-	УДП-Ni, 2%
7	72	13	15	-	УДП-Fe, 2%
8	72	13	15	-	УДП-B, 2%
9	72	13	15	-	Сажа, 2%
10	72	13	15	-	$SnCl_2$, 2%
11	72	13	-	15	$SnCl_2$, 2%
12	85	15	-	-	$SnCl_2$, 2%

Примечание. (*) - ультрадисперсный алюминий, стабилизированный диборидом алюминия

Прежде всего, необходимо отметить, что некатализованные смеси с АСД-6 начинают устойчиво воспламеняться и гореть при давлениях 3...4 МПа. Замена АСД-6 на УДП-Ал или катализ смесей с АСД-6 ультрадисперсными порошками металлов приводит к снижению критического давления воспламенения и устойчивого горения смесей до 0,5-2,0 МПа. Добавка к смесям на основе УДП-Ал хлорида олова и ультрадисперсной сажи приводит к устойчивому горению в атмосфере азота образцов при давлении 0,1 МПа - для хлорида олова и при давлении 0,2...0,5 МПа - для сажи. На нижних пределах горения по давлению на месте образцов остаются шлаки в виде пористого тела, состоящего из крупных алюмосодержащих сферических образований и сажи. Масса шлаков практически совпадает с массой остатков при низкотемпературном разложении образцов в условиях ДТА и составляет величину ~18...26% начальной массы образцов. Размер частиц агломератов, собранных в камере сгорания,

достигает 2...3 мм в диаметре - для смесей на основе АСД-6. Увеличение скорости горения смесей за счет использования УДП-АI, катализаторов и при увеличении давления приводит к монотонному уменьшению массы шлаков и размеров агломератов - до 0,5...1,0 мм. Для дальнейшего анализа шлакообразования необходимо рассмотреть зависимости скорости горения смесей от давления.

На рис.1 приведены зависимости скорости горения от давления смесей на основе АСД-6 (№1) и УДП-АI (№2) с хлоридом олова и без (смеси №10 и №11 соответственно). Результаты определения массы шлаков от давления, отнесенной к начальной массе образцов при сжигании этих смесей, приведены в таблице 2.

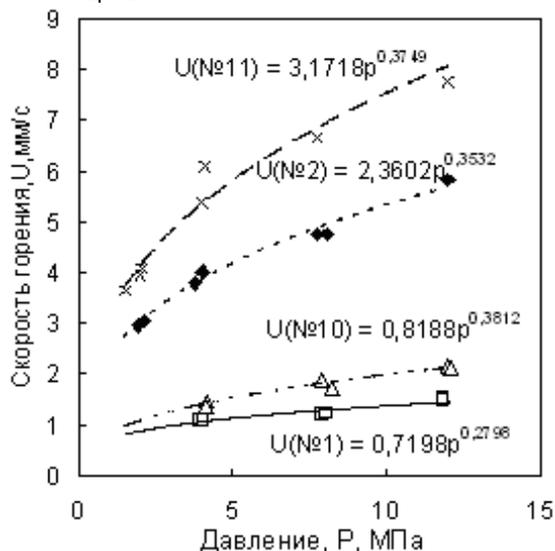


Рис.1. Зависимость скорости горения смесей от давления: ◆ U(№2) □ U(№1) ▲ U(№10) × U(№11)

Таблица 2
Влияние давления (скорости горения) на массу шлаков

P, МПа	Относительная масса шлаков, %, для смесей			
	№1	№2	№10	№11
0,1	-	-	-	26
2	-	21	-	20
4	12,6	18	12,3	8
8	9,3	9	10,3	4
12	4,7	1	6,7	3,5

Приведенные результаты показывают, что введение ультрадисперсного алюминия вместо АСД-6 в 4...5 раз увеличивает скорость горения смесей при некотором увеличении показателя ν . Хлорид олова катализирует смеси как с АСД-6, так и с УДП-АI. При

этом он более эффективен для смесей на основе УДП-АI, в том числе и в плане резкого уменьшения критического давления горения образцов. Значимые эффекты в снижении массы шлаков также наблюдаются при совместном использовании в смесях УДП-АI и SnCl₂. Необходимо отметить, что в смесях с АСД-6 введение SnCl₂ привело к увеличению значения ν , в то время, как значение В практически не изменилось, что позволяет говорить о влиянии этой добавки в газовой фазе. В смесях с УДП-АI наоборот - ν практически не изменяется, а параметр В в законе скорости горения увеличился в 1,4 раза, что говорит о смещении реакции с участием хлорида олова в конденсированную фазу. Косвенным подтверждением этому служит уменьшение массы шлаков и снижение критического давления. В целом эти результаты подтверждают данные других работ по взаимодействию УДП-АI с SnCl₂ в процессах окисления первого [9].

На рисунке 2 приведены данные по влиянию неметаллических ультрадисперсных добавок бора и сажи на зависимости скорости горения смесей с АСД-6. Выбор этих добавок обусловлен тем, что они имеют более высокие значения теплоты сгорания, чем алюминий, и существенно отличающиеся другие физико-химические свойства [11].

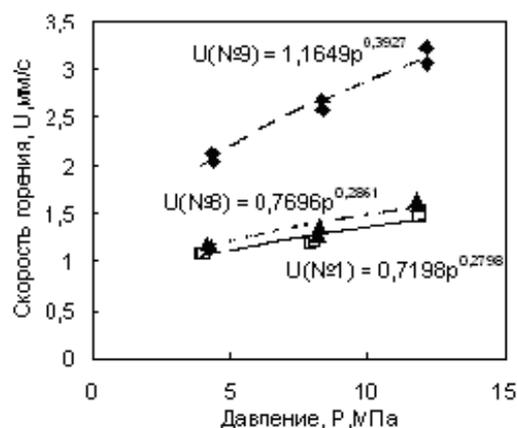


Рис.2. Зависимость скорости горения смесей от давления: ◆ U(№9) □ U(№1) ▲ U(№8)

Ультрадисперсный бор незначительно увеличил скорость горения базовой смеси, в то время, как сажа привела к увеличению скорости горения практически в 2 раза во всем интервале давлений как за счет увеличения величины В, так и за счет увеличения показателя ν . Для смесей с сажой наблюдается уменьшение величины нижнего предела по давлению воспламенения и горения смесей.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НА ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НИТРАТ АММОНИЯ

Результаты определения массы шлаков, таблица 3, при горении рассматриваемых смесей показывают, что введение бора несколько увеличило массу шлаков, что может быть связано с низкой температурой и малой скоростью горения смеси, приведшими к связыванию бора в конденсированной фазе. В свою очередь, сажа, как катализатор разложения и горения НА, дающая газообразные продукты горения, практически в 1,5 раза уменьшила величину массы шлаков. Последнее, по-видимому, не может быть объяснено только ростом скорости горения (см. рис. 2, табл.2).

Катализу металлами смесей на основе различных окислителей посвящено большое количество работ. Однако, как ясно и из приведенных выше результатов, применение ультрадисперсных порошков вносит определенную специфику в масштаб каталитических эффектов.

Таблица 3
Влияние давления (скорости горения) на массу шлаков

P, МПа	Относительная масса шлаков, %, для смесей		
	№9	№1	№8
0,1	Не определялась		
2	Не определялась		
4	7,63	12,6	17,6
8	6	9,3	14,3
11	4,3	4,7	

В качестве объектов исследования, как сказано выше, выбраны ультрадисперсные металлы, являющиеся наиболее важными компонентами катализаторов горения смесей на основе НА и ПХА.

На рисунке 3 приведены сводные данные по зависимости скорости горения смесей на основе АСД-6, катализированных рассматриваемыми металлами. Наибольшей каталитической активностью обладают ультрадисперсные порошки меди и алюминия-увеличение скорости горения за счет роста величины V при практически постоянном значении показателя ν . Менее эффективно железо. Никель увеличивает величину V при одновременном снижении в ~ 2 раза значения показателя ν . При этом можно говорить, что УДП-Ni катализирует горение смесей на основе АСД-6. Ряд активности ультрадисперсных металлов-катализаторов скорости горения следующий (уменьшение активности):

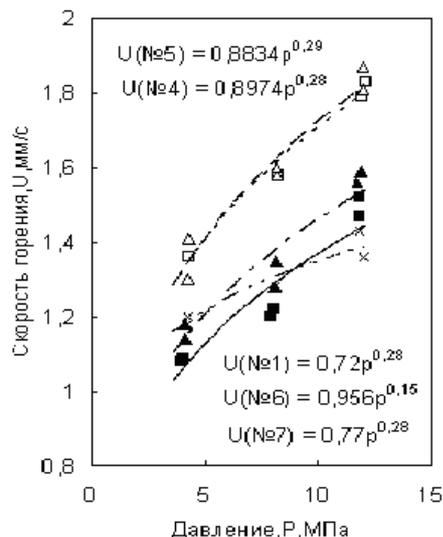


Рис.3. Зависимость скорости горения смесей от давления: □ U(№4) △ U(№5) × U(№6) ■ U(№1) ▲ U(№7)

Полученный ряд каталитической активности ультрадисперсных порошков металлов в целом совпадает с рядом их активности в смесях ПХА, углеводородное ГСВ типа БК, АСД-4 [13]. Ультрадисперсный бор по каталитической эффективности практически идентичен УДП-Fe. Наиболее сильным катализатором горения рассматриваемой базовой смеси является ультрадисперсная сажа.

Значимых изменений в массу шлаков, рассматриваемые металлы не внесли, таблица 4. Исключение составляет УДП-Al, увеличивающий массу шлаков практически во всем интервале давлений. Масса шлаков для рассматриваемых смесей определялась при давлениях выше 3,5 МПа, что связано с плохой воспроизводимостью результатов при более низких давлениях, обусловленной их близостью к предельным по устойчивости воспламенения и горения.

Таблица 4
Влияние давления (скорости горения) на массу шлаков

P, МПа	Относительная масса шлаков, %, для смесей				
	№1	№4	№5	№6	№7
4	12,6	15,3	12,3	13	13,3
8	9,3	10,6	9	6,67	8,3
12	4,7	8,3	5,3	4,67	5

В плане анализа представленных данных и для оценки влияния «стабилизирующих» УДП-Al добавок целесообразно сравнить эффективность порошка УДП-Al исходного и стабилизированного диборидом алю-

миния. Добавка УДП-В несколько увеличила скорость горения базовой смеси с АСД-6 как за счет увеличения значения V , так и за счет роста показателя ν . Аналогичные эффекты наблюдаются и при сравнении горения смесей с УДП-А1 стабилизированного диборидом алюминия, рис. 4.

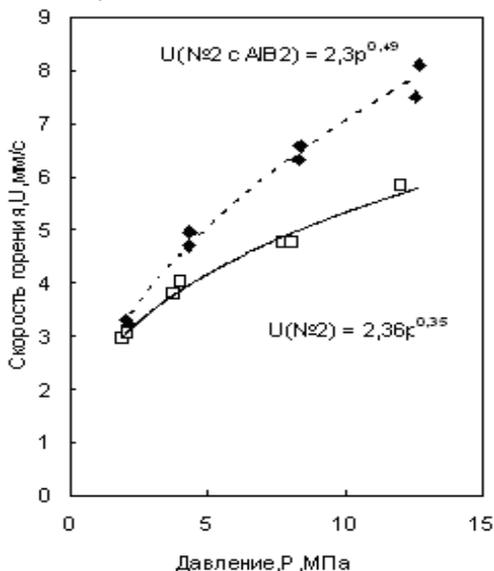


Рис.4. Зависимость скорости горения смесей от давления: \blacklozenge $U(N\#2$ - с AlB_2) \square $U(N\#2)$

Достаточно сильный каталитический эффект, сравнимый с эффектом введения в смесь хлорида олова, от введения в смесь диборида алюминия требует дополнительного анализа. Наблюдается определенное снижение массы шлаков в сравнении с их количеством для исходной смеси и смеси на основе УДП-А1, таблица 5.

Таблица 5
Влияние давления (скорости горения) на массу шлаков

P, МПа	Относительная масса шлаков, %, для смесей		
	№2	№1	№2+AlB2
0,1	Не определялись		
2	21		19,6
4	18	12,6	9
8	9	9,3	6
11	1	4,7	2

Микроскопический анализ агломератов показал, что полная замена микронного алюминия в смесях на ультрадисперсные порошки приводит к резкому уменьшению их размеров. Результаты компонентного анализа состава агломератов, их распределение по размерам, а также данные термического ана-

лиза смесей методами ДТА-ТГА будут приведены в следующем сообщении.

В таблице 1 приведена рецептура базовой смеси без АСД-6. Целью включения данной смеси в проводимый анализ была оценка влияния алюминия на скорость горения смесей и образование шлаков. Как отмечено выше, введение в КС металлического горючего (порошка алюминия, как правило) приводит к существенному увеличению их энергомассовых характеристик. Для смесей на основе таких окислителей, как ПХА и нитрамин, наблюдается увеличение скорости их горения при введении металлических горючих. Как правило, в качестве сопутствующего эффекта наблюдается уменьшение показателя ν в законе скорости горения [1, 2, 7]. На рисунке 5 приведено сравнение зависимости скорости горения от давления смесей №10 и №12. Смесь №12 без хлорида олова не горит вплоть до давлений 4...6 МПа. Полученные результаты - увеличение скорости горения, уменьшение показателя ν - в целом соответствуют результатам, полученным на смесях с другими окислителями.

Определение массы шлаков при горении смеси №12 показало, что только при давлении $p=4$ МПа наблюдается образование незначительного количества шлаков в виде редкой пространственной сетки из сажи. Масса шлаков не превышает 0,2...0,3% от начальной массы образца. При более высоких давлениях в камере сгорания измеримых количеств шлаков не образуется.

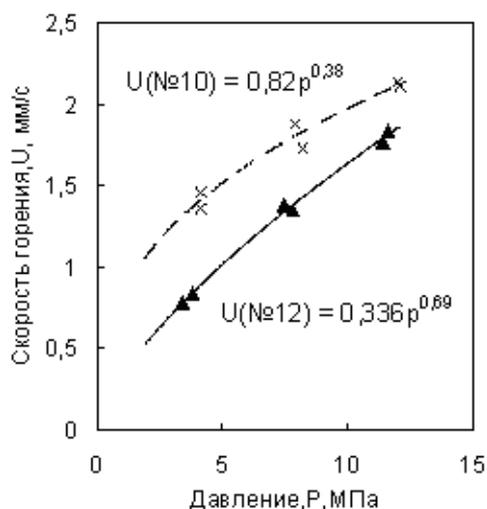


Рис. 5. Зависимость скорости горения смесей от \blacktriangle $U(N\#12)$ \times $U(N\#10)$

Полученные результаты показывают, что использование ультрадисперсных порошков металлов, как для полной замены крупнодис-

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ НА ГОРЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НИТРАТ АММОНИЯ

персных порошков алюминия, так и в качестве катализаторов горения позволяет существенно увеличить скорость горения КС на основе НА. Кроме этого, совместное использование УДП-АI и хлорида олова (SnCl_2) позволяет снизить нижний предел по давлению воспламеняемости и горения рассматриваемых КС до 0,1 МПа, с возможностью снижения показателя в законе скорости горения. Применительно к КС на основе углеводородного ГСВ, НА и АСД-6 построен ряд каталитической активности ультрадисперсных добавок металлов и неметаллов- в порядке снижения активности: УДП-сажа > (УДП-АI ~ УДП-Cu) > (УДП-Fe ~ УДП-B) > УДП-Ni. Показано, что замена АСД-6 на УДП-АI, стабилизированный диборидом алюминия, более эффективна, чем использование УДП-АI, как в плане катализа горения, так и в плане снижения массы шлаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимнат И. Ракетные двигатели на химическом топливе. – М.: Мир, 1990. – 294 с.
2. Energetic Materials. Particle Processing and Characterization. Edited by Ulrich Taipel. WILEY-VHC Verlag, 2005.
3. Бабук В.А., Глебов А.А., Долотказин И.Н. Особенности агломерационного процесса при горении топлив на основе нитрата аммония // Сб. трудов Четвертой Международной школы конференции «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». – Санкт-Петербург, 2004. – С.23.
4. Valery A. Babuk, Viacheslav A. Vasilyev, Andrey A. Glebov, and Ilya N. Dolotkazin, Marco Galeotta, Luigi T. DeLuca. Combustion mechanism of AN-based aluminized propellants // Novel energetic materials and applications: L. Galfetti and R.N. Pescerodrigues, Book of Proceedings of the 9-IWCP held in Lerici, La spezia, Italy, 14-18 September 2003, Milan, 2003 (in Press).
5. Клякин Г.Ф. Разработка концепции и основных направлений фазовой стабилизации нитрата аммония как окислителя экологически чистых высокоэнергетических конденсированных систем // НЕМs-2004: Тр. Международной конф. Белокураха. – 2004. – С. 67.
6. Нечипоренко Н., Головина Н.И., Шилов Г.В. и др. Применение сокристаллизатов нитрата аммония как способ устранения фазовых переходов в кристаллической решетке нитрата аммония // НЕМs-2004: Тр. Международной конф. Белокураха. – 2004. – С.152.
7. Де Лука Л. Т., Галфетти Л., Северини Ф. и др. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т.41. – №6. – С. 80–94.
8. Манелис Г.Б., Назин Г.М., Рубцов Ю.И. и др. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ и порохов. – М: Наука, 1996. – С.223.
9. Громов А.А., Попенко Е.М., Сергиенко А.В. и др. Закономерности нитридообразования при горении сверхтонких порошков алюминия в воздухе. 1.Влияние добавок // Физика горения и взрыва. –2005. –Т.41. – № 3. –С.74–85.
10. Попок В.Н. Горение высокоэнергетических систем, содержащих наноалюминий // Сб. материалов II Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем». –Томск, 2006. – С. 451.
11. Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. – М: Наука, 1967. –С.225.
12. Beckstead M.W. Solid propellant combustion mechanisms and flame structure // Appl. Chem. – Vol. 65. – 1993. – No. 2. – Pp. 297–307.
13. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Савельева Л.А. Влияние дисперсности добавок металлов на скорость горения смесевых композиций // Химическая физика. – 2004. –Т.23. – № 9. –С.18–21.