

УДК 535.71

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОСЛОЙНОГО ГОРЕНИЯ В СМЕСЯХ АММИАЧНОЙ СЕЛИТРЫ С АЛЮМИНИЕМ И ЕГО ПЕРЕХОД В КОНВЕКТИВНОЕ

© 2024 г. В. Е. Храповский^{1*}, В. Г. Худавердиев^{1,2}, А. А. Сулимов¹,
П. В. Комиссаров¹, С. С. Басакина¹¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия²Институт радиационных проблем Министерства науки и образования Азербайджанской
Республики, Баку, Азербайджан

*E-mail: khrapovsky@mail.ru

Поступила в редакцию 17.07.2023

После доработки 14.11.2023

Принята в печать 20.11.2023

Изучалось возникновение послойного горения и переход его в конвективное в смесях аммиачной селитры с алюминием насыпной плотности. Эксперименты проводились в манометрической бомбе с регистрацией давления. Пористость образцов составляла 0.55–0.59, размер частиц селитры 20–40 и 250–630 мкм, содержание алюминия изменялось от 8% до 47%. Использовался алюминий двух марок: сферический АСД-4 и чешуйчатый ПАП-2. Показано, что поджигание смесей происходит при давлении воспламенителя, близком к пороговому (минимальному) значению или выше него. Измерены величины порогового давления при различных размерах частиц аммиачной селитры, для разных марок и концентраций алюминия. Определены значения давления и времени, при которых возникают послойный и конвективный режимы горения. Показано, что замена алюминия АСД-4 на ПАП-2 приводит к существенному (на порядок и более) уменьшению порогового давления и давлений, при которых начинаются послойный и конвективный режимы горения.

Ключевые слова: послойное горение, конвективное горение, аммиачная селитра, алюминий, пороговое давление воспламенителя.

DOI: 10.31857/S0207401X24080109

ВВЕДЕНИЕ

Длительное время считалось, что аммиачная селитра (АС) является безопасной при хранении. Однако многочисленные аварии при ее производстве и хранении, сопровождающиеся переходом горения во взрыв, начиная с 1916 г. в Нью-Джерси (США) и в последнее время – в 2020 г. в Бейруте (Ливан) и в 2022 г. в Уинстон Сейдем (США) [1, 2] – свидетельствуют об обратном. Известно [3], что начальной стадией развития взрыва в энергетических порошкообразных составах является переход послойного горения (ПГ) в конвективное (КГ). Интенсивные исследования этого процесса, результаты которых описаны в работах [3, 4], проводились в 1960–1970 гг. на инициирующем ВВ (гремячая ртуть), бризантных ВВ (тротил, тэн, гексоген и др.) и на смесевых составах на основе перхлоратов аммония и калия. Сжигание осуществлялась обычно в манометрических

бомбах. Размер используемых частиц варьировался от 5–20 до 500 мкм, удельная площадь поверхности – от 0.05–0.07 до 0.7–1 м²/г. Диаметр изучаемых образцов составлял 5–10 мм, высота – 40–70 мм, пористость изменялась от 3 до 50%, газопроницаемость – от 10^{–5} до 10^{–3} Дарси (1 Дарси ≈ 1 мкм²). Боковая поверхность и нижний торец образцов были забронированы. Воспламенение верхнего торца осуществлялось либо нихромовой проволокой, либо продуктами сгорания навески дымного ружейного пороха, создававшей небольшое начальное давление. Его регистрация проводилась с помощью пьезокварцевых или тензометрических датчиков давления обычно на шлейфовых осциллографах с частотой не более 15 кГц. В отдельных опытах одновременно с записью давления осуществлялась оптическая съемка процесса через прозрачные окна манометрической бомбы. На начальной стадии

заряды горели в послойном режиме. Скорость нарастания давления в бомбе составляла 0.01–1.0 МПа/мс. При переходе горения в конвективный режим она возрастала в несколько раз. В качестве основной характеристики, определяющей возникновение конвективного горения, была принята величина критического давления срыва послойного горения (P_c): значение давления на стадии послойного горения образца, при котором темп его нарастания начинал резко увеличиваться (в 3–7 и более раз). Установлено, что величина P_c зависит от состава, пористости, газопроницаемости, диаметра и длины заряда, а также от размера используемых частиц. Была проведена классификация различных ВВ по степени их устойчивости, выявлено влияние плавления и начального заполнения пор азотом на величину давления срыва.

В работе [5] показана возможность перехода послойного горения в конвективное при низких давлениях (0.5–0.7 МПа) на образцах, спрессованных из гранул семиканального пироксилинового пороха марки 5/7 с плотностью 1.34–1.47 г/см³ (пористостью 7–15%). Установлено, что покрытие гранул по боковой поверхности пленкой поливинилбутирала толщиной ~35 мкм приводит к увеличению длительности послойного горения и снижению величины P_c . Результаты исследований возникновения и развития конвективного режима горения и его перехода во взрывной процесс в смесях аммиачной селитры с углем и алюминием насыпной плотности описаны в работах [6–9]. Опыты проводились в манометрической бомбе и в щелевых оболочках с одновременной оптической регистрацией процесса и измерениями давления. Изучалось влияние величины давления, создаваемого воспламенителем, начальной высоты заряда, размера частиц и массовых долей окислителя и горючего на интенсивность подъема давления в смеси и скорость распространения процесса. Было введено понятие порогового давления воспламенителя (P_{ii}) как минимального, при котором осуществляется воспламенение смеси. Определены величины P_{ii} для смесей аммиачной селитры с углем. Построена его зависимость от концентрации угля при разных размерах частиц нитрата аммония: 20–40 и 250–630 мкм. Отмечено существование порогового давления для смесей аммиачной селитры с алюминием марки АСД-4, однако его значения не приводятся. В работе [10] приведены результаты

численного моделирования роста давления при переходе конвективного горения смесей на основе аммиачной селитры в детонацию. Полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными. Строились пространственные профили давления и объемной доли к-фазы в разные моменты времени в зарядах различной длины.

Следует отметить, что в работах [6–10] основное внимание уделялось исследованию перехода конвективного горения в детонацию. Условия, при которых начинается послойное горение (до или после сгорания воспламенителя), значения величин давления и времени, при которых происходит его протекание, длительность его развития, интенсивность изменения давления не определялись. Также не определялись значения давления P_c и времени t_c срыва послойного горения. Однако вышеперечисленные параметры необходимо знать как для понимания критических условий, при которых происходит смена режима горения, так и для более точного моделирования обсуждаемых процессов.

Цель данной работы состояла в изучении закономерностей возникновения и развития послойного и конвективного горения в смесях аммиачной селитры с алюминием. Задача исследования заключалась в измерении кривых зависимости $P_c(t_c)$ в манометрической бомбе при горении смесей разных составов, их анализе, определении порогового давления воспламенителя, его влияния на значения давления и времени, при которых начинается послойное горение и происходит его переход в конвективное.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились в манометрической бомбе объемом ~100 см³, схема которой приведена на рис. 1. Использовалась аммиачная селитра производства французской фирмы Grande Paroisse Company, Total Fina Elf Group, при применении которой произошел аварийный взрыв на заводе AZF в г. Тулуза (2001 г.). Аммиачная селитра представляла собой пористые сферические гранулы со средним размером 1–2 мм. Ее гравиметрическая плотность составляла в среднем 700 кг/м³, а максимальная (ρ_{max}) – 1.725 кг/м³. Гранулы измельчались. Применялись две фракции селитры с размерами частиц (d_{AC}) 20–40 и 250–630 мкм. Величина удельной площади поверхности АС ($S_{уд AC}$), рассчитанная по формуле

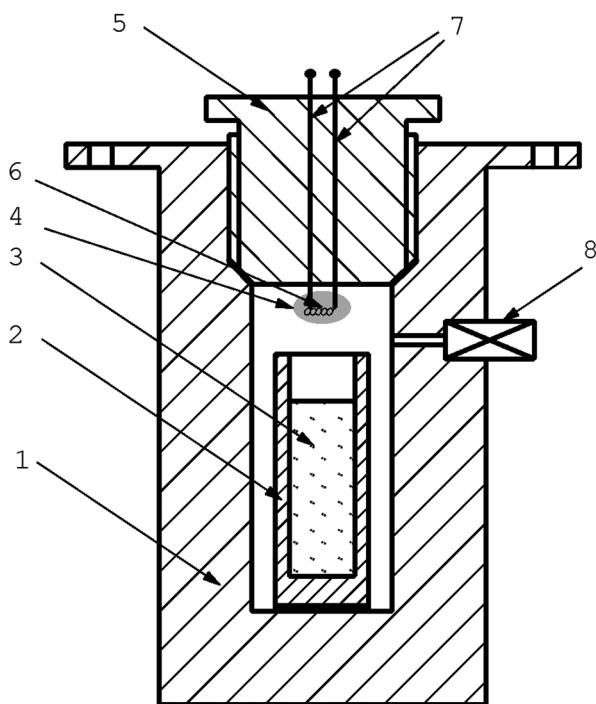


Рис. 1. Схема манометрической бомбы: 1 – стенки бомбы, 2 – металлический стаканчик, 3 – исследуемый состав, 4 – воспламенитель, 5 – крышка бомбы, 6 – нихромовая спираль, 7 – электрические вводы, 8 – датчик давления.

$$S_{\text{уд АС}} = 6/d_{\text{АС}} \rho_{\text{max}}, \quad (1)$$

составляла 0.09–0.17 и 0.006–0.014 м²/г соответственно. Перед смешиванием АС тщательно сушилась до прекращения потери веса.

Использовались следующие марки алюминия: АСД-4 со средним размером сферических частиц ~2–8 мкм и удельной поверхностью $S_{\text{уд АСД-4}} \sim 0.4$ –0.6 м²/г [11]; ПАП-2 с чешуйчатыми частицами толщиной свода ~0.12–0.16 мкм и линейными размерами от 10–20 до 50–100 мкм. Его удельная поверхность $S_{\text{уд ПАП-2}}$ составляла ~1 м²/г [12].

Селитра и алюминий тщательно перемешивались в нужной пропорции. Смесь порционно насыпалась в канал 2 (рис. 1) металлического стаканчика диаметром 16 мм и глубиной 65 мм. Высота смеси 3 составляла 48–50 мм, масса – 7.1 г, пористость – 55–59%. Стаканчик с образцом располагался внутри манометрической бомбе объемом ~100 см³.

Поджигание смеси осуществлялось воспламенителем 4 (рис. 1), расположенным на крышке бомбы 5. В качестве основного состава использовался измельченный дымный ружейный порох

(ДРП-3) с размером частиц меньше 50 мкм и весом 0.5 г. Порох поджигался нихромовой спиралью 6, подсоединенной к изолированным от крышки электрическим вводам 7, и создавал в объеме давление $P_i \sim 0.8$ МПа. Регулирование величины P_i осуществлялось за счет сжигания совместно с основным воспламенителем дополнительных навесок смеси пороха марки ДРП-3 с тонкосводным пироксилиновым порохом марки “Сокол” в равных долях. Зазоры между крышкой бомбы с ее стенками и с электрическими вводами тщательно уплотнялись для исключения протечек, образующихся в опытах продуктов сгорания. Регистрация изменения давления от времени осуществлялась пьезокварцевыми датчиками 8 марки Т-6000 с частотой дискретизации сигнала 200 кГц. Интервал времени от момента окончания приготовления смеси до проведения опыта составлял около 30 мин. Погрешность измерения давления не превышала 5–8%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследуемые составы начинали гореть в послойном режиме, если давление воспламенителя равнялось или превышало некоторое пороговое значение P_{it} . После его достижения (точка I_{it} с координатами P_{it} , t_{it} , кривая 1 рис. 2) давление сначала снижалось из-за охлаждения продуктов сгорания воспламенителя стенками манометри-

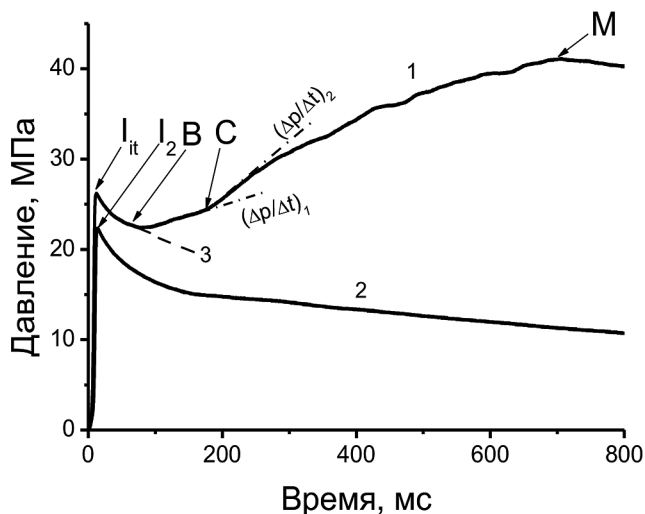


Рис. 2. Характерные записи изменения давления во времени в манометрической бомбе при горении смеси 92 вес.% NH_4NO_3 + 8 вес.% АСД-4 при давлении воспламенителя, близком к пороговому – кривая 1 (опыт № 695), ниже порогового – кривая 2 (опыт № 693); 3 – кривая, аппроксимирующая спад давления от сгорания воспламенителя.

Таблица 1. Значения давлений и времен возникновения послойного и конвективного горения в смесях нитрата аммония с алюминием разного состава

№ опыта	Марка алюминия	Размер частиц селитры d_{AC} , мкм	Состав смеси NH_4NO_3/Al , вес. %	P_{ii} , МПа	t_{ii} , мс	P_b , МПа	t_b , мс	P_c , МПа	t_c , мс	t_d , мс	$(\Delta p/\Delta t)_1$, МПа/мс	$(\Delta p/\Delta t)_2$, МПа/мс
695	АСД-4	20–40	92/8	26.2	12.2	24.7	57.1	24.7	187	130	0.024	0.060
661			82/18	11.4	9	8.6	206	9.4	320	114	0.02	0.053
669			53/47	1.6	10	0.59	375	1.4	2431	2056	0.0005	0.005
692		250–630	92/8	21.6	10.6	17.1	102	17.4	281	179	0.012	0.041
687			69/31	4.1	18	1.4	703	1.3	3250	2547	0.000	0.00013
690			53/47	1.5	20	0.97	120	1.6	1300	1189	0.00069	0.00024
711	ПАП-2	20–40	82/18	0.95	7	0.95	7	0.95	24	17	0.000	0.02

ческой бомбы и металлического стаканчика, а также их фильтрации в поры образца. Возникновение горения смеси приводило к изменению зависимости $p(t)$ от спадающей на возрастающую. Для определения значений давления P_b и времени t_b , при которых начиналось послойное горение, проводилась экстраполяция кривой снижения давления воспламенителя (штриховая кривая 3) до момента изменения темпа нарастания давления на кривой 1 (точка С). За возникновение ПГ принимался момент, соответствующий точке В с координатами P_b , t_b , после которого происходило отклонение реальной кривой от экстраполированной. Такое отклонение свидетельствует об увеличении давления за счет дополнительного поступления газов и тепла от горения смеси. После возникновения послойного горения давление в бомбе еще некоторое время снижалось до достижения локального минимума. Дальнейшее развитие ПГ происходило в условиях нарастающего давления с разными интенсивностями его подъема $(\Delta p/\Delta t)$. При анализе записей $p(t)$ измерялось среднее значение скорости его роста на начальной, $(\Delta p/\Delta t)_1$, и последующей стадиях, $(\Delta p/\Delta t)_2$. Согласно проведенным ранее исследованиям [3, 4], принималось, что повышение $\Delta p/\Delta t$ связано с переходом послойного горения в конвективное. Определялись значения давления P_c и времени t_c (точка С), при которых начиналось заметное (в 3 и более раза) увеличение интенсивности роста давления. По значениям времен начала послойного (t_b) и конвективного (t_c) горения рассчитывалась длительность протекания послойного горения (от точки В до точки С) как разница между ними: $t_d = t_c - t_b$.

За счет распространения конвективного режима и догорания образующейся взвеси давление

повышалось до максимального значения, после которого начинало снижаться из-за уменьшения поверхности горения и охлаждения образовавшихся продуктов. Определялись величина максимального давления P_m и время его достижения t_m (точка М).

При давлении воспламенителя ниже порогового (точка I_2 , кривая 2 рис. 2) послойного и конвективного горения не возникало. Давление только снижалось из-за охлаждения продуктов сгорания. Смесь уплотнялась и частично разлагалась.

В статье приводятся результаты определения P_{ii} , которые были получены для каждого состава в результате нескольких экспериментов с разными навесками воспламенителя. Исследовалось влияние концентрации алюминия, его марки, размера частиц аммиачной селитры на величину порогового давления воспламенителя P_n , значения давлений P_b , P_c и времен t_b , t_c , при которых возникают послойный и конвективный режимы горения. Определялась интенсивность нарастания давления при их протекании, которая зависела от состава смеси. В отдельных случаях ее изменение при переходе послойного горения в конвективное происходит не так резко, как показано на рис. 2. Критерием для перехода ПГ в КГ служило увеличение отношения $(\Delta p/\Delta t)_2$ к $(\Delta p/\Delta t)_1$ в 2.5 и более раза.

Влияние содержания алюминия изучалось в смесях АСД-4 с обеими фракциями аммиачной селитры. Повышение концентрации алюминия с 8 до 47 вес. % позволило на порядок и более (с 26.2 до 1.6 МПа при $d_{AC} = 20-40$ мкм и с 21.6 до 1.5 МПа при $d_{AC} = 250-630$ мкм) снизить величину порогового давления воспламенителя (табл. 1). При этом понижались значения P_b , увеличивались величины t_b , при которых начиналось ПГ, уменьшалась интенсивность подъема давления $(\Delta p/\Delta t)_1$

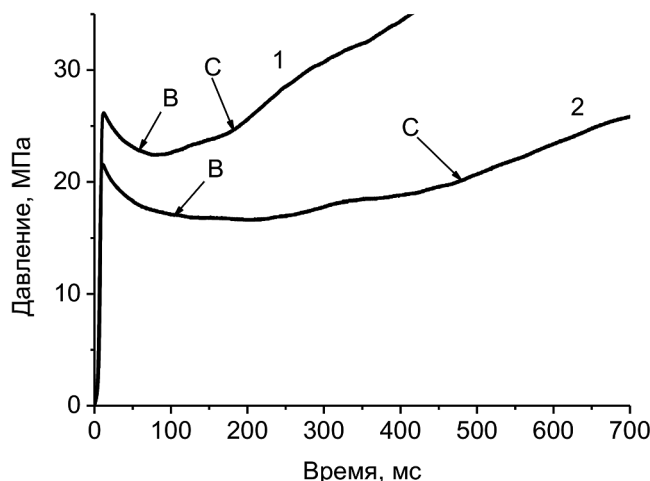


Рис. 3. Диаграммы “давление–время” в манометрической бомбе для смесей 92 вес.% АС + 8 вес.% АСД-4 при следующих размерах частиц АС: 1 – 20–40 мкм (опыт № 695); 2 – 250–630 мкм (опыт № 692).

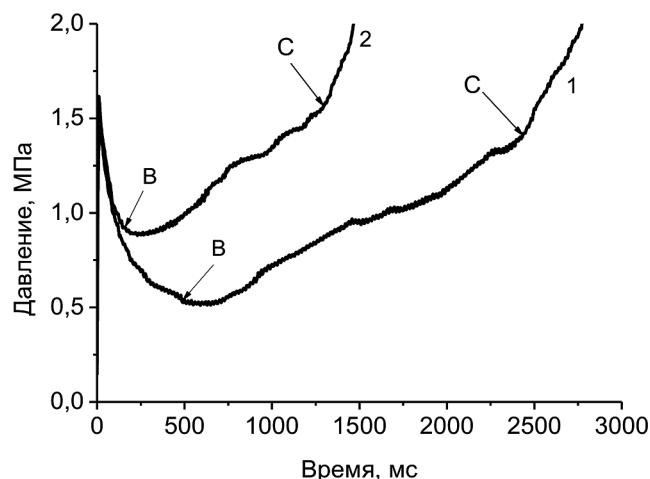


Рис. 4. Записи “давление–время” манометрической бомбе для смесей 47 вес.% АСД-4 + 53 вес.% АС с размерами частиц АС, равными 20–40 мкм (кривая 1, опыт № 669) и 250–630 мкм (кривая 2, опыт № 690).

при его развитии. Конвективное горение началось при давлениях P_c , близких или превышающих значения P_b . Скорость нарастания давления $(\Delta p/\Delta t)_2$ в большинстве опытов снижалась. Отклонение от описанной выше тенденции наблюдалось для состава с размером частиц аммиачной селитры $d_{AC} = 250\text{--}630$ мкм и содержанием алюминия марки АСД-4, равным 31 вес.% (опыт № 687). В этом случае послойное горение протекало при давлении, близком к постоянному, и длительнее. Возможно, это связано с неустойчивым развитием процесса. В параллельном опыте с этой смесью и таким же значением P_{it} послойный и конвективный режимы горения не возникли.

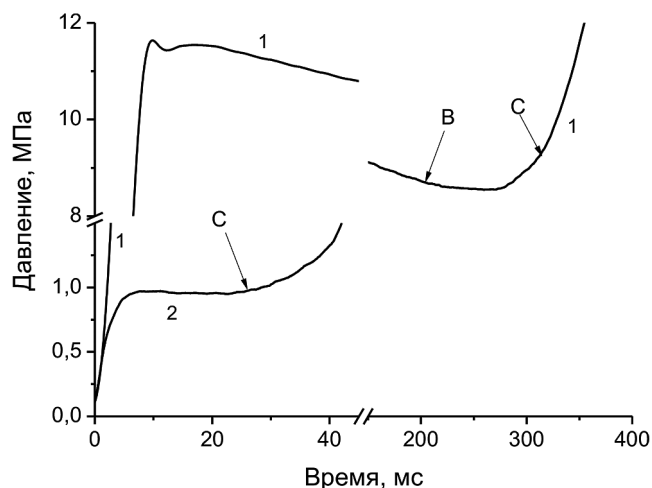


Рис. 5. Изменение зависимости давления от времени при сгорании смесей 18 вес.% АСД-4 + 82 вес.% АС (кривая 1, опыт № 661) и 18 вес.% ПАП-2 + 82 вес.% АС (кривая 2, опыт № 711).

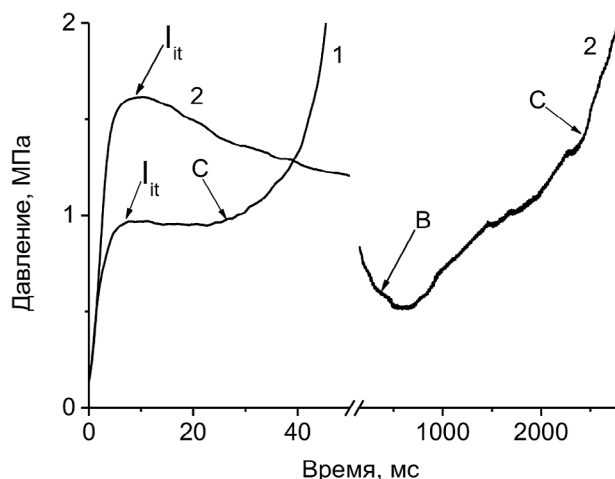


Рис. 6. Записи давления время в манометрической бомбе при сгорании смесей, содержащих 18 вес.% ПАП-2 + 82 вес.% АС (кривая 1, опыт № 711) и 47 вес.% АСД-4 + 53 вес.% АС (кривая 2, опыт № 669). Размер частиц АС равен 20–40 мкм.

Влияние размера частиц аммиачной селитры исследовалось для смесей с алюминием марки АСД-4. Увеличение размера частиц окислителя привело к снижению пороговых значений давления воспламенителя, что связано с повышением газопроницаемости образцов [3]. Однако условия, при которых начинаются послойное и конвективное горение, длительность протекания послойного горения, темп нарастания давления для смесей с разным размером частиц, зависели от содержания алюминия в смеси.

При концентрации АСД-4 8 вес.% использование крупных частиц селитры привело к сниже-

нию давления P_b , увеличению времени t_b , при котором началось послойное горение (точка B на кривой 2 рис. 3, табл. 1 — опыты № 695 и № 692), и повышению длительности t_d его протекания. Послойное горение развивалось с меньшей скоростью подъема $(\Delta p/\Delta t)_1$. Снизились давление P_c , при котором возникло конвективное горение (точка C), и интенсивность нарастания $(\Delta p/\Delta t)_2$ при его распространении.

При увеличенном до 47 вес.% содержании АСД-4 в образцах с крупными частицами АС послойное горение началось раньше при большем значении P_b (точка B на кривой 2 рис. 4, табл. 1 — опыты № 690 и № 669). Его развитие протекало быстрее и сопровождалось увеличенной скоростью подъема давления. Конвективное горение (точка C) возникло примерно при таком же давлении P_c , что для смеси с мелкими частицами, но при меньшем времени t_c .

Влияние марки алюминия на развитие горения изучалось при его концентрации в смеси 18 вес.% и размере гранул аммиачной селитры $d_{AC} = 20$ –40 мкм. Замена сферического алюминия марки АСД-4 с размером частиц ~ 2 –8 мкм на чешуйчатый марки ПАП-2 с меньшей толщиной свода и увеличенной удельной поверхностью позволила существенно снизить (с 11.4 до 0.95 МПа) величину порогового давления воспламенителя P_{it} (кривые 1 и 2 рис. 5, опыты № 661 и № 711 табл. 1). Послойное горение началось раньше ($t_b \approx 7$ мс) — при достижении воспламенителем максимального давления — и протекало при давлении, близком к постоянному значению, равному 0.95 МПа. Существенно сократились время t_c (с 320 до 24 мс) и величина давления P_c (с 9.4 до 0.95 МПа), при которых возник конвективный режим.

Значения P_{it} , P_b и P_c , определенные для смеси с содержанием 18 вес.% алюминия марки ПАП-2, близки аналогичным величинам для смеси с содержанием 47 вес.% алюминия марки АСД-4 (табл. 1 — опыты № 711, № 669). Однако при использовании чешуйчатого алюминия процессы послойного и конвективного горения начинаются раньше (кривые 1, 2 рис. 6).

На основании полученных результатов можно заключить, что использование алюминия марки ПАП-2 вместо АСД-4 повышает опасность возникновения послойного и конвективного горения в смесях с аммиачной селитрой. Определенные для смесей с содержанием 47 вес.% АСД-4 и

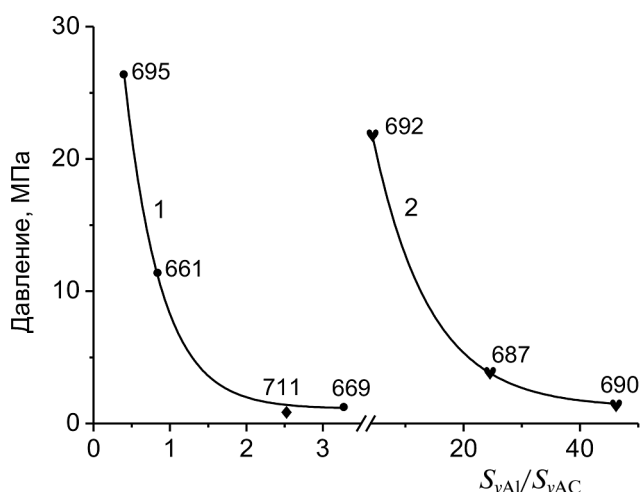


Рис. 7. Изменение порогового давления воспламенителя от отношения площади поверхности частиц алюминия к площади поверхности гранул аммиачной селитры в единице объема смеси (S_{vAl}/S_{vAC}) для образцов с $d_{AC} = 20$ –40 мкм (кривая 1) и 250–630 мкм (кривая 2).

18 вес.% ПАП-2 давления срыва послойного горения близки по величине к значениям давления срыва, измеренным для смесей перхлората аммония с горючими добавками [3], что необходимо учитывать при оценке их взрывоопасности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Используемые в смеси компоненты обладают заметно различающимися коэффициентами теплопроводности λ . Для аммиачной селитры величина λ_{AC} составляет 0.38–0.42 Вт/(м · К); для алюминия $\lambda_{Al} = 200$ –220 Вт/(м · К). Теплопроводность смеси $\lambda_{см}$ зависит от ее пористости, коэффициентов теплопроводности составляющих твердых компонент (λ_{AC} , λ_{Al}) и газов, заполняющих поры (λ_g) [13]. Ее вычисления являются трудоемкими и требуют введения нескольких эмпирических коэффициентов. Сравнение рассчитанных для ряда составов значений $\lambda_{см}$ с определенными экспериментально показало, что для двойных смесей ее величина (при одинаковых пористости и составе газа в порах) определяется соотношением удельных объемных концентраций используемых компонент, m_{v1}/m_{v2} . Величина $\lambda_{см}$ возрастает с увеличением отношения объемного содержания вещества с высокой теплопроводностью к объемному содержанию вещества с низкой теплопроводностью, в нашем случае — m_{vAl}/m_{vAC} . В работах [14–16] было показано, что введение в конденсированную систему теплопроводящих элементов (ТЭ) — медных проволочек — с высоким коэффи-

циентом теплопроводности позволяет увеличить поток тепла к исходному составу. Нагрев и воспламенение происходит в первую очередь на границе контакта системы с ТЭ. Горение распространяется вдоль проволочек со скоростью, в несколько раз превышающей скорость горения исходной смеси.

Вышеописанные результаты показывают, что добавление алюминия к аммиачной селитре увеличивает теплопроводность смеси, величина которой возрастает с повышением его концентрации. Увеличивается поверхность контакта частиц алюминия с поверхностью частиц селитры. Для исследуемых смесей были определены зависимости критического давления воспламенителя P_{it} от отношения площади поверхности частиц алюминия к площади поверхности частиц аммиачной селитры в единице объема (S_{vAl}/S_{vAC}) при разном размере гранул селитры (рис. 7), которые хорошо описываются экспоненциальными функциями. При размере частиц селитры $d_{AC} = 20\text{--}40$ мкм экспериментальные данные с алюминием марок АСД-4 и ПАП-2 (опыт № 711) ложатся на одну кривую 1 (рис. 7), которую можно представить формулой

$$P_{it} = 59.0 \exp\left\{-\left(S_{vAl}/S_{vAC}\right)/0.47\right\} + 1.11. \quad (2)$$

Увеличение d_{AC} до 250–630 мкм приводит к смещению кривой P_{it} в сторону больших значений (S_{vAl}/S_{vAC}). Ее зависимость (кривая 2 рис. 7) определяется выражением

$$P_{it} = 32.0 \exp\left\{-\left(S_{vAl}/S_{vAC}\right)/9.77\right\} + 1.21. \quad (3)$$

В обоих случаях повышение отношения S_{vAl}/S_{vAC} ведет к снижению P_{it} .

При использовании в смесях частиц горючего и окислителя с заметно различающимися размерами (250–630 мкм для аммиачной селитры и 2–8 мкм для алюминия марки АСД-4) мелкие гранулы в большом количестве могут располагаться в порах между крупными. В этом случае при малом содержании алюминия (8 вес.%) уменьшается площадь поверхности контакта между частицами металла и окислителя, ухудшается прогрев смеси, что приводит к увеличению времени возникновения послойного горения t_b и длительности его протекания, что наблюдается в опытах № 695 и № 692 при замене мелких гранул селитры на крупные (кривые 1, 2 рис. 3).

При высоком содержании алюминия (47 вес.%) преобладающим для смеси с крупными частицами АС, вероятно, является влияние увеличенного значения отношения площадей поверхности частиц алюминия и селитры, S_{vAl}/S_{vAC} , которое приводит к улучшению прогрева смеси, снижению времен начала послойного и конвективного горения. Этот эффект регистрируется в опытах № 690 и № 669 (кривые 2, 1 рис. 4). Следует отметить, что в смесях с разным размером частиц аммиачной селитры при увеличении отношения S_{vAl}/S_{vAC} величина P_{it} стремится к ~1 МПа, а при его уменьшении до нулевого значения (отсутствие алюминия в смеси) — к ~33–60 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В манометрической бомбе в смесях аммиачной селитры с алюминием насыпной плотности исследовано возникновение послойного горения и его переход в конвективное. Определены величины порогового (минимального) давления воспламенителя, при которых осуществляется их устойчивое поджигание, установлена их зависимость от состава смесей. Показано, что в большинстве случаев послойное горение начинается после сгорания воспламенителя на стадии падения давления. Измерены давления и времена, соответствующие возникновению послойного и конвективного горения. Установлены их зависимости от концентрации и марки алюминия, размера частиц аммиачной селитры. Показано, что замена сферических частиц алюминия марки АСД-4 на чешуйчатые марки ПАП-2 приводит к существенному (на порядок и более) уменьшению значений порогового давления, а также давлений, при которых начинаются послойный и конвективный режимы горения.

Работа выполнена за счет субсидирования, выделенного ФИЦ ХФ РАН на выполнение программы фундаментальных научных исследований РФ (тема № 122040500073-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prugh R.W. // Process Saf. Prog. 2020. V. 39. № 4. P. 12210.
<https://doi.org/10.1002/prs.12210>
2. Wes Y. // Winston-Salem J. 2022. February. № 7. P. 1.
3. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.

4. *Беляев А.Ф.* Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М.: Наука, 1968.
5. *Храповский В.Е.* // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 1.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X23030068>
6. *Храповский В.Е., Худавердиев В.Г., Сулимов А.А.* // Горение и взрыв. 2013. Т. 6. № 2. С. 211.
7. *Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Храповский В.Е. и др.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 8. С. 34.
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16020047>
8. *Ермолаев Б.С., Худавердиев В.Г., Беляев А.А. и др.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 2. С. 41.
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16020047>
9. *Ермолаев Б.С., Худавердиев В.Г., Беляев А.А. и др.* // Горение и взрыв, 2020. Т.13. № 2. С.80.
<https://doi.org/10.30826/CE20130209>
10. *Ермолаев Б.С., Худавердиев В.Г., Беляев А.А.* // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. № 2. С. 234.
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16020047>
11. ТУ 1791-007-49421776-2011. Порошок алюминиевый АСД4. М: Стандартиформ, 2011.
12. ГОСТ 549495. Пудра алюминиевая / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии, сертификации. Минск, 2006.
13. *Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга. Л.: Энергия, 1974.
14. *Golub G.* // J. Spacecraft. 1965. V 2. № 4. P. 593.
<https://doi.org/10.2514/3.28234>
15. *Caveny L.H., Glick R.L.* // J. Spacecraft. 1967. V. 4. № 1. P. 79.
<https://doi.org/10.2514/3.28813>
16. *Бахман Н.Н., Лобанов И.Н.* // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 10. № 1. С. 46.

THE EFFECT OF ALUMINUM IN ITS MIXTURES WITH AMMONIUM NITRATE ON THE IGNITION OF BURNING AND ITS TRANSITION TO CONVECTIVE BURNING REGIME

V. E. Khrapovskiy^{1*}, V. G. Khudaverdiev^{1,2}, A. A. Sulimov¹, P. V. Komissarov¹, S. S. Basakina¹.

¹ *Semenov Federal Research Center of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Institute of Radiation Problem of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan*

*E-mail: khrapovsky@mail.ru

The ignition of normal layer-by-layer burning and its transition to convective burning regime in mixtures of ammonium nitrate with bulk density aluminum are studied. The experiments in a constant-volume bomb with pressure registration were carried out. The porosity of the samples was 0.55–0.59, the particle size of the ammonium nitrate was varied from 20–40 to 250–630 μm , and the aluminum content varied from 8 to 47 wt %. Aluminum of two grades was used: ASD4 and PAP2. It is shown that mixtures are capable to be ignited at the igniter pressure close to or above the critical (minimum) value. The values of the critical pressure of the igniter, the pressure and time at which burning and convective burning occurs for mixtures with different particle sizes of ammonium nitrate and aluminum and different concentrations are measured. The replacement of aluminum ASD4 with PAP2 leads to a significant (by an order of magnitude or even more) decrease in the values of critical pressure and pressures at which the burning and convective burning begins.

Keywords: burning, convective burning, ammonium nitrate, aluminum, critical ignition pressure.

REFERENCES

1. Prugh R.W. // *Process Safety Progress*. **39** (4), 12210 (2020).
<https://doi.org/10.1002/prs.12210>
2. Wes Y. // *Winston-Salem Journal*. 2022. February. № 7. P. 1.
3. Belyaev A.F., Bobolev V.K., Korotkov A.I. et al. // *Transition of Combustion of Condensed Systems into an Explosion* (Nauka, Moscow, 1973) [in Russian].
4. Belyaev A.F. *Goreniya, Detonation, Rabota Vzryva of Condensed Systems* (Nauka, Moscow, 1968) [in Russian].
5. Khrapovskii V.E. // *Russ. J. Phys. Chem. B* **17**(2), 439 (2023).
<https://doi.org/10.31857/S0207401X23030068>
6. Khrapovskii V.E., Khudaverdiev V.G., Sulimov A. A. // *Goren. Vzryv.* **6** (1), 211 (2013).
7. Ermolaev B.S., Sulimov A.A., Khrapovskii V.E. et al. *Russ. J. Phys. Chem. B* **5**(4), 640 (2011).
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16020047>
8. Ermolaev B.S., Khudaverdiev V.G., Belyaev A.A., Sulimov A.A., Khrapovskii V.E., *Russ. J. Phys. Chem. B* **10**(1), 42
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16020047>
9. Ermolaev B.S., Khudaverdiev V.G., Belyaev A.A. et al. // *Goren. Vzryv.* **13** (2), 80 (2020).
<https://doi.org/10.30826/CE20130209>
10. Ermolaev B.S., Khudaverdiev V.G., Belyaev A.A. // *Goren. Vzryv.* **8** (2), 234 (2015).
<https://doi.org/10.7868/S0207401X16020047>
11. TU (Technical Conditions) 1791-007-49421776-2011: Aluminum Powder ASD-4 (2011).
12. GOST (State Standard) 5494-95: Aluminum Powder (2006).
13. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P, *Teploprovodnost of mixtures and composite materials. Reference book.* (Energy, Leningrad, 1974) [in Russian].
14. G. Golub. *J. Spacecraft.* **2** (4), 593 (1965).
<https://doi.org/10.2514/3.28234>
15. L.H. Caveny, R.L. Glick *J. Spacecraft.* **4** (1), 79 (1967).
<https://doi.org/10.2514/3.28813>
16. N.N. Bahman, I.N. Lobanov. *Fiz. Goreniya Vzryva.* **10** (1), 46 (1983).