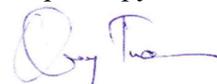


**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Нгуен Зюи Туан

**Изучение закономерностей и механизма горения энергонасыщенных систем
на основе нитратов различных металлов**

05.17.07 Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре химии и технологии высокомолекулярных соединений федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, академик
РАРАН Денисюк Анатолий Петрович,
и.о. заведующего кафедрой химии и технологии высокомолекулярных соединений, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Матвеев Алексей Алексеевич,
заместитель генерального директора по НИР, ФГУП "Федеральный центр двойных технологий "Союз"

доктор технических наук, профессор,
Павловец Георгий Яковлевич,
старший научный сотрудник,
«Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого»

Кандидат технических наук,
Комраков Петр Владимирович,
профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, АГПС МЧС России

Защита диссертации состоится «29» июня 2021 г. в «15.30» на заседании диссертационного совета РХТУ.Р.08 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125480 г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д.20) в конференц-зале ректората

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» https://muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат диссертации разослан « ____ » мая 2021 г.
Ученый секретарь диссертационного совета РХТУ.Р.08

Доктор химических наук, профессор



Бухаркина Т.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Известно, что неорганические нитраты различных металлов широко применяются в составе энергонасыщенных материалов (ЭМ) различного назначения. Так, KNO_3 является основным компонентом дымного пороха и большинства аэрозолеобразующих топлив (АОТ) для тушения пожаров. Он также, как и CsNO_3 , применяется в топливах зарядов для магнетогидродинамических генераторов, которые способны вырабатывать большие электрические мощности (2 ГВт и более). Нитраты щелочных и щёлочноземельных металлов используются в фейерверочных изделиях различных цветов свечения и в составах, генерирующих инфракрасные помехи.

Очевидно, что для высокоэффективного использования энергонасыщенных систем на основе неорганических нитратов надо иметь возможность целенаправленно управлять процессом их горения (скоростью, составом продуктов горения, в частности это очень важно для АОТ). Для этого необходимо знать закономерности и механизм горения.

Степень разработанности темы исследования

К настоящему времени закономерности и механизм горения систематически и детально изучены только для дымного пороха и для композиций на основе NH_4NO_3 . С 1990-х годов прошлого века начались интенсивные работы по разработке АОТ на основе KNO_3 и появились отдельные результаты по их горению. Однако, систематические исследования горения многочисленных составов АОТ не проводились, как и систем на основе нитратов других металлов.

Отметим, что знание закономерностей горения указанных систем необходимо также для обеспечения безопасности их производства, применения, хранения и перевозки. В научном плане важно выяснить влияние физико-химических свойств нитратов на горение систем на их основе и выяснить особенности закономерностей горения в сравнении с горением баллистических порохов, окислителем в которых являются оксиды азота.

Целью работы явились изучение закономерностей и механизма горения энергонасыщенных систем на основе нитратов различных металлов (K, Na, Cs, Ba, Sr, Pb) в широком диапазоне давления от 0,1 до 18 МПа; разработка быстрогорящих АОТ с высокой огнетушащей способностью (ОТС).

Для достижения этих целей в работе решались следующие задачи:

- ✓ Расчет термодинамических свойств систем на основе различных нитратов;
- ✓ Исследование влияния давления, коэффициента избытка окислителя α и размера частиц окислителя на скорость горения образцов;
- ✓ Определение экспериментальной температуры горения образцов;
- ✓ Определение температурного профиля в волне горения образцов для выяснения механизма горения;
- ✓ Исследование влияния алюминия и сплава его с магнием на скорость горения образцов;

- ✓ Изучение влияния катализаторов, в том числе в сочетании с сажей и углеродными нанотрубками на скорость горения систем;
- ✓ Разработка быстрогорящих АОТ на основе KNO_3 и смеси его с KClO_4 .

Объекты исследования

Образцы на основе фенолформальдегидной смолы (ФФС), пластифицированной дибутилфталатом (ДФФ), и нитратов К, Na, Cs, Ba, Sr и Pb, значительно отличающиеся соотношением между окислителем и горючим, оцениваемым коэффициентом избытка окислителя (α).

Методология и методы исследования

Окислители предварительно высушивали и смешивали со смолой и технологическими добавками, после чего к ним добавлялся пластификатор, полученная масса тщательно перемешивалась до состояния мокрого песка. Далее смесь вальцевали, из полотна проходным прессованием получали шнур диаметр ~ 7 мм. Скорость горения образцов определяли в атмосфере азота в приборе постоянного давления. Температурный профиль в волне горения определяли с помощью термопар W-Re. Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили с помощью программы «METTLER TOLEDO STAR SYSTEM» на термогравиметрическом анализаторе. ОТС топлив определяли по зависимости времени погасания пламени спиртовой горелки от массы топлив, полученной в герметичном шкафу с объемом $0,3\text{ м}^3$. За характеристику ОТС (г/м^3) принимали массу сгоревшего образца m^* , при которой происходит характерный излом на зависимости времени погасания (t) от массы m , отнесенной к единице защищаемого объема: $\text{ОТС} = m^* = m/V$. Чем меньше эта величина, тем лучше ОТС.

Научная новизна

Впервые в широком интервале давления (0,1-18 МПа) систематически изучено горение систем на основе одного и того же горюче-связующего (пластифицированная дибутилфталатом фенолформальдегидная смола) и нитратов калия, цезия, натрия, бария, стронция и свинца, отличающихся по расчётной температуре горения за счёт изменения соотношения между окислителем и горючим, характеризуемого коэффициентом избытка окислителя (α). Показано, что при атмосферном давлении при диаметре ~ 7 мм не горят лишь образцы с высоким значением $\alpha \sim 0,9-1$, скорости горения остальных образцов существенно отличаются - от $0,5$ мм/с до 5 мм/с и не коррелируются с расчетной температурой горения.

Установлены ряды по убыванию максимальной скорости горения образцов на основе изученных нитратов в зависимости от значения α и давления.

Для большинства систем на зависимости скорости горения от давления имеются два участка: на первом участке при низких давлениях величина v в законе горения ($u = Vp^\nu$) значительно (в 2 и более раз) меньше, чем на втором участке. Это существенно отличает их от смесевых систем на основе перхлората аммония, для которых значение v с увеличением давления уменьшается.

Зависимость скорости горения от α имеет экстремальный характер: для систем на основе нитратов металлов первой группы максимум скорости горения при всех давлениях достигается при значении $\alpha \sim 0,72$, а для систем на основе металлов второй группы зависит от давления: при $p \leq 2$ МПа - значение $\alpha \sim 0,6-0,8$, при $p > 2$ МПа - значение $\alpha \sim 1$; для систем на основе $Pb(NO_3)_2$ максимум скорости горения при всех давлениях наблюдается при $\alpha \sim 0,8$.

Экспериментальная температура горения образцов в зависимости от значения α и давления может быть близкой к расчетной, выше или меньше её. Установлено, что для образцов на основе нитратов калия и цезия с низким значением $\alpha \leq 0,62$ в волне горения достигается максимальная температура горения, превышающая расчетную, затем происходит её снижение до постоянной величины, близкой к расчётной за счет эндотермических реакций сажистых частиц с CO_2 и H_2O . Для образцов на основе $Ba(NO_3)_2$ и $Sr(NO_3)_2$ при более высоких α (0,72-1) экспериментальная температура горения ниже расчетной из-за незавершённости реакций с участием монооксида азота при низком давлении, так же, как и при горении нитроэфиров, нитросоединений и баллиститных порохов.

Установлен температурный профиль в волне горения систем на основе нитратов K, Na, Cs, Ba, Sr при атмосферном давлении. Особенностью их горения являются высокая температура поверхности > 1200 К и узкая зона газовых реакций (31-91 мкм для образцов с нитратами металлов первой группы и 517-602 мкм для образцов с нитратами металлов второй группы). Скорость горения систем на основе нитратов металлов определяется в к-фазе, в которой выделяется более 79% тепла, необходимого для распространения горения.

Установлено, что изменение размера частиц нитратов в интервале от 50 мкм до 500 мкм в исследованном диапазоне давления оказывает слабое влияние на скорость горения их систем. Это, вероятно, можно объяснить тем, что при высокой температуре поверхности, все компоненты в к-фазе еще далеко до реакционной зоны, находятся в расплавленном состоянии, что способствует их смешению.

Установлено, что влияние металлического горючего - алюминия (АСД-4) и сплава алюминия с магнием (ПАМ-4) на скорость горения образцов основе нитратов K, Na, Cs, Ba, Sr имеет сложный характер и зависит от скорости горения базового образца, катиона нитрата, природы металла, его количества и дисперсности, а также от давления, при котором происходит горение. В наибольшей степени металлы повышают скорость горения медленногорящих базовых систем, а в наименьшей – быстрогорящих образцов на KNO_3 и $CsNO_3$. Это связано с большим временем пребывания частиц металла в зонах горения образцов с низкой скоростью, чем для быстрогорящих образцов. Металл снижает значение v за счет уменьшения коэффициента диффузии окислительных газов с ростом давления.

Установлено, что наиболее эффективным катализатором на скорость горения образцов является салицилат меди. Сажа и УНТ слабо влияют на горение образцов на основе нитратов K и Na, и на эффективность действия катализатора. УНТ оказывают значительное влияние на

горение образцов на основе нитратов Ba и Sr. Салицилат меди в сочетании с углеродными добавками оказывает существенно большее влияние на скорость горения образца с $Ba(NO_3)_2$.

Практическая значимость

Предложены быстрогорящие АОТ, обладающие высокой огнетушащей способностью (9,5-12 г/м³), регулируемой в широких пределах скоростью горения при атмосферном давлении (от 8 до 18 мм/с) и низкой зависимостью ее от давления в интервале до 1-2 МПа. Их применение в генераторах оперативного действия обеспечит быстрое заполнение аэрозолем защищаемых объектов, в том числе продуваемых воздухом. Высокая скорость таких топлив позволит использовать заряды торцевого горения, что повысит плотность заряжания генератора и дает возможности оптимизировать его конструкцию. Слабая зависимость скорости горения топлив от давления в аварийных ситуациях значительно уменьшит возможности резкого подъема давления.

Основные положения, выносимые на защиту

- ✓ Закономерности горения систем на основе нитратов K, Na, Cs, Ba, Sr и Pb;
- ✓ Механизм горения систем на основе нитратов K, Na, Cs, Ba и Sr;
- ✓ Закономерности металлизированных систем;
- ✓ Влияние катализаторов, в том числе в сочетании с сажой и углеродными нанотрубками на скорость горения систем;
- ✓ Предлагаемые быстрогорящие АОТ с высокой ОТС.

Достоверность результатов обеспечивается применением стандартных методов испытаний, апробированных методик исследования, а также современных методов анализа и обработки полученных результатов.

Личный вклад автора

Участие автора состоит в постановке цели и задач работы, в поиске данных или анализе для литературного обзора диссертации. Автором проведена основная часть экспериментальных исследований и тщательная и всесторонняя обработка - анализ и обобщение полученных результатов, и подготовка их к публикациям.

Апробация работы

Полученные результаты исследований докладывались и обсуждались на международных конференциях и конгрессах: II Международной научно-практической конференции: «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение» (2017 - Тамбов, Россия), «Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии» (2018, 2019, 2020 - Москва, Россия), «III международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности» (2018, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Россия), 21th, 22nd и 23rd Seminar of the New Trends in Research of Energetic Materials (2018, 2019, 2020 - Pardubice, Czech).

Публикации

По результатам работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 1 статья в международном журнале из списка WoS, 2 статьи в журнале из списка ВАК, и 9 статей и тезисов докладов в сборниках, представленных на российских и международных научных конференциях и конгрессах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, экспериментальной части и обсуждения результатов, выводов и списка литературы. Работа изложена на 152 страницах, содержит 41 рисунок и 48 таблиц. Список литературы включает 147 источников.

Автор выражает **благодарность** и признательность профессору Денисюку А.П. за руководство научной работой. Автор также благодарит преподавателей, сотрудников кафедры ХТВМС, которые оказали большую помощь при проведении исследований.

Основное содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности и перспективность темы работы.

Литературный обзор (глава 1) включает анализ научных работ по теме работы. Отражены области применения энергонасыщенных систем на основе различных нитратов. Проанализировано общее влияние различных факторов на горение смесевых систем. Рассмотрены закономерности и механизм горения энергонасыщенных материалов на основе нитратов различных металлов. Сделан вывод о необходимости систематического изучения горения их систем.

В методической части (глава 2) охарактеризованы свойства исходных компонентов и методы исследования.

В главе 3 представлены результаты исследования и их обсуждения.

1. Зависимость скорости горения систем на основе KNO_3 , $NaNO_3$, $CsNO_3$, $Ba(NO_3)_2$, $Sr(NO_3)_2$ и $Pb(NO_3)_2$ от давления и коэффициента избытка окислителя (α). Для изучения зависимости скорости горения образцов от давления использовали фракцию окислителей с размером частиц 90-160 мкм. Зависимость скорости горения (u) образцов от давления (p) выражали формулой горения $u=Vp^v$. Точность определения скорости горения составляла $\pm 2\%$.

Прежде всего отметим, что изученные системы при диаметре заряда ~ 7 мм обладают повышенной способностью к горению при атмосферном давлении. Из образцов на основе нитратов металлов первой группы при атмосферном давлении не горят лишь образцы с высоким значением α (0,9-1), их горение начинается при давлении 1-4 МПа. Наибольшую линейную скорость горения ($u_{0,1}$) имеют образцы на основе KNO_3 (1,2-5,0 мм/с) которая сильно ($v \sim 5$ раз) зависит от α . Образцы на основе $NaNO_3$ горят значительно медленнее (0,9-1,5 мм/с), хотя имеют более высокую расчетную температуру горения.

Аналогичная картина наблюдается и для образцов на основе $Ba(NO_3)_2$ и $Sr(NO_3)_2$. Они имеют низкую скорость горения, слабо зависящую от α (особенно для образцов с $Ba(NO_3)_2$).

Все образцы на основе $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ при $\alpha \leq 1$ горят при атмосферном давлении, но с низкой скоростью - 0,5-0,9 мм/с.

Неспособность к горению некоторых образцов при низком давлении в принципе можно объяснить тем, что диаметр их зарядов (7 мм) меньше критического. Эксперименты показали, что заряды на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ($\alpha \geq 1$) диаметром 10 и 18 мм при атмосферном давлении воспламеняются, но после выгорания небольшого слоя (1-2 мм) горение прекращается.

Из полученных данных следует, что с наибольшей скоростью при всех давлениях горят образцы на основе KNO_3 и CsNO_3 . По мере убывания максимальной скорости горения (достигающей при различном значении α) при давлении от 0,1 МПа до 3 МПа образцы располагаются в ряд в зависимости от катиона нитратов: $\text{K}^+ > \text{Cs}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Pb}^{2+}$, а при $P > 3$ МПа порядок в ряд несколько изменился: Ba^{2+} занял место Na^+ , а Pb^{2+} - Ba^{2+} , Na^+ - Pb^{2+} : $\text{K}^+ > \text{Cs}^+ > \text{Ba}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Na}^+$.

При сравнении образцов по массовой скорости горения ($u_m = u \cdot \rho$, г/(см².с)) при атмосферном давлении получают другие ряды в зависимости от значения α . Так, при $\alpha \sim 0,4$ наибольшую массовую скорость горения имеет образец на основе CsNO_3 (0,81 г/(см².с)), затем следует образец с KNO_3 (0,63 г/(см².с)), а наименьшую – образец на основе $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$: 0,08 г/(см².с) (т.е. в ~ 10 раз меньше, чем первый образец). При этом образцы располагаются в ряд: $\text{Cs}^+ > \text{K}^+ > \text{Ba}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Sr}^{2+}$. При $\alpha \sim 0,72$ (ряд образцов: $\text{Cs}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ \sim \text{Ba}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Sr}^{2+}$) максимальная массовая скорость в ряду выше минимальной в 5,8 раза.

Для большинства образцов зависимость скорости горения от давления $u(p)$ состоит из двух участков: на первом участке значение v значительно меньше (в 2 и более раз в зависимости от состава образцов), чем на втором участке. Низкие значения v (0,06-0,22) на первом участке имеют образцы на основе нитратов К, Cs, Ba, Sr, а образцы на основе нитратов Na, Pb - более высокие (0,18-0,47). На втором участке наименьшее значение v имеют образцы на основе CsNO_3 (0,22-0,42). Для образцов с постоянной зависимостью $u(p)$, наименьшее значение v имеют образцы на основе CsNO_3 (0,39-0,6).

Для образцов с двумя участками на зависимости $u(p)$ излом, при котором начинается увеличение величины v , происходит при различном давлении ($P_{\text{излом}}$). Для образцов на основе нитратов металлов первой группы наблюдается излом при более высоком давлении, чем для образцов с $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $P_{\text{излом}}$ которых $\leq 1,1$ МПа. Для образцов с KNO_3 - $P_{\text{излом}}$ в зависимости от α лежит в диапазоне 1,5-6 МПа, для образцов с CsNO_3 - $P_{\text{излом}}$ равно 2,2-4 МПа, а для образцов с NaNO_3 значения $P_{\text{излом}}$ лежат в более высоком диапазоне: 6-12 МПа.

Зависимость скорости горения u от α для всех образцов имеет экстремальный характер: для образцов на основе KNO_3 , NaNO_3 и CsNO_3 максимальная скорость (u_{max}) горения находится при $\alpha \sim 0,72$ (рис. 1). Для образцов с KNO_3 это объясняется тем, что при горении в реакционной зоне к-фазы соотношение между горючим и окислителем из-за испарения

пластификатора выше, чем в исходном образце. С учётом этого значение α в реакционной зоне близко к 1. Возможно, это можно отнести к составам на основе и других щелочных нитратов.

Для образцов на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ максимальная скорость горения при давлении до 2 МПа достигается также при значении $\alpha < 1$ (0,6-0,8), а при давлении выше 2 МПа - при значении $\alpha \sim 1$. Для образцов на основе $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ максимум скорости горения при всех давлениях соответствует значению $\alpha \sim 0,8$.

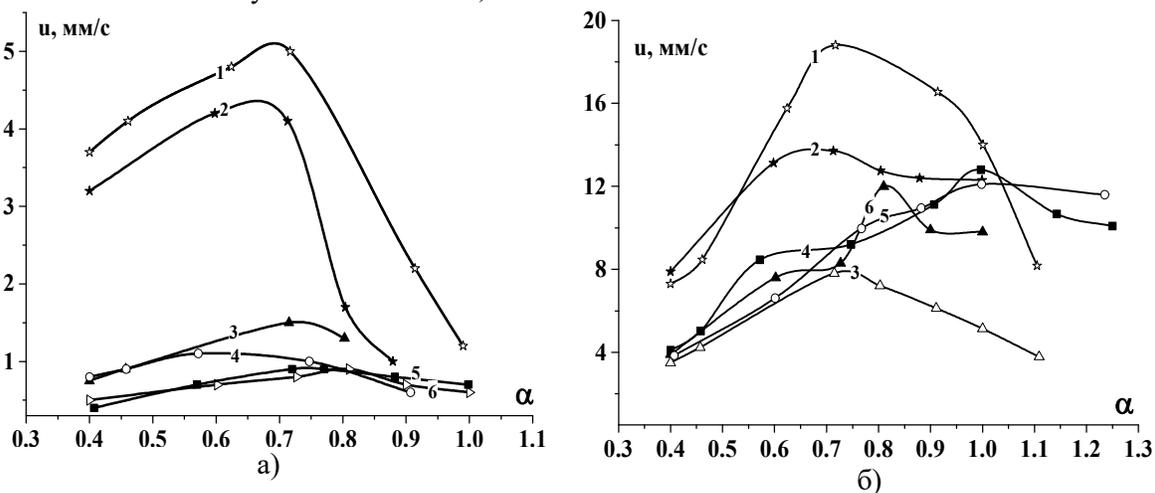


Рисунок 1 – Зависимость скорости горения различных образцов от величины α при 0,1 МПа (а) и 18 МПа (б): 1-KNO₃; 2-CsNO₃; 3-NaNO₃; 4-Ba(NO₃)₂; 5-Sr(NO₃)₂; 6-Pb(NO₃)₂

Сопоставление максимальных скоростей горения образцов (достигающихся при различных α) с расчетной температурой горения (рис. 2) показало, что между ними нет однозначной корреляции, особенно при атмосферном давлении. Так, при $p = 0,1$ МПа образцы с NaNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ горят значительно медленнее образцов на основе KNO_3 и CsNO_3 , расчетная температура горения которых существенно ниже. Отсутствие корреляции между скоростью и расчётной температурой горения при атмосферном давлении, вероятно, в основном обусловлено тем, что при горении многих образцов не достигается полнота горения, то есть экспериментальная температура горения не соответствуют расчётным значениям.

2. Экспериментальная температура горения систем при атмосферном давлении. Измерение температуры горения образцов проводили с помощью П-образных вольфрам-ренийевых термопар (W+20%Re и W+5%Re) толщиной 50 мкм на зарядах, бронированных в трубке из плексигласа. Полученные осциллограммы (Т-время) можно разделить на два вида: первый – когда температура достигает в волне горения максимального значения и остаётся постоянной и второй – когда в волне горения имеется зона, в которой после максимальной температуры (T_{\max}), превышающей расчётную (T_p) на величину $\Delta T_{\max} = T_{\max} - T_p$, происходит её падение до постоянной, которую принимали за температуру горения. Принимали, что среднее экспериментальное значение T_3 равно расчётной, если различие между ними ($\Delta T = T_3 - T_p$) не превышает $\pm 35\text{K}$.

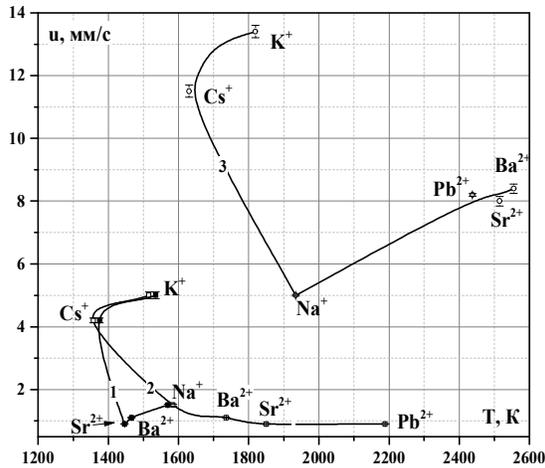


Рисунок 2 – Взаимосвязь максимальной скорости с расчётной и экспериментальной температурой горения при различном давлении: 1) экспериментальная температура при $P=0,1$ МПа; 2) расчётная температура при $P=0,1$ МПа; 3) расчётная температура при $P=10$ МПа

продуктах горения при $T_p=1131\text{K}$ содержится С 2,13 моль/кг, а превышение расчётной температуры на 280К достигается если содержание углерода в продуктах горения составит 8 моль/кг.

При протекании указанных реакций во времени температура постепенно снижается, приближаясь к расчётной и остается постоянной до окончания горения образца. Такой процесс был экспериментально установлен при горении низкокалорийных порохов.

При увеличении α температура горения и содержание CO_2 и H_2O в продуктах горения повышаются и сажистые частицы успевают быстро эндотермически прореагировать и поэтому превышение экспериментальной температуры над расчетной не наблюдается.

Для систем на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ при более высоких значениях α (от 0,72) величина T_3 меньше T_p , при этом чем выше α , тем больше отрицательное значение ΔT (табл. 1). Известно, что при горении баллистических порохов при низких давлениях значение T_3 значительно ниже расчётной. Это происходит из-за незавершённости реакций с участием монооксида азота $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2$. Вероятно, что это также происходит при горении образцов на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, так как при распаде этих нитратов образуются не только O_2 , но и NO , NO_2 . Например, расчёты с фиксаций в продуктах горения различного количества NO (при отсутствии углерода) показали, что для образца на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ с $\alpha \sim 0,72$ значение T_3 обеспечивается при наличии в продуктах горения 2,8 моль/кг NO (из $\sim 6,31$ моль/кг максимально возможного количества). Эксперименты показали, что для образцов с

Для исследованных образцов на основе NaNO_3 значения экспериментальной температуры практически совпадают с расчётными. Это наблюдается также для образцов на основе KNO_3 и CsNO_3 при $\alpha \geq 0,72$. Для образцов с $\alpha \leq 0,62$ в волне горения фиксируется температура T_{max} , превышающая расчётное значение, и тем значительнее, чем ниже α , а затем происходит её снижение до постоянной величины, близкой к расчётной. Превышение экспериментальной температуры над расчётной связано с присутствием в пламени углеродистых частиц, образовавшихся в волне горения при распаде полимера и пластификатора, которые не успевают быстро эндотермически прореагировать с CO_2 и H_2O . Например, для образца основе KNO_3 с $\alpha \sim 0,46$ в расчётных

$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ с $\alpha \sim 0,72$ значения T_3 достигают расчётных при давлении 7 МПа и 5 МПа, соответственно.

Для образцов с $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ при низких значениях α (до 0,57) T_3 при атмосферном давлении близка к расчётной. Для таких образцов, вероятно, имеются различные факторы, оказывающие противоположное влияние на температуру горения. При некоторых условиях положительное (в случае повышенного содержания CO_2 и C в продуктах горения) и отрицательное (при содержании NO в продуктах горения) влияние этих эффектов количественно может быть одинаковым и тогда экспериментальная равна расчётной температуре. Для образца с $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ при $\alpha \sim 0,57$ это произойдёт, если в продуктах горения содержание CO_2 увеличивается с 1,31 до 7,55 моль/кг, а количество NO составит 1 моль/кг (из 5,96 моль/кг).

Очевидно, что для однозначного вывода о полноте горения систем необходимо кроме измерения температуры определить состав продуктов горения и их количество. Это сложная проблема, так в процесс их охлаждения в объёме, в котором происходит горение, протекают вторичные реакции. Например, в калориметрической бомбе ($V=300 \text{ см}^3$) в атмосфере азота при сгорании 1 г образца на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ с $\alpha \sim 0,72$ в продуктах горения зафиксирован CH_4 (2,78 моль/кг), которого нет в расчётном составе, и изменилось соотношение между CO , CO_2 и H_2 .

3. Механизм горения систем на основе нитратов щелочных и щелочноземельных металлов.

Для исследования механизма горения использовали базовые образцы на основе нитратов щелочных и щелочноземельных металлов с $\alpha \sim 0,72$, которые существенно отличаются по скорости горения. Результат ТГА со скоростью нагревания 20К/мин показал, что вспышка образцов на основе нитратов щелочных металлов наблюдается в температурном интервале 653-683К, а для образцов с $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ температура вспышки равна 713К и 803К.

Измерение профиля температуры в волне горения образцов проводили с помощью П-образных вольфрам-рениевых термопар толщиной 5-7 мкм. При горении образца в результате опыта на осциллограмме записывается зависимость температуры (T) от времени (τ), которую, зная скорость горения, преобразуют в зависимость температуры $T(x)$ от расстояния x (при $x=0$, $T=T_n$).

За температуру поверхности $T_n(T_1)$ принимали точку характерного перегиба ($x=0$), которая связана с выходом спая термопары из к-фазы в газовую (рис. 3). Образцы на основе KNO_3 и CsNO_3 обладают наибольшими значениями T_n (1264 К и 1262 К, соответственно). По литературным данным температуры кипения KNO_3 и NaNO_3 при атмосферном давлении

Таблица 1 - Температура горения некоторых образцов при атмосферном давлении

образец на основе	α	T_{max} , К	ΔT_{max} , К	ΔT , К
KNO_3	0,46	1411	+280	-
	0,57	1490	+168	-
	0,62	1510	+96	-
CsNO_3	0,40	1308	+268	-
	0,60	1354	+106	-
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	0,72	-	-	-270
	0,91	-	-	-659
$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	0,72	-	-	-404
	1,00	-	-	-859
$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	0,50	-	-	-146
	0,60	-	-	-408

составляют 1263 К и 1276 К, соответственно. С учетом погрешностей всех измерений, точки температуры кипения близки к температурам поверхностей в волне горения образцов.

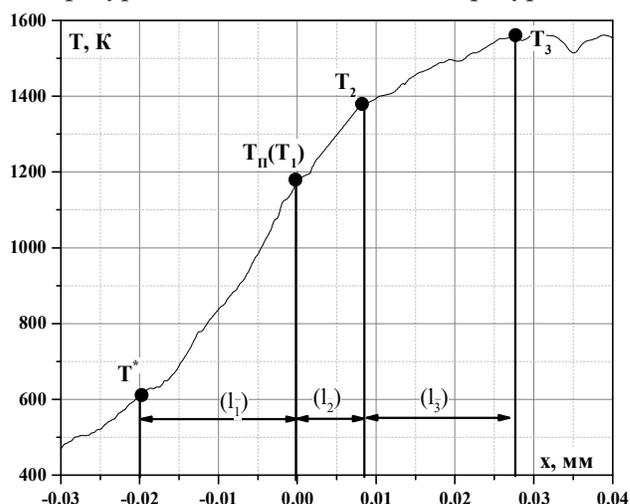


Рисунок 3 – Оциллограмма температурного профиля в волне горения образца на основе KNO_3 с $\alpha=0,72$ при атмосферном давлении

связывающего с NO и кислородом, и догорают мелкие сажиные частицы с эндотермическим эффектом, температура изменяется от T_p до T_2 . Для образцов на основе нитратов щелочных металлов равная 8-19 мкм, значительно меньше чем для образцов на основе $Ba(NO_3)_2$ (168 мкм) и $Sr(NO_3)_2$ (172 мкм).

$\varphi = dT/dx = (T_2 - T_p) / l_2$ – температурный градиент над поверхностью горения от T_p до T_2 . Для образца на основе $Sr(NO_3)_2$ наблюдается наименьшее значение φ ($\sim 0,7 \cdot 10^4$ К/см), а наибольшее ($19,8 \cdot 10^4$ К/см) – для образца на основе KNO_3 (табл. 2).

l_3 – расстояние, на котором догорают крупные сажиные частицы и температура увеличивается от T_2 до максимальной температуры T_3 .

По полученным параметрам в волне горения составлен тепловой баланс к- фазы:

$$C_p(T_p - T_0) + \Delta H_{\text{плав.}} + \Delta H_{\text{исп.}} + \Delta H_{\text{переход}} = Q_k + Q_\lambda.$$

где: T_p – температура поверхности горения, К; T_0 – начальная температура; C_p – средняя теплоёмкость образца в интервале температуры $T_p - 293$ К; $\Delta H_{\text{исп.}}$ – энтальпия испарения компонентов; $\Delta H_{\text{переход}}$ – энтальпия полиморфных переходов компонентов; Q_k – тепло, выделяющееся в к-фазе, Дж/г; $Q_\lambda = \lambda \cdot \varphi / (\rho \cdot U)$ – тепло, поступившее из газовой зоны: λ – теплопроводность газовой зоны, u – скорость горения образца, φ – градиент температуры в газовой зоне, ρ – плотность образца; ΣQ – сумма слагаемых левой части уравнения; $Q_k / \Sigma Q$ – относительная доля тепла, выделившаяся в к-фазе, %.

Основное количество тепла (более 79%), необходимого для распространения горения изученных образцов, выделяется в реакционном слое к-фазы (табл. 2).

l_1 – ширина прогретого и реакционного слоёв к-фазы, на которой температура падает в e раз от T_p до T^* . Наибольшая ширина прогретого и реакционного слоёв к-фазы ($l_1 = 289$ и 293 мкм) наблюдается при горении образцов на основе $Ba(NO_3)_2$ и $Sr(NO_3)_2$, которые горят с низкой скоростью (1,3 мм/с и 0,9 мм/с, соответственно). По l_1 определяли коэффициент температуропроводности пороха: $\chi = l_1^2 \cdot u$.

l_2 – протяжённость зоны горения, в которой, вероятно, завершаются газофазные экзотермические реакции между продуктами разложения

Таблица 2 – *Параметры горения образцов на основе нитратов щелочных и щелочноземельных металлов ($\alpha \sim 0,72$) при атмосферном давлении*

Параметры	Образец на основе				
	KNO ₃	NaNO ₃	CsNO ₃	Ba(NO ₃) ₂	Sr(NO ₃) ₂
u, мм/с	5,2	1,5	4,6	1,3	0,9
T*, К	652	632	652	633	634
l ₁ , мм	0,018	0,052	0,045	0,289	0,293
$\chi \cdot 10^3$, см ² /с	0,9	0,8	2,1	3,8	2,7
T _п , К	1264	1210	1262	1214	1216
$\phi_1 \cdot 10^{-4}$, К/см	19,8	7,8	6,8	1,0	0,7
T ₂ , К	1407	1357	1338	1390	1328
l ₂ , мм	0,008	0,019	0,011	0,168	0,172
l ₃ , мм	0,023	0,072	0,064	0,349	0,430
T ₃ , К	1535	1546	1418	1469	1439
T _р , К	1516	1585	1378	1736	1850
Ср, Дж/(г·К)	1,45	1,74	0,82	1,08	1,26
λ , Дж/(К·см·с)	0,00116	0,00132	0,00087	0,00146	0,00154
ΣQ , Дж/г	1552	1800	947	1185	1334
Q _λ , Дж/г	239	363	44	48	53
Q _к , Дж/г	1312	1433	903	1137	1281
Q _к /ΣQ, %	84	79	95	96	96
Q _{к.п.} , Дж/(см ² ·с)	1207	401	1092	318	269

Понятно, что скорость горения определяется количеством тепла, передаваемого в единицу времени из зоны реакции в к-фазе на создание очередного прогретого слоя: $Q_{к.п.} = Q_{к.у.м.}$, Дж/(см²·с). Образец на основе KNO₃ имеет наибольшее значение потока Q_{к.п.} (1207 Дж/(см²·с)), а образец на основе Sr(NO₃)₂ – наименьшее (269 Дж/(см²·с)), т.е. в ~4,5 раза меньше, чем первый образец. При этом образцы по значениям Q_{к.п.} расположены в ряду в зависимости от катиона нитратов: K⁺ > Cs⁺ > Na⁺ > Ba²⁺ > Sr²⁺.

4. Влияние размера частиц нитрата на скорость горения их образцов. Для исключения измельчения частиц при вальцевании образцов зазор между валками был в 3-5 раз больше, чем размер частиц окислителя. Использовали образцы со значением α , при котором достигается максимальная скорость горения. Влияние дисперсности оценивали отношением $U_{мел.}/U_{круп.}$, где $U_{мел.}$ и $U_{круп.}$ – скорость горения образца с мелким и крупным окислителя, соответственно ($U_{мел.}$ – фракция <50мкм, $U_{круп.}$ – фракция 400-500 мкм).

Показано, что с уменьшением размера частиц окислителя скорость образцов увеличивается различно: наиболее сильно это происходит для образцов на основе Pb(NO₃)₂ и CsNO₃, причём для последнего влияния увеличивается с ростом давления: при 0,1 и 10 МПа скорость возрастает в 1,2 и 2,1 раза, соответственно. Для образца с Pb(NO₃)₂ скорость горения изменяется в ~1,8-2 раза. Дисперсность других нитратов слабо влияет на скорость горения их композиций (в 1,1-1,4 раза).

5. Влияние металлов на скорость горения систем на основе нитратов K, Na, Cs, Ba и Sr. Для проведения исследований выбраны базовые образцы, существенно отличающиеся по значениям расчетных и экспериментальных температур и также по скорости горения. Это: наиболее быстрогорящие образцы на основе KNO₃ и CsNO₃ с коэффициентом $\alpha \sim 0,72$,

медленногорящие образцы на основе KNO_3 с $\alpha \sim 1$ и NaNO_3 с $\alpha \sim 0,72$ (для всех этих образцов экспериментальная температура горения близка к расчетной при атмосферном давлении); образцы на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ($\alpha \sim 0,72$ и 1) и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ($\alpha \sim 0,72$), которые горят с низкой скоростью, экспериментальная температура горения при низком давлении значительно ниже расчетной. Использовали металлические порошки: Al марки АСД-4 ($S_{\text{уд}} \sim 0,34-0,38 \text{ м}^2/\text{г}$, средний размер частиц $\sim 15 \text{ мкм}$) и сплав ПАМ-4 (Al_3Mg_4 , $S_{\text{уд}} \sim 0,24 \text{ м}^2/\text{г}$, средний размер частиц $\sim 40 \text{ мкм}$). Порошки вводили в базовые образцы (4,8-28,6 массовых процентов, %) за счет пропорционально уменьшения количества всех исходных компонентов. Влияние металла на скорость горения оценивали величиной $Z = U_{\text{ме}}/U_0$, где $U_{\text{ме}}$ и U_0 – скорость горения образца с металлом и без него, соответственно.

ПАМ-4 и АСД-4 повышают температуру горения образцов за счет экзотермических реакций их с CO_2 и H_2O , образовавшихся при взаимодействии окислителей с горючим. АСД-4 и ПАМ-4 оказывают различное влияние на скорость горения базовых образцов. Эффективность их влияния также различна.

При низком давлении самое слабое положительное влияние АСД-4 оказывает на горение быстрогорящих базовых образцов на основе KNO_3 и CsNO_3 с $\alpha \sim 0,72$ при небольшом его количестве ($\sim 5-9\%$) - максимальное влияние $Z_{\text{макс}} \sim 1,1-1,3$. При увеличении концентрации АСД-4 скорость горения становится меньше, чем у базового образца ($Z < 1$). Это отрицательное влияние можно объяснить за счет уменьшения содержания количества CO_2 и H_2O , образующихся при горении смолы и пластификатора в базовом составе, количество которых уменьшается пропорционально количеству введенного АСД-4. При горении базового состава частицы АСД-4 после диспергирования, возможно, не успевают сгорать вблизи к поверхности, так как скорость потока газа велика. Поэтому при большом количестве АСД-4 (например, 23%) снижает скорость горения быстрогорящих образцов. Положительное влияние АСД-4 на горение медленногорящих образцов наблюдается в более широком интервале количества АСД-4. Это связано с низкой скоростью горения, т.е. с большим временем пребывания частиц АСД-4 с CO_2 и H_2O .

При низком давлении ПАМ-4 оказывает более влияние на скорость горения базовых образцов, чем АСД-4, особенно для медленногорящих образцов. ПАМ-4 не снижает скорость горения базовых образцов на KNO_3 и CsNO_3 с $\alpha \sim 0,72$ при его повышенном содержании. Наименьшее положительное влияние ПАМ-4 оказывает на скорость горения быстрогорящих образцов с $\alpha \sim 0,72$ на основе KNO_3 и CsNO_3 , для которых $Z_{\text{макс}} \sim 1,4$ и 1,6, соответственно. Наибольшее влияние ПАМ-4 оказывает на скорость горения медленногорящего образца на основе $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, чем выше его содержание в составе, тем выше Z . Аналогичная зависимость Z от количества ПАМ-4 наблюдается и для медленногорящего образца на основе $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ с $\alpha \sim 0,72$.

С увеличением давления улучшаются условия для воспламенения и сгорания частиц металла вблизи поверхности горения за счет пропорционального повышения концентрации

CO₂ и H₂O, поэтому скорость горения образцов возрастает сильнее. При увеличении давления влияние АСД-4 на скорость горения всех образцов существенно изменилось. При давлении 10 МПа наиболее сильное влияние АСД-4 оказывает на скорость горения медленногорящего образца на основе KNO₃ с $\alpha \sim 1$: $Z_{\text{макс.}} \sim 3,2$. Наименьшее влияние ($Z_{\text{макс.}} \sim 1,4$) АСД-4 проявляется на горении быстрогорящих образцов на основе KNO₃ и CsNO₃ ($\alpha \sim 0,72$), при этом он не снижает скорость горения базового образца, как это происходило при атмосферном давлении. В случае добавления ПАМ-4 при повышенном давлении наибольшую скорость горения имеют образцы на основе базового состава с KNO₃ $\alpha \sim 0,72$. Максимальная эффективность ПАМ-4 оказывает на скорость горения базового образца на основе NaNO₃, который горит с наименьшей скоростью при повышенном давлении.

Добавление АСД-4 и ПАМ-4 в состав со слабой зависимостью скорости горения от давления усиливает эту зависимость. Напротив, если для исходного состава зависимость является сильной ($v \geq 0,5$), АСД-4 и ПАМ-4 ее ослабляют.

6. Влияние катализаторов, сажи и углеродных нанотрубок на скорость горения систем.

Влияние катализаторов на скорость горения исследовано на составах с коэффициентом $\alpha \sim 1$, некоторые из них горят медленно ($u_{0,1} \sim 0,6-1,2$ мм/с) или не горят при атмосферном давлении. В качестве катализаторов использовали салицилат меди (Сал.Сu), салицилат никеля (Сал.Нi), фталата меди свинца (ФМС), фталат никеля свинца (ФНС). Добавки вводились в состав образцов сверх 100%. Влияние добавок на скорость горения оценивали величиной $Z = U_{\text{доб.}}/U_0$, где $U_{\text{доб.}}$ и U_0 – скорость горения образца с добавкой и без него, соответственно. Наибольшее влияние на скорость горения образцов оказывает Сал.Сu. Зависимость $Z(p)$ имеет сложный характер. С увеличением давления величина Z может уменьшаться до постоянного значения или увеличиваться до максимума, затем уменьшаться.

Изучено влияние сажи УМ-76 ($S_{\text{уд.}} \sim 170$ м²/г) и углеродных нанотрубок УНТ ($S_{\text{уд.}} \sim 270$ м²/г) на катализ горения образцов на основе нитратов К, Na, Ва и Sr при атмосферном давлении. Получено, что на зависимости эффективности действия Z комбинированной добавки от соотношения содержания Сал.Сu с сажой или ТМД (1,5:0,5; 1:1; 0,5:1,5) все образцы на основе нитратов К, Na, Ва, Sr с $\alpha \sim 0,72$ отличаются между собой. Сажа и УНТ увеличивают скорость горения образцов на основе KNO₃ и Ва(NO₃)₂ с $\alpha \sim 0,72$ в широком диапазоне давления. Отметим, что УНТ оказывают более сильное влияние на скорость горения образца, чем сажа. Это, возможно, связано с их большей теплопроводностью и большей реакционной способностью при взаимодействии с расплавом нитратов к-фазы.

Для образца на основе KNO₃ с $\alpha \sim 0,72$ сажа не усиливает влияние Сал.Сu, а Сал.Сu + ТМД оказывают большее влияние на скорость горения, чем катализатор без УНТ. Это происходит за счет того, что ТМД без катализатора увеличивают скорость горения, также как Сал.Сu.

2% Сал.Сu в сочетании с 1-3% ТМД оказывают существенно большее влияние на скорость горения на основе Ва(NO₃)₂ с $\alpha \sim 0,72$ в широком диапазоне давления. полученный

эффект увеличения скорости горения является аддитивной величиной. В отличие от этого в катализе горения баллистических топлив, роль сажи и УНТ в основном заключается в формировании над поверхностью горения каркаса.

7. Разработка быстрогорящего АОТ. Топлива состоят из широкодоступных компонентов, обладают высокой огнетушащей способностью, регулируемой в широких пределах скоростью горения при атмосферном давлении (от 8 до 18 мм/с) и низкой зависимостью ее от давления в интервале до 1-2 МПа (значение v в законе скорости горения в пределах 0,2-0,25). Указанный результат достигается тем, что в АОТ для объемного пожаротушения, содержащее окислители, связующее – ФФС, пластифицированную ДБФ; фторопласт-4 и технологическую добавку, введен катализатор горения (основной салицилат меди) в индивидуальном виде или в сочетании с сажой или углеродными нанотрубками, и указанное связующее, в котором соотношение ФФС и ДБФ лежит в пределах 1,7-4. Это соотношение играет важную роль для формирования высокой скорости горения топлив, так как при горении топлив меняется соотношение окислителя и горючего из-за испарения ДБФ в реакционном слое к-фазы (соотношение между окислителем и горючим выше, чем в исходном составе), и соответственно скорость горения. Снижение температуры горения быстрогорящего топлива и содержания в продуктах горения веществ щелочной природы и СО, достигается введением в его состав КС1. Подчеркнем, что все быстрогорящие топлива обладают хорошей ОТС (9,5-12 г/м³).

Предлагаемые топлива могут быть использованы и в газогенераторах, работающих при давлении выше атмосферного, например, в интервале 0,1-1 МПа, в котором скорость горения слабо зависит от давления (значение v составляет $\leq 0,25$). Это повышает безопасность производства, эксплуатации и хранения зарядов и газогенераторов. Исследованные топлива обладают высокими механическими характеристиками: σ_p при 20°C равна 2,9-3,5 МПа при деформации $\sim 25-30\%$. Технологические свойства представленных образцов (коэффициент технологичности $K_T \sim 3-4$) позволили получать качественные заряды методом проходного прессования.

ВЫВОДЫ

1) В широком интервале давления (0,1-18 МПа) изучено горение энергонасыщенных систем на основе одинакового горюче-связующего и различных неорганических нитратов (К, Na, Cs, Ba, Sr, Pb), отличающихся по расчётной температуре горения за счёт изменения соотношения между окислителем и горючим, характеризуемого коэффициентом избытка окислителя (α). Показано, что изученные системы имеют как одинаковые, так и отличающиеся закономерности горения:

- большинство из них горят при атмосферном давлении, но с различными скоростями, зависящими от природы катиона и от отношения окислителя и горючего; наибольшую линейную скорость горения при всех давлениях и при различном значении α имеют составы на основе KNO_3 ;

- общим свойством всех образцов является экстремальный характер в зависимости скорости горения и от α : для большинства образцов максимум скорости горения при всех давлениях достигается при значении α меньше 1 (0,6-0,8);

- для большинства образцов систем зависимость скорости горения от давления состоит из двух участков: в области пониженного давления величина v значительно (в 2 и более раз) меньше, чем в области повышенного давления;

- экспериментальная температура горения составов в зависимости от значения α и давления, при котором происходит горение, может совпадать с расчетной, быть выше или меньше её.

2) Определен температурный профиль в волне горения образцов на основе нитратов щелочных и щелочноземельных металлов при атмосферном давлении. Отличием горения образцов является высокое значение температуры поверхности горения (выше 1200 К) и узкая фазовая зона горения (до 10-100 раз меньше, чем для баллиститных порохов). Скорость горения систем определяется реакциями в κ -фазе, в которой выделяется более 79% тепла, необходимого для распространения горения.

3) Влияние металлического горючего на скорость горения базовых образцов имеет сложный характер и зависит от следующих факторов: от скорости горения базового образца, катиона нитрата, природы металла, его количества и дисперсности, а также от давления, при котором происходит горение.

4) Изучено влияние катализаторов, сажи и УНТ на горение образцов. Показано, что наиболее эффективным катализатором является салицилат меди, который при атмосферном давлении в наибольшей степени увеличивает скорость горения образцов на основе нитратов К и Na. Углеродные добавки слабо влияют на горение указанных образцов и незначительно увеличивают эффективность действия катализатора. Значительное влияние на горение образцов на основе нитратов Ba и Sr оказывают УНТ, при этом зависимость Z от давления проходит через максимум; совместное влияние Са.Сu с сажой и УНТ близко к аддитивной величине.

5) Разработаны быстрогорящие АОТ на основе KNO_3 или его смеси с KClO_4 , скорость горения которых при атмосферном давлении равна 8-18 мм/с и слабо зависит от давления: значение $v \leq 0,25$ в интервале 0,1-2 МПа.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Denhisyk A. P., **Nguyen Duy Tuan**, Sizov V. A. Combustion Behavior of the Inorganic Nitrates-Based Compositions Part I // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2020, Vol 45, №9, p. 1382-1387 (Web of Science). <https://doi.org/10.1002/prep.202000053>

Публикации в рецензируемых изданиях:

2. **Нгуен Зюи Туан**, Денисюк А.П. Закономерности горения композиций на основе нитратов металлов I и II групп // Вестник технологического университета. - 2019. Т.22, №2 – С. 17-22. (ВАК, Chemical Abstract)

3. **Нгуен Зюи Туан**, Денисюк А.П. Полнота горения композиций на основе нитратов различных металлов при атмосферном давлении // Вестник технологического университета. - 2019. Т.22, №8 – С. 84-89. (ВАК, Chemical Abstract).

Тезисы докладов на международных конференциях:

4. Пономарёв А. К., **Нгуен Зюи Туан**, Денисюк А.П. Влияние алюминия АСД-4 на скорость горения композиций на основе нитратов металлов первой и второй групп // Успехи в химии и химической технологии. - 2020. - том XXXIV, №9. – С. 111-113.
5. **Nguyen Duy Tuan**, Denhisyk A. P., Sizov V. A. A study of the combustion behavior of metallized compositions based on KNO_3 and $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ // New Trends in Research of Energetic Materials. Proceedings of the 23rd Seminar - University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic, 2020 – P. 711 – 715.
6. **Нгуен Зюи Туан**, Денисюк А.П. Экспериментальная температура горения композиций на основе нитрата бария при различном давлении // Успехи в химии и химической технологии. - 2019. - том XXXIII, №9. – С. 90-92.
7. **Nguyen Duy Tuan**, Denhisyk A. P., Sizov V. A. Determination of combustion temperature of energetic materials based on nitrates of alkali metal at atmospheric pressure // New Trends in Research of Energetic Materials. Proceedings of the 22st Seminar - University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic, 2019 – P. 329 – 333.
8. Ли Хунг, **Нгуен Зюи Туан**, Денисюк А.П. Определение экспериментальной температуры горения энергонасыщенных систем на основе нитратов калия, натрия и бария при атмосферном давлении // Успехи в химии и химической технологии. - 2018. - том XXXII, №10. – С. 100-102.
9. **Нгуен Зюи Туан**, Ли Хунг, Денисюк А.П. Закономерности горения систем на основе нитратов калия, цезия и свинца // Успехи в химии и химической технологии. - 2018. - том XXXII, №10. – С 124-126.
10. **Nguyen Duy Tuan**, Sizov V.A., Denhisyk A.P. Combustion regularities of the propellants on the basis of nitrates of various metals // New Trends in Research of Energetic Materials. Topic: Sensitivity and Performance. Proceedings of the 21st Seminar - University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic, 2018 – P. 1112 – 1116.
11. **Нгуен Зюи Туан**, А.П. Денисюк. Закономерности горения систем на основе нитратов калия, натрия и бария // III Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности. Материалы конференции - РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, 2018 – С. 46-49.
12. Сизов В.А., Денисюк А.П., **Нгуен Зюи Туан**, Шведова А.В. Влияние углеродных нанотрубок на скорость горения энергонасыщенных материалов // Материалы II Международной научно-практической конференции «Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение». Тезисы докладов - Тамбов, 2017, с. 155-157.