

Национальный исследовательский
Томский государственный университет

Механико-математический факультет
Кафедра физической и вычислительной механики



Материалы

XXII Всероссийской научной конференции
с международным участием

"Сопряженные задачи механики реагирующих сред,
информатики и экологии", посвященной 100-летию
со дня рождения академика Н.Н. Яненко

12 – 14 октября 2021 г.
г. Томск

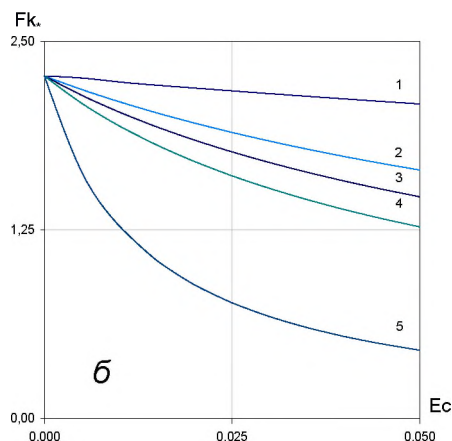


Рисунок 2 Зависимость Fk_* от Ec . $Pr = 18000$,
 $\theta_r = -10.9$, $a - n = -20$, $1 - \beta = 0.054$, $2 - \beta = 0.03$, $3 - \beta = 0.027$, $4 - \beta = 0.025$, $5 - \beta = 0.02$, $6 - \beta = 0.027$,
 $1 - n = -25$, $2 - n = -21$, $3 - n = -20$, $4 - n = -19$, $5 - n = -15$.

Таким образом, для обеспечения условий взрывобезопасности при транспортировке сильновязких химически реагирующих жидкостей в трубопроводах необходимо учитывать возможность инициирования интенсивного химического реагирования теплом, выделяющимся вследствие вязкой диссипации.

Литература

1. Франк-Каменецкий Д.А. *Диффузия и теплопередача в химической кинетике*. М.: Наука, 1987.
2. Матвиенко О.В. Математическое моделирование теплообмена и условий воспламенения турбулентного потока реагирующего газа. *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89, № 1. С. 203-211.
3. Шлихтинг Г. *Теория пограничного слоя*. – М.: Наука, 1974.
4. Дик И.Г., Матвиенко О.В. Теплообмен закрученных потоков с объемным источником тепла *Прикладная механика и техническая физика*. 1989. Т. 30. № 5 (177). С. 113-116.

ЗАЖИГАНИЕ И ГОРЕНИЕ ВЭМ, СОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКИ МЕТАЛЛОВ И БОРА: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

А.Г. Коротких^{1,2}, И.В. Сорокин¹, А.Б. Годунов¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
E-mail: korotkikh@tpu.ru

Современные ВЭМ, используемые в ракетных двигателях, содержат кристаллы окислителя, нитраминол (AP, AN, HMX, RDX), горючие-связующие вещества ГСВ (НТРВ, БК, СКДН и др.) и компоненты энергоемких горючих в виде микроразмерных порошков (МП) алюминия, магния, бериллия, бора и др. [1-3]. Металлические компоненты добавляются в состав классических ракетных твердых топлив для увеличения температуры и общей теплоты горения [4, 5], что обеспечивает прирост удельного импульса двигателя по сравнению с безметалльными топливами.

Алюминий широко используется в качестве металлического горючего в твердых ракетных топливах, благодаря относительно низкой стоимости и достаточно высокой реакционной способности, имеющего удельную теплоту сгорания ~31 МДж/кг. Как правило, частицы порошков Al имеют защитное покрытие (оксидный слой), который снижает скорость их окисления и может приводить к неполному сгоранию металла в быстропотекающих процессах.

Бор широко используется в качестве энергоемкого горючего твердых топлив. Удельная

теплота сгорания бора составляет 58.1 МДж/кг [6], что значительно превышает значение удельной теплоты сгорания алюминия. Однако при нагреве образующийся расплавленный оксидный слой на поверхности частиц бора препятствует его окислению и замедляет процесс воспламенения, что приводит к снижению скорости диффузии окислителя и химических реакций. Кроме того, при окислении частиц бора требуется в два раза больше газообразного окислителя и при его горении возможно образование более крупных частиц агломератов, карбидов бора, что влияет на его полноту сгорания.

В связи с этим практический интерес представляют энергоемкие горючие на основе алюминия (Al-Me, Al-B) в виде сплавов или механосмесей разной дисперсности (от микро- до наноразмерных частиц), которые могут быть использованы в различных компонентных составах ВЭМ. Целью данной работы являлось установление влияния концентрации бора на характеристики зажигания и горения модельных составов ВЭМ на основе AP, AP/AN, ГСВ, содержащих Me/B-порошки разной дисперсности, с применением методик

экспериментального исследования и численного расчета.

Зажигание ВЭМ представляет собой многостадийный процесс, включающий инертный прогрев, разложение и взаимодействие окислителя и ГСВ, содержащего частицы металла, сопровождающиеся интенсивным выделением тепла и появлением пламени. Исследование характеристик зажигания ВЭМ, содержащих порошки металлов, осуществлялось на экспериментальном стенде на основе CO_2 -лазера непрерывного действия РЛС-200. С применением системы измерения, включающей фотодиоды, аналого-цифровой преобразователь сигналов L-card E-14-440, определены время задержки зажигания ВЭМ (по появлению пламени) в зависимости от плотности теплового потока. Термоэлектрическим датчиком Ophir FL400A определены средние и максимальные значения теплового потока излучения, падающего на поверхность исследуемого образца.

Расчет формальных кинетических параметров зажигания ВЭМ (энергии активации E , произведения теплового эффекта реакции на частотный фактор $Q \cdot z$) осуществлялся на основе полученных экспериментальных значений времени задержки зажигания ВЭМ от плотности теплового потока излучения. Методика определения кинетических параметров зажигания топлива основана на применении твердофазной модели зажигания ВЭМ и тепловой теории, предполагающей развитие экзотермических реакций в реакционном слое конденсированной фазы твердого топлива. При лучистом нагреве поверхности топлива окружающая среда является относительно холодной и реакции в газовой фазе заторможены. Соответственно, можно предположить, что основные стадии реакций протекают в прогретом слое образца.

Проведена серия опытов по исследованию характеристик зажигания составов ВЭМ на основе AP/СКДМ/Me и AP/AN/МПВТ/Me. Полученные значения времени задержки зажигания составов ВЭМ (экспериментальные точки) и аппроксимационные степенные зависимости $t_{\text{ign}}(q)$ (линии) от плотности теплового потока представлены на рис. 1.

Время задержки зажигания ВЭМ зависит от реакционной способности, температуры начала и скорости окисления используемых порошков металлов, а также скорости разложения каучука и окислителя. При 2 масс. % содержании бора в ультрадисперсном порошке (УДП) Alex в составе ВЭМ на основе AP/СКДМ времена задержки меняются незначительно и находятся в пределах погрешности измерения.

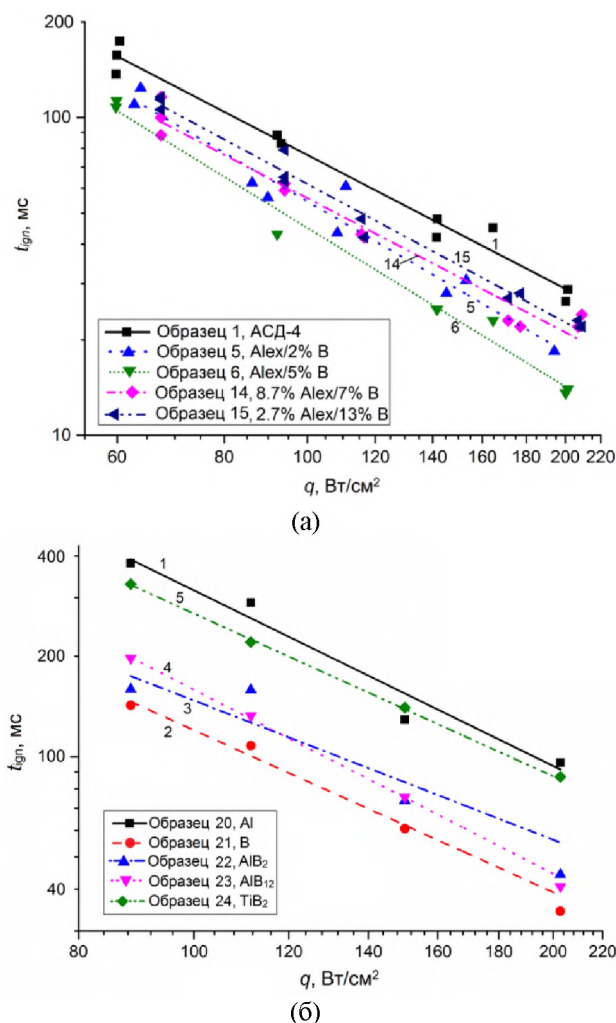


Рис. 1. Время задержки зажигания от плотности теплового потока для составов ВЭМ на основе AP/СКДМ (а) и AP/AN/МПВТ (б), содержащих Me/B-порошки

При 5 масс. % содержании бора в смеси с Alex времена задержки зажигания ВЭМ снижаются на 16–20 % по сравнению с составом ВЭМ, содержащим чистый Alex. Частичное замещение УДП алюминия Alex на 7 и 13 масс. % бора приводит к снижению t_{ign} в 1.4 и 1.3 раза в диапазоне $q = 60\text{--}220$ Вт/см² по сравнению с базовым составом ВЭМ, содержащем μAl . Значительное содержание бора в смеси Alex/B (более 5 масс. %) ВЭМ увеличивает времена прогрева и зажигания топлива по сравнению с составом ВЭМ с Alex за счет снижения реакционной способности алюминиевого горючего и выделения тепла в реакционном слое топлива.

Полная замена алюминия на аморфный бор в составе ВЭМ на основе AP/AN/ МПВТ приводит к существенному снижению времени задержки зажигания в 2.2–2.8 раза в диапазоне плотности теплового потока $q = 90\text{--}200$ Вт/см². Применение МП AlB₂ и AlB₁₂ в составе ВЭМ позволяет снизить времена задержки зажигания в 1.8–2.1 и 2.0–2.1 раза, соответственно, по сравнению с составом ВЭМ, содержащим μAl , при одинаковых условиях зажигания.

С использованием измеренных значений времени задержки зажигания топлив и полученных аппроксимационных зависимостей $t_{\text{ign}}(q)$, рассчитаны значения констант формальной кинетики: энергии активации, произведения теплового эффекта реакции на предэкспонент, а также температуры на границе реакционного и теплового слоя $T_{\text{ign}0}$ и зажигания T_{ign} ВЭМ, которые были использованы в решении численных задач при математическом моделировании зажигания топлива.

В математическом моделировании зажигания ВЭМ рассматривался нестационарный процесс при воздействии лучистым тепловым потоком. Предполагалось, что в период нагрева в поверхностном слое образца топлива происходят химические реакции разложения компонентов с внутренним тепловыделением первого порядка, имеющие зависимость от температуры (по уравнению Аррениуса). Возможные фазовые переходы, связанные с испарением, плавлением и абляцией, а также выгоранием компонентов топлива в период зажигания не учитываются. Теплофизические параметры (плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности) твердого топлива в данной модели являются постоянными и не зависят от температуры нагрева и компонентного состава ВЭМ.

Установлено, что толщина прогретого слоя δ исследуемых составов ВЭМ снижается в 2.2–2.5 раза при увеличении плотности теплового потока с 60 до 200 Вт/см² за счет увеличения температуры на поверхности топлива. Существенное снижение δ характерно для составов ВЭМ, содержащих УДП Alex и Alex/B. Таким образом, на основании выполненных расчетов можно сделать выбор в сторону УДП металла и бора, при использовании которых в составе ВЭМ время задержки и плотность энергии зажигания снижаются по сравнению с ВЭМ, содержащими μAl .

Скорость горения ВЭМ является одной из основных характеристик, определяющая энергетические свойства топлива и удельный импульс двигателя. Метод сгорающих проволочек позволяет определить значения скорости горения ВЭМ, содержащих Ме/B-порошки, при варьировании. В работе измерение скорости горения составов ВЭМ при повышенных давлениях выполнено бомбе постоянного давления, состоящей из герметичного сосуда и баллона высокого давления, заполненного азотом. Эксперименты проводили при комнатной температуре в диапазоне давлений азота 0.5–7.0 МПа. На основе полученных данных определены закон скорости горения и значение степенного показателя для исследуемых составов ВЭМ, содержащих Ме и В.

Установлено, что полная замена μAl на УДП Alex позволяет увеличить скорость горения (в 1.9–6.8 раза) ВЭМ на основе AP/СКДМ в диапазоне изменения давления от 0.5 до 5.0 МПа. Применение смеси УДП Alex/7% В в ВЭМ приводит также к существенному повышению скорости горения (в 2.1–

8.0 раза) ВЭМ. Однако для ВЭМ с УДП Alex/13% В скорость горения увеличивается в 1.6–2.4 раза (по сравнению с ВЭМ с μAl), что в пределах экспериментальной погрешности совпадает со значениями скорости горения для ВЭМ с бором. При этом степенной показатель закона скорости горения для ВЭМ с бором (0.46) и ВЭМ с Alex/13% В (0.40) отличается незначительно.

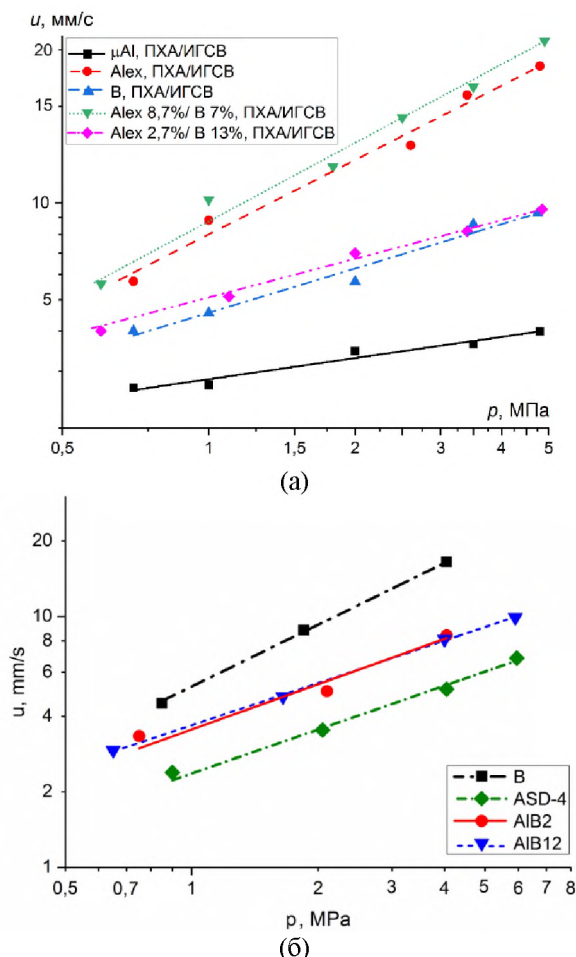


Рис. 2. Скорость горения от давления для составов ВЭМ на основе AP/СКДМ (а) и AP/AN/МПВТ (б), содержащих Ме/B-порошки

Полная замена алюминия μAl на аморфный бор в составе ВЭМ на основе AP/AN/МПВТ приводит к увеличению скорости горения образца в 1.9 – 3.2 раза при изменении давления от 0.5 до 7.0 МПа. При этом показатель степени в законе скорости горения топлива значительно увеличивается с 0.6 до 0.8. При замене алюминия на бориды алюминия AlB_2 и AlB_{12} скорость горения составов ВЭМ увеличивается 1.2 – 1.6 раза в указанном диапазоне давления, однако показатель степени меняется незначительно. Бориды алюминия отличаются малой энергией связи между атомами Al и B (– 67 кДж/моль). Поэтому в зоне химических реакций они могут распадаться на Al и B и отдельно вступать в реакции с кислородом.

С использованием физико-математической модели горения (сформулированной на основе теории горения Беляева–Зельдовича) рассчитаны характеристики горения составов ВЭМ, содержащих

Me/B-порошки, и показано влияние размера частиц и компонентного содержания Al/B на стационарную скорость горения топлив.

Таким образом, анализ полученных экспериментальных и расчетных данных показал, что алюминий, имеющий высокую температуру горения, может способствовать более эффективному сгоранию частиц бора при использовании в ВЭМ на основе AP/СКДМ и AP/AN/МПВТ. Использование смеси УДП Al₆x/7% B в составе ВЭМ на основе AP/СКДМ, снижает времена задержки зажигания топлив в 1.5–2.0 раза в диапазоне плотности теплового потока 60–220 Вт/см². При этом скорость горения ВЭМ увеличивается в 2.1–8.0 раза по сравнению с ВЭМ, содержащим алюминий μ Al.

Применение МП боридов алюминия AlB₂ и AlB₁₂ эффективно для состава ВЭМ на основе AP/AN/МПВТ, которое выражается в существенном снижении времени задержки зажигания (в 1.8–2.1 раза) и плотности энергии зажигания (в 1.9–2.1 раза) в рассматриваемом диапазоне изменения q по сравнению с ВЭМ, содержащим алюминий μ Al, а также в увеличении скорости горения ВЭМ (в 1.2 – 1.6 раза, в диапазоне давлений азота 0.5 – 7.0 МПа), за счет увеличения реакционной способности частиц боридов алюминия и удельного выделения тепла при их окислении и горении.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-03-00588.

Литература

1. Kohga M., Naya T. Thermal decomposition behaviors and burning characteristics of AN/RDX-based composite propellants supplemented with MnO₂ and Fe₂O₃ // Journal of Energetic Materials. 2015. Vol. 33, No. 4. P. 288-304.
2. Elbasuney S., Fahd A., Mostafa H.E. Combustion characteristics of extruded double base propellant based on ammonium perchlorate/aluminum binary mixture // Fuel, 2017. Vol. 208. P. 296-304.
3. Figueiredo P.A., Brojo F.M. Theoretical analysis of ammonium-perchlorate based composite propellants containing small size particles of boron // Energy Procedia, 2017. Vol. 136. P. 202-207.
4. Синдицкий В.П., Чёрный А.Н., Чжо С.Х., Бобылёв Р.С. Горение смесей перхлората аммония с высококалорийными горючими // Успехи в химии и химической технологии, 2016. Т. 30, № 8. С. 18-20.
5. Дорофеев Е.М., Шереметев А.Б., Лемперт Д.Б. Влияние добавок алюминия на удельный импульс ракетных топлив на базе высокоэнтальпийных окислителей, содержащих NO₂- и NF₂-группы // Химическая физика, 2019. Т. 38, № 10. С. 33-40.
6. Яновский Л.С. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / под ред. Л.С. Яновский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 400 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ДИФфуЗИОННОМ ПЛАМЕНИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

А.В. Луценко^{1,3}, Е.Л. Лобода^{1,3}, М.В. Агафонцев^{1,3}, В.В. Рейно³, И.С. Ануфриев²,
Е.П. Копьев², Е.Ю. Шадрин², Ю.А. Лобода^{1,3}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 36

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

³ Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева, г. Томск, Россия
634055, Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

E-mail: anastas_mex_mat434@mail.ru, loboda@mail.tsu.ru, kim75mva@gmail.com, revno@iao.ru,
anufriev@itp.nsc.ru, kopjev.evgeniv@mail.ru, evgen_zavita@mail.ru, ysenchurova@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментальных исследований масштабов турбулентных вихрей в диффузионных пламенах. Проведено сопоставление данных, полученных на основе метода цифровой трассерной визуализации и термографии. Получена хорошая корреляция между размерами крупных вихревых структур в поле скоростей, регистрируемых с помощью PIV-метода, и размерами температурных неоднородностей, регистрируемых по помощи термографии в пламени.

Keywords: ИК-термография, PIV-метод, горение, турбулентность, пламя.

Введение. Процессы горения и распространения пламени в различных технологических устройствах и при природных пожарах, реализуются, как правило, в условиях турбулентности [1]. Турбулентное горение представляет собой нестационарный процесс турбулентного смешения продуктов сгорания со свежей смесью и воспламенение ее вследствие повышения температуры. Решающими факторами становятся турбулентные пульсации и связанная с ними интенсивность турбулентного перемешивания. В зависимости от масштаба турбулентности, являющейся одной из главных характеристик процесса, и величины турбулентных