

УДК 541.11:547.235

СТЕРИЧЕСКИ СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ НОВЕЙШИХ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ЖИДКИХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Sherif Elbasuney

Школа химической технологии, Военный технический колледж, Кобри Элькоба, Каир, Египет
sherif_basuney2000@yahoo.com, s.elbasuney@mtc.edu.eg

Получение стабильных суспензий реакционноспособных металлических порошков в жидком ракетном топливе позволяет повысить удельную тягу. Алюминий в этой связи представляет интерес благодаря своей доступности, стабильности и высокой энтальпии горения (32 000 Дж/г). Частицы сверхтонкого алюминия сферической формы со средним размером 15 мкм получены методом мокрого размола. Поверхность частиц алюминия была эффективно модифицирована полимерным поверхностно-активным веществом и стерически стабилизирована в растворителе (толуол). Органически модифицированный алюминий полностью изменил поверхностные свойства, став вместо гидрофильного гидрофобным, легко переходя из водной среды в органическую. Стабилизированные частицы легко распределялись по жидкому ракетному топливу (гидразину). Влияние частиц алюминия на горение гидразина оценено в расчете по термодинамической программе ИСТ (Институт химической технологии в Германии, 2008). Алюминий повышает температуру горения, кислородный баланс, характеристическую скорость истечения и удельный импульс. Установлено, что оптимальная концентрация алюминия в гидразине составляет 6 % по массе.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, коллоид, модификация поверхности, стерическая стабилизация, горючее на металлической основе.

DOI 10.15372/FGV20190313

ВВЕДЕНИЕ

Максимальная теплота горения жидких углеводородных ракетных топлив обычно ограничена энтальпией образования их продуктов горения CO_2 и H_2O [1, 2]. Поэтому удельная энергия жидких топлив сравнительно мала. Более высокой удельной энергии можно достичь при сжигании металлов, таких как магний, алюминий, бор и титан [3]. Повышение эффективности и тепловыделения при горении смесей металл — кислород объясняется отличными свойствами металлов [4]. При горении металлических топлив выделяется значительное количество тепла — до 70 кДж/г (в случае бериллия) [3] (рис. 1).

Новейшие разработки в области металлсодержащих топлив в значительной степени сфокусированы на ультрадисперсных порошках [5, 6]. Эффективное распределение частиц реакционноспособных металлов по объему жидких

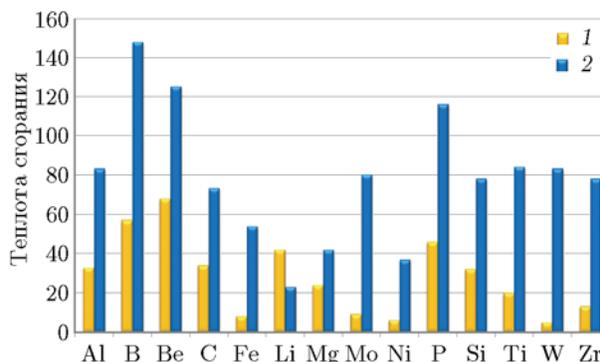
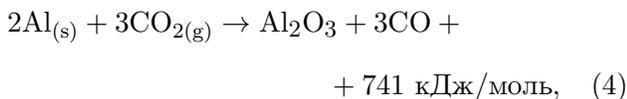
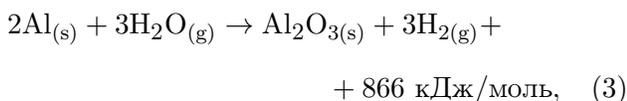
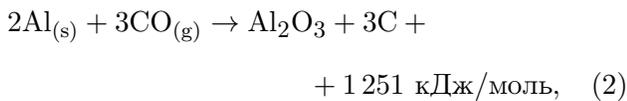
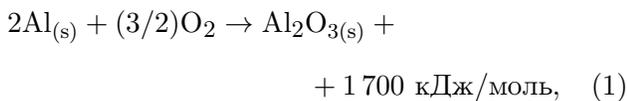


Рис. 1. Массовая (1, кДж/г) и объемная (2, кДж/см³) теплота сгорания металлических топлив

ракетных топлив может оказать сильное влияние на развитие ракетных силовых установок [7, 8]. Сообщалось, что введение частиц бериллия в ракетное топливо привело к повышению удельной тяги на 12 ÷ 18 %, но само топливо становилось при этом токсичным [1, 9]. Бор химически стабилен, и при его окислении выделяется значительное количество тепла, но его широкое применение [4, 10] ограничивает высо-

кая стоимость. Алюминий имеет массу преимуществ по эффективности, стоимости, доступности, безопасности и химической стабильности [11, 12]. Благодаря высокой теплоте сгорания (32 000 Дж/г), он широко применяется в ракетной технике [13, 14]. Алюминий характеризуется уникальной способностью реагировать с инертными газами [12, 15]:



Система экзотермических реакций (1)–(5) представляет пути вторичного горения с соответствующими скоростями [4, 16, 17]. Следовательно, выделяется большое количество тепла при минимальном потреблении кислорода [2, 16]. Благодаря увеличенной межфазной поверхности и реакционной способности, частица ультрадисперсного алюминия может инициировать процесс вторичного горения [4, 18–20]. Однако ожидаемые выгоды применения алюминия пока еще полностью не использованы [21]. В настоящее время самым распространенным топливом для жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является гидразин [1], наиболее эффективный по сравнению с другими топливами [22]. Он спонтанно воспламеняется в присутствии азотных кислот [1, 23]. Поэтому правильное диспергирование (образование взвеси) в гидразине частиц ультрадисперсного алюминия, возможно, повысит теплоту горения этой смеси и, следовательно, существенно увеличит удельную тягу [24, 25].

Получение стабильного коллоидного раствора частиц металла в жидком ракетном топливе является решающим моментом для улучшения удельной тяги [26, 27]. Для этого следует

получить монодисперсные частицы, выделить их и стабилизировать в виде взвеси в жидком ракетном топливе [28]. Стабилизация частиц металла вполне осуществима, для предотвращения коагуляции их необходимо покрыть органическим слоем, который образует стерическое (пространственное) препятствие [29, 30]. Защитный поверхностный слой должен быть достаточной толщины (обычно более 3 мкм), чтобы максимально близкое расстояние между ними было вне действия вандерваальсовых сил [31–33]. Более подробная информация о защите наночастиц путем модификации их поверхности различными покрытиями содержится в работах [34–36].

В данной работе исследовалось использование металлизированного гидразина в качестве топлива для ЖРД и безводной дымящейся азотной кислоты в качестве окислителя. Введение частиц алюминия приводило к повышению температуры горения и кислородного баланса. Установлено, что массовая концентрация алюминия в гидразине 6 % обеспечивает оптимальные характеристики, в том числе удельный импульс (I_{sp}) и характеристическую скорость истечения продуктов сгорания (C^*). Баллистические характеристики можно улучшить путем увеличения расхода окислителя. Следовательно, можно достичь высоких характеристик при более низкой скорости расхода топлива и/или окислителя. Это позволяет увеличить дальность полета ракеты без изменения аэродинамики самой ракеты.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1.1. Материалы

В качестве исходного материала для приготовления ультрадисперсного алюминия был взят коммерческий порошок алюминия с диаметром частиц 50 мкм (Alpha chemika, Индия), в качестве среды для измельчения алюминия — этанол (97 %, Fisher). Для модификации поверхности частиц алюминия использовался сополимер этилена и акриловой кислоты (Aldrich). Для ионизации карбоксильных групп (закрепляющие группы) в целях фиксации полимера на поверхности применялась мочевиная (Aldrich). Для выделения частиц алюминия с модифицированной поверхностью использовался толуол (97 %, Fisher). Модифицированный алюминий вводился в гидразин.

1.2. Усовершенствование ультрадисперсных частиц алюминия

Коммерческий алюминий разделялся по размеру частиц с помощью машины для просеивания Retsch VS1000. Отдельно были отобраны частицы размером ≤ 32 мкм. Частицы алюминия были диспергированы в 205 мл этанола. Коллоидные частицы размалывались в шаровой мельнице Retch 100 в течение 12 ч. Роль этанола как среды для размола состояла в рассеивании тепла, выделяющегося в процессе измельчения, и в препятствии дальнейшему окислению ультрадисперсного алюминия. Размер частиц определялся на сканирующем электронном микроскопе Zeiss EVO-10 (Carl Zeiss Corporation), снабженном тремя видами датчиков: датчик вторичных электронов, датчик обратнорассеянных электронов и рассеивающий спектрометр рентгеновского поглощения. Для оценки устойчивости алюминия к окислению в процессе измельчения изучалась кристаллическая фаза методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра D8 Advance (Burker Corporation) в диапазоне углов $2\theta = 5 \div 65^\circ$.

1.3. Модификация поверхности частиц алюминия

Сополимер этилена и акриловой кислоты способен связывать многочисленные участки поверхности, образуя прочный адсорбционный слой [37–39]. Именно структура из адсорбированного полимера лежит в основе стерического барьера [40]. Адсорбированный полимер включает в себя: участки на границе раздела фаз твердое вещество — жидкость (шлейфы); участки, соединенные с обоих концов (петли); участки, соединенные с одного конца (хвосты) [41]. Петли и хвосты образуют не вступившие во взаимодействие группы [40]. Изменение соотношения между количеством шлейфов, петель и хвостов определяет толщину адсорбированного слоя [42]. На рис. 2 схематично показаны конформации на границе раздела фаз твердое вещество — жидкость.

Адсорбированный барьер не могут преодолеть вандерваальсовы силы притяжения между частицами [44, 45]. Сополимер этилена и акриловой кислоты растворяли в 200 мл толуола. Затем 1 г частиц алюминия диспергировали в течение 20 мин в растворе сополимера с помощью ультразвукового гомогенизатора (Heschler). Этот процесс обязателен и представляет собой попытку разбить любые агрега-

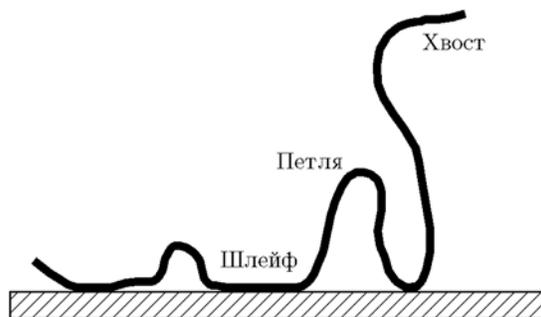
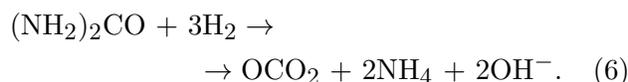


Рис. 2. Схема адсорбции молекулы полимера на поверхности раздела твердой и жидкой фаз [43]

ты и улучшить дисперсию коллоидных частиц перед тем, как модифицировать их поверхность. Полярные группы полимера должны быть ионизированы, для того чтобы присоединиться к поверхности частиц [33, 41]. Достигалось это с помощью мочевины. Раствор мочевины (0.003 М) добавляли к предварительно приготовленному коллоидному раствору в толуоле. Коллоидная смесь толуола и воды нагревалась в гидротермальной ячейке при гомогенизации в ультразвуковой ванне (Retsch UR1) в течение 40 мин. Мочевина подвергалась гидролизу с образованием гидроксильных ионов по реакции [46]



Реакция гидролиза протекает медленно и ускоряется при температуре кипения воды. Образующиеся гидроксильные анионы ионизируют слабые карбоксильные группы сополимера этилена и акриловой кислоты, что улучшает эффективность покрытия поверхности. В конце концов коллоидный раствор разделяется на две фазы — органическую и водную (внизу). Модифицированные полимером частицы алюминия полностью переходят из водной в органическую фазу. Полнота прилегания полимера к поверхности частиц алюминия подтверждена ИК-спектроскопией с фурье-преобразованием (FTIR) (8400, Shimadzu).

1.4. Оценка мощности металлизированного гидразина

Влияние частиц алюминия на параметры горения гидразина, в том числе на кислородный баланс, температуру горения, скорость истечения продуктов сгорания и удельный импульс, было оценено с помощью программы

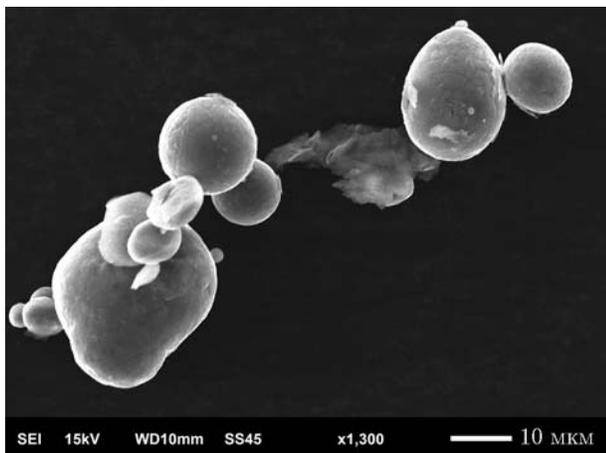


Рис. 3. Микроснимок (СЭМ) частиц алюминия, полученных методом мокрого измельчения

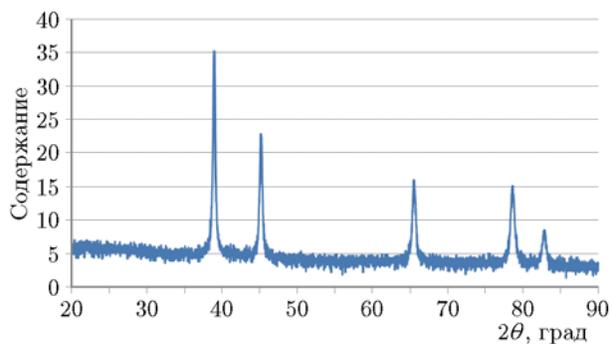


Рис. 4. Дифрактограмма частиц алюминия

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Определение параметров частиц алюминия

ICT Thermodynamic Code (Институт химической технологии в Германии, 2008). Эта программа основана на расчете химического равновесия и модели стационарного горения. Расчет проводится двумя методами — по установившемуся и по смещающемуся равновесию. В работе применялась модель установившегося равновесия, основанная на допущении, что состав продуктов сгорания на выходе из сопла идентичен составу внутри камеры сгорания. Исследованы составы с различным массовым содержанием алюминия в гидразине. Расчеты проводились для условий работы ЖРД, использующего гидразин в качестве топлива (расход 1.05 кг/с) и безводную дымящуюся азотную кислоту (75 % HNO_3 и 25 % N_2O_4) в качестве окислителя (расход 3.4 кг/с).

Морфология модифицированных частиц алюминия изучалась с использованием электронного сканирующего микроскопа (СЭМ). Как видно на рис. 3, все частицы имеют сферическую форму со средним диаметром 15 мкм.

Кристаллическая фаза модифицированного алюминия была исследована с помощью дифракционного рентгеновского анализа. На дифрактограмме ясно видны четкие острые пики, которые согласуются с данными Объединенного комитета по стандартам дифракции порошков из Международного центра по дифракционным данным (рис. 4). Дифрактограмма подтвердила, что при размалывании не происходит ни гидролиза, ни окисления. Применяемый подход к размалыванию частиц алюминия с хорошей кристаллической структурой

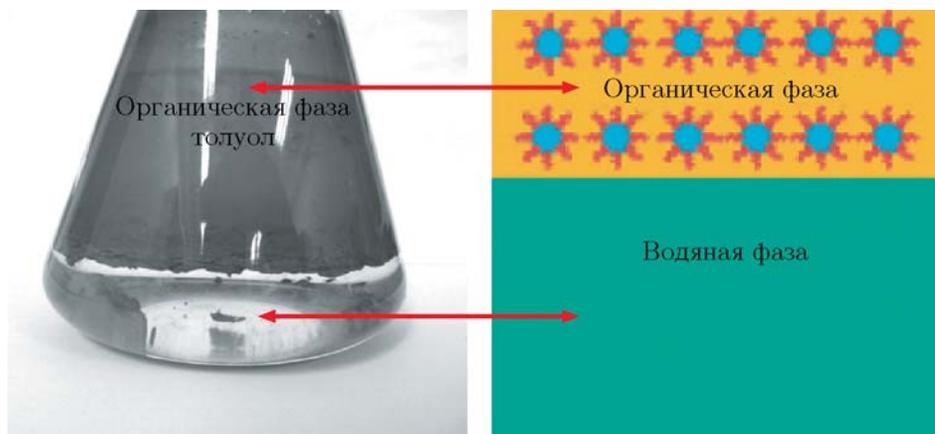


Рис. 5. Экстракция стерически стабилизированных частиц алюминия в органический слой

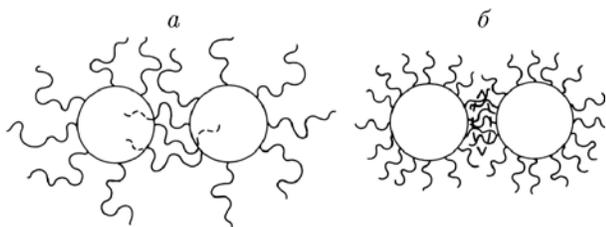


Рис. 6. Схема стерической стабилизации за счет ограничения объема (а) и осмотического эффекта (б) [49]

предохраняет их от образования дефектов и внедрения примесей. Модифицированные полимером частицы алюминия, как было показано, полностью изменили поверхностные свойства, став гидрофобными. Кроме того, они приобрели способность эффективно переходить из водной в органическую среду (рис. 5).

Адсорбированный полимер на поверхности частиц стабилизирует их путем объемного ограничения, предотвращающего сближение (рис. 6,а) и за счет осмотического эффекта, благодаря которому молекулы растворителя вытесняются из пространства между сблившимися частицами алюминия. Осмотическое давление приводит к всасыванию жидкости в пространство между частицами, что увеличивает энергетический барьер, необходимый для агломерации частиц [47–49] (рис. 6,б). Стерическая стабилизация обеспечивает равномерное распределение частиц в жидком топ-

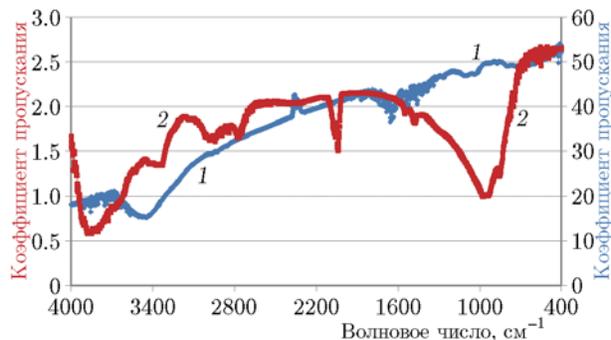


Рис. 7. Сравнение ИК-спектров частиц алюминия, покрытых сополимером этилена и акриловой кислотой (2), и непокрытого алюминия (1)

ливе, препятствует образованию хлопьев с течением времени. FTIR-спектроскопия модифицированных частиц алюминия показала присоединение карбоксильных групп к поверхности частиц. Органически модифицированные частицы отличались усиленным поглощением в ИК-диапазоне по сравнению с непокрытым алюминием (рис. 7).

Различие ИК-спектров покрытых полимером частиц и непокрытых частиц проявляется благодаря наличию карбоксильной группы сополимера (C=O и продольным колебаниям связи O—H) [50]. Основная особенность алюминия заключается в его способности легко окисляться кислородом воздуха с образованием плотного слоя оксида алюминия (Al_2O_3). Этот

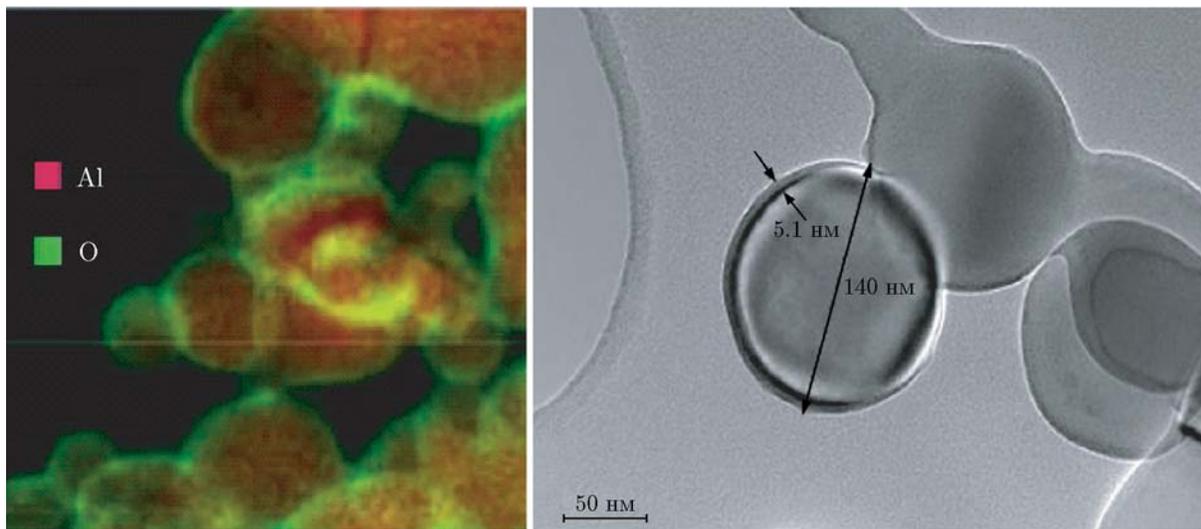


Рис. 8. Наночастица алюминия со слоем Al_2O_3 [12]

инертный слой защищает металл от дальнейшего окисления (рис. 8) [12]. Несмотря на это, при уменьшении размера частицы их реакционноспособность усиливается и сохраняется длительное время [4, 51].

2.2. Теоретическая оценка баллистических характеристик

Введение алюминия в гидразин приводит к улучшению кислородного баланса и резкому подъему температуры горения (рис. 9). Улучшение характеристик горения объясняют высокой энтальпией горения алюминия (32 000 Дж/г). Алюминий потребляет меньше кислорода и при этом выделяет больше тепла при горении по сравнению с углеводородными топливами. Все это обеспечивает улучшенный кислородный баланс.

Основной критерий, который необходимо оценить и измерить, — это удельный импульс и характерная скорость истечения продуктов горения [52]. Удельный импульс представляет собой тягу, приложенную к летательному аппарату, на единицу массы топлива. Алюминий не только повышает температуру горения и кислородный баланс, но и образует металлизированные продукты сгорания (Al_2O_3). Сообщалось [1], что металлизированные газовые продукты сгорания повышают удельный импульс. Поэтому алюминий позитивно влияет как на скорость истечения продуктов сгорания, так и на удельный импульс (рис. 10).

Добавка алюминия 6 % (по массе) обеспечивает наивысшую характеристическую скорость истечения. При большей концентрации алюминия температура горения продолжает расти, что может стать разрушительным для

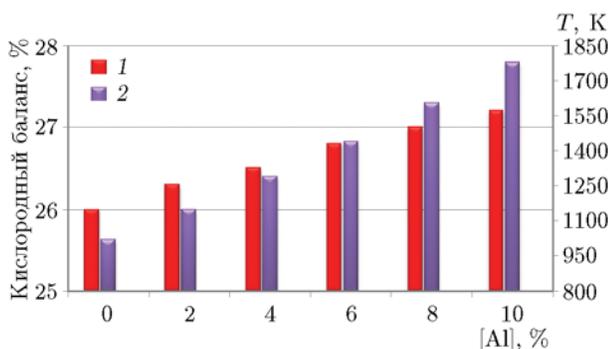


Рис. 9. Влияние массового содержания алюминия на кислородный баланс (1) и температуру горения (2)

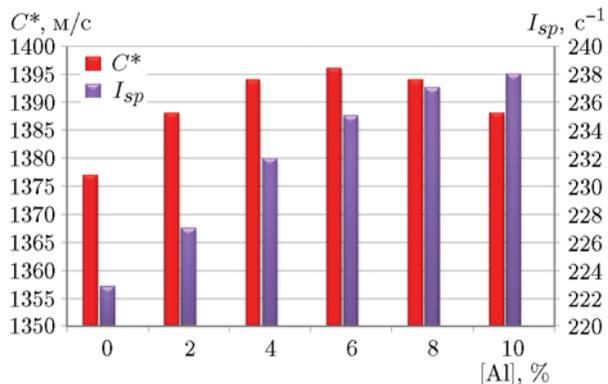


Рис. 10. Воздействие алюминия на характеристики горения гидразина

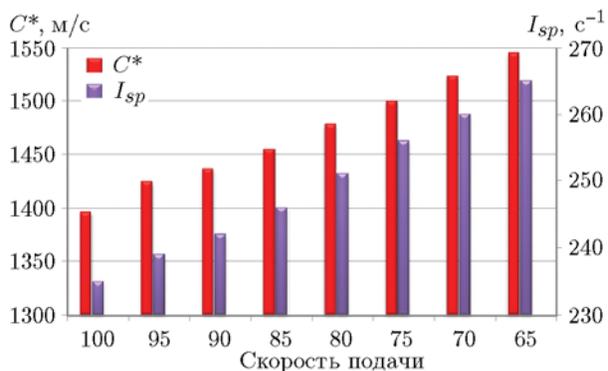


Рис. 11. Влияние скорости подачи окислителя на характеристики горения металлизированного гидразина при массовой концентрации алюминия 6 %

материалов двигателя. Однако улучшенный кислородный баланс при добавке 6 % алюминия способен снизить скорость подачи окислителя. При этом, как показало исследование, характеристическая скорость истечения продуктов и удельный импульс продолжают расти (рис. 11).

Окислитель обычно используется для охлаждения камеры сгорания, и этот важный фактор необходимо учитывать для установления приемлемого уровня охлаждения и баллистических характеристик. Данная работа демонстрирует современный уровень применения металлизированных жидких ракетных топлив. Диапазон характеристик горения может быть расширен при минимальном изменении систем подачи и аэродинамической формы существующих ракетных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сферические частицы алюминия среднего размера 15 мкм были получены путем влажно-го размола. Поверхность частиц была модифицирована органическим покрытием. В результате частицы коренным образом изменили свои поверхностные свойства, став гидрофобными вместо гидрофильных. Наблюдался полный переход таких частиц из водной среды в органический растворитель. Рассеяние и стабилизация частиц алюминия в гидразине достигалась благодаря стерическим эффектам. Введение частиц алюминия позволило улучшить характеристики горения, включая удельный импульс и характеристическую скорость истечения продуктов сгорания. При этом стало возможным снизить скорость подачи окислителя и еще больше увеличить удельный импульс.

Авторы выражают благодарность Военному техническому колледжу за финансирование исследовательского проекта «Новые металлизированные жидкие ракетные топлива».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rocket Propulsion Elements** / G. P. Sutton, O. Biblazi (Eds). — 7th ed. — New York: John Wiley & Sons, 2001.
2. **Dreizin E. L.** Metal-based reactive nanomaterials // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2009. — V. 35, N 2. — P. 141–167.
3. **Yen N. H., Wang L. Y.** Reactive metals in explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2012. — V. 37, N 2. — P. 143–155.
4. **Chemistry of Pyrotechnics Basic Principles and Theory** / J. Conkling, C. Mocella (Eds). — 2nd ed. — London: CRC, 2012.
5. **Bönnemann H., Richards R. M.** Nanoscopic metal particles — synthetic methods and potential applications // *Eur. J. Inorg. Chem.* — 2001. — N 10. — P. 2455–2480.
6. **Zhi J. et al.** Research on the combustion properties of propellants with low content of nano metal powders // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2006. — V. 31, N 2. — P. 139–147.
7. **Kinge S., Bönnemann H.** Optimization of colloidal nanoparticle synthesis via $\text{NR}_4(\text{BEt}_3\text{H})$ reduction // *Appl. Organomet. Chem.* — 2004. — V. 19, N 6. — P. 750–758.
8. **Energetic Nanomaterials Synthesis, Characterization, and Application** / V. E. Zarko, A. A. Gromov (Eds). — Amsterdam: Elsevier, 2016.
9. **Koch E.-C., Klapötke T. M.** Boron-based high explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2012. — V. 37, N 3. — P. 335–344.
10. **Agrawal J. P.** High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Ch. 5: Pyrotechnics. — Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. — P. 331–412.
11. **Sadek R. et al.** Novel yellow colored flame compositions with superior spectral performance // *Defence Technol.* — 2017. — V. 13, N 1. — P. 33–39.
12. **Mohamed A. K., Mostafa H. E., Elbasuney S.** Nanoscopic fuel-rich thermobaric formulations: Chemical composition optimization and sustained secondary combustion shock wave modulation // *J. Hazard. Mater.* — 2016. — V. 301. — P. 492–503.
13. **Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А.** Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // *Физика горения и взрыва.* — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115.
14. **Elbasuney S., Fahd A., Mostafa H. E.** Combustion characteristics of extruded double base propellant based on ammonium perchlorate/aluminum binary mixture // *Fuel.* — 2017. — V. 208. — P. 296–304.
15. **Талавар М. Б., Сивабалан Р., Аннияпан М., Горе Г. М., Астана С. Н., Гандхе Б. Р.** Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов // *Физика горения и взрыва.* — 2007. — Т. 43, № 1. — С. 72–85.
16. **Krier H. J., Peucker J. M., Glumac N.** Aluminum combustion in aluminized explosives: Aerobic and anaerobic reaction // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. — Orlando, Florida, 2011.
17. **McNesby K. L. et al.** Afterburn ignition delay and shock augmentation in fuel rich solid explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2010. — V. 35, N 1. — P. 57–65.
18. **Brousseau P., Anderson C. J.** Nanometric Aluminum in Explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2002. — V. 27, N 5. — P. 300–306.
19. **Trzcieski W. A. et al.** Investigation of blast performance and solid residues for layered thermobaric charges // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2014. — V. 39, N 1. — P. 40–50.
20. **Trzcieski W. A., Maiz L.** Thermobaric and enhanced blast explosives — properties and testing methods // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2015. — V. 40, N 4. — P. 632–644.
21. **Elbasuney S. et al.** Stabilized super-thermite colloids: A new generation of advanced highly energetic materials // *Appl. Surf. Sci.* — 2017. — V. 419. — P. 328–336.
22. **Feng S. et al.** Experimental studies the burning process of gelled unsymmetrical dimethylhydrazine droplets under oxidant convective conditions // *Fuel.* — 2013. — V. 111. — P. 367–373.

23. **Sforza P. M.** Theory of Aerospace Propulsion. — 2nd ed. — Butterworth-Heinemann, 2017. — Ch. 11. — P. 525–616.
24. **Kettwich S. C. et al.** Thermal investigations of nanoaluminum/perfluoropolyether core-shell impregnated composites for structural energetics // *Thermochim. Acta.* — 2014. — V. 591. — P. 45–50.
25. **Allen C. M., Lee T.** Energetic-nanoparticle-enhanced combustion of liquid fuels in a rapid compression machine // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Amer. Inst. of Aeronautics and Astronautics. — Orlando, Florida, 2009.
26. **Maggi F. et al.** Activated aluminum powders for space propulsion // *Powder Technol.* — 2015. — V. 270, pt A. — P. 46–52.
27. **Richards R., Bönnemann H.** Synthetic approaches to metallic nanomaterials // *Nanofabrication Towards Biomedical Applications.* — Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. — P. 525–616.
28. **Zhang B. et al.** Enhanced reactivity of boron, through adding nano-aluminum and wet ball milling // *Appl. Surf. Sci.* — 2013. — V. 286. — P. 91–98.
29. **Stabilization of Colloidal Dispersions by Polymer Adsorption** / T. Sato, R. Ruch (Eds). — New York: Marcel Dekker, 1980.
30. **Elbasuney S.** Dispersion characteristics of dry and colloidal nano-titania into epoxy resin // *Powder Technol.* — 2014. — V. 268. — P. 158–164.
31. **The Effect of Polymers on Dispersion Properties** / F. Tadors (Ed.). — New York: Academic Press, 1982.
32. **Boisvert J. P. et al.** Dispersion of alumina-coated TiO₂ particles by adsorption of sodium polyacrylate // *Colloids and Surfaces F: Physicochem. Eng. Aspects.* — 2001. — V. 178, N 1-3. — P. 187–198.
33. **Baraton M.** Synthesis, Functionalization and Surface Treatment of Nano Particles. — ASP, 2003.
34. **Elbasuney S.** Sustainable steric stabilization of colloidal titania nanoparticles // *Appl. Surf. Sci.* — 2017. — V. 409. — P. 438–447.
35. **Elbasuney S., Mostafa H. E.** Synthesis and surface modification of nanophosphorous-based flame retardant agent by continuous flow hydrothermal synthesis // *Particuology.* — 2015. — V. 22. — P. 82–88.
36. **Elbasuney S., Mostafa S. F.** Continuous flow formulation and functionalization of magnesium di-hydroxide nanorods as a clean nano-fire extinguisher // *Powder Technol.* — 2015. — V. 278. — P. 72–83.
37. **Pettersson A. et al.** Electrosteric stabilization of Al₂O₃, ZrO₂, and 3Y-ZrO₂ suspensions: Effect of dissociation and type of polyelectrolyte // *J. Colloid Interface Sci.* — 2000. — V. 228, N 1. — P. 73–81.
38. **Coating Technology Handbook** / T. Vernardakis, D. States, A. Tracton (Eds). — New York: Marcel Dekker, 2001.
39. **Zhu F. et al.** Surface modification of TiO₂ nanoparticles through plasma polymerization of acrylic acid // *Chem. Phys. Lett.* — 2006. — V. 423, N 4-6. — P. 270–275.
40. **Polymers at Interfaces** / J. Fleer, A. Cohen, M. Scheutjens (Eds). — London: Chapman & Hall, 1993.
41. **Farrokhpay S.** Interaction of Polymeric Dispersants with Titania Pigment Particles. — Adelaide, South Australia, 2004.
42. **Farrokhpay S.** A review of polymeric dispersant stabilisation of titania pigment // *Adv. Colloid Interface Sci.* — 2009. — V. 151, N 1-2. — P. 24–32.
43. **Yu X., Somasundaran P.** Role of polymer conformation in interparticle-bridging dominated flocculation // *J. Colloid Interface Sci.* — 1996. — V. 177, N 2. — P. 283–287.
44. **Kim S. J., McKean D. E.** Aqueous TiO₂ suspension preparation and novel application of ink-jet printing technique for ceramics patterning // *J. Mater. Sci. Lett.* — 1998. — V. 17, N 2. — P. 141–144.
45. **Industrial Polymer Handbook** / F. Buchholz, E. Wilks (Eds). — Wiley, 2001. — V. 1.
46. **Analytical Chemistry** / G. D. Christian (Ed.). — 6 ed. — Wiley India Pvt. Ltd, 2007.
47. **Gebhardt J. E., Fuerstenau D. W.** Adsorption of polyacrylic acid at oxide/water interfaces // *Colloids and Surfaces.* — 1983. — V. 7, N 3. — P. 221–231.
48. **Emergent Process Methods for High-Technology Ceramics** / R. Davis, H. Palmour, R. Porter (Eds). — New York: Plenum Press, 1984. — V. 17.
49. **Scheutjens J. M. H. M., Fleer G. J.** Effect of polymer adsorption and depletion on the interaction between two parallel surfaces // *Adv. Colloid Interface Sci.* — 1982. — V. 16, N 1. — P. 361–380.
50. **Principles of Instrumental Analysis** / D. Skog, F. Hollered (Ed.). — Philadelphia: Sanders Golden, 1999.
51. **Jian G. et al.** Nanothermite reactions: Is gas phase oxygen generation from the oxygen carrier an essential prerequisite to ignition? // *Combust. Flame.* — 2013. — V. 160, N 2. — P. 432–437.
52. **Yaman H., Çelik V., Değirmenci E.** Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants // *Fuel.* — 2014. — V. 115. — P. 794–803.

Поступила в редакцию 09.04.2018.

После доработки 15.06.2018.

Принята к публикации 12.09.2018.