

УДК 62-529

*Васянькин А.В.,
ведущий инженер-экспериментатор сектора
систем управления и регистрации параметров испытаний
испытательного отдела 754 научно-испытательного комплекса 751
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»
Россия, г. Химки*

ИОННЫЕ ПРОПЕЛЛЕНТЫ – ЭКОЛОГИЧНАЯ АЛЬТЕРНАТИВА ТОКСИЧНОМУ РАКЕТНОМУ ТОПЛИВУ

***Аннотация:** в статье рассмотрены различные ионные жидкости на основе экологически чистых монотоплив, содержащие в основном нитрат гидроксиламмония, гидразин и динитрамид аммония, представлен их состав, физические свойства, эксплуатационные характеристики, токсичность, совместимость с различными материалами, методы воспламенения и возможности использования в аэрокосмической промышленности.*

***Ключевые слова:** топливо, ионные жидкости, нитрат гидроксиламмония, гидразин, динитрамид аммония.*

***Annotation:** the paper considers various energetic ionic liquids based on eco-friendly monofuels consisting mainly of hydroxylammonium nitrate, hydrazine and ammonium dinitramide. Here we present their composition, physical properties, performance characteristics, toxicity, compatibility with diverse materials, ignition methods and possible use in the aerospace industry.*

***Key words:** fuels, energetic ionic liquids, hydroxylammonium nitrate, hydrazine, ammonium dinitramide.*

Вопрос разработки и применения экологически чистого топлива получил массовую популярность относительно недавно [1, с. 35]. Энергетические ионные жидкости (смеси ионного топлива с окислителем), разрабатываемые на протяжении нескольких десятилетий, остаются в фокусе внимания исследователей благодаря своим прекрасным характеристикам, включающим высокий удельный импульс и гибкость в выборе различных способов воспламенения. Они состоят из солей окислителя, растворённых в водных растворах, называемых ионными жидкостями, смешанных с ионным топливом или молекулярным топливом, образуя предварительно смешанное топливо (энергетическое ионное жидкое монотопливо). Добавление топливного компонента повышает характеристики топливной смеси за счёт снижения высокой адиабатической температуры бинарного водного раствора ионной жидкости и дальнейшей стабилизации процесса сгорания. Как правило, для регулирования скорости горения монотоплива используется метанол, а в качестве стабилизатора, наряду с другими стабилизирующими добавками, нитрат аммония.

Учёными исследуются новые добавки-промоторы из азидоэфиров. Предположительно, они увеличат общую энергию и позволят улучшить эксплуатационные характеристики жидких ионных топлив [2, с. 1515-1520]. К примеру, максимальный удельный импульс 78 % масс. динитрамида аммония (ДНА) в ионной жидкости составляет 192 с, а при добавлении в смесь метанола (молекулярного топлива) значение удельного импульса возрастает до 252 с, как и в случае нетоксичного аналога гидразина – топлива LMP-103S (63,4 % масс. ДНА, 25,4 % масс. воды и 11,2 % масс. метанола) при степени расширения площади сопла, равном 50 [3, с. 1-24].

История монопропеллентов на основе нитрата гидроксил-аммония (НГА) началась с разработки жидких пороховых газов LP1846, LP1845 и LP1898 в 90-е годы. Первые два из этих водных растворов основаны на НГА с триэтанол-нитратом аммония, а третий – на НГА с диэтил-гидроксил-аммиачной

селитрой. Непригодность данных видов топлива для относительно низкого давления сгорания и их высокая температура сгорания (~ 2230 °С) привели к разработке современного топлива AF-M315E (Air Force Monopropellant 315E) на основе экологичного топлива НГА для космических миссий. При разложении оно создаёт адиабатическую температуру пламени ~ 1830 °С, что намного выше, чем у гидразина (~ 930 °С), и в сравнении с гидразином, обеспечивает увеличение удельного импульса на 13 %, плотности на – 63%. Смесь максимально компактная, создаёт более сильную тягу, остаётся пригодной при низких температурных диапазонах. Пропеллент обладает высокой растворимостью и незначительным давлением паров всех составляющих его растворов, что способствует низкой токсичности и высокой стабильности смеси при различных уровнях температуры, а также обеспечивает безопасность использования на открытом воздухе. Недостатком AF-M315E, как и новейших современных экологически чистых топлив, является относительно высокая температура пламени, что затрудняет быстрое производство экономичных и упрощённых двигателей, особенно для индустрии микро- и наноспутников.

Каталитическое разложение AF-M315E требует более высокой температуры предварительного нагрева по сравнению с гидразином, потребляющим до 15 кДж энергии, а номинальная начальная температура предварительного нагрева слоя катализатора составляет 315 °С, воспламенение зарегистрировано при температуре 400 °С.

Примечательно экологически чистое топливо на основе НГА – SHP163, состоящее из 73,6 % масс. НГА, 3,9 % масс. нитрата аммония, 16,3 % масс. метанола и 6,2 % масс. воды [4, с. 1080-1083]. Значение плотности составляет $1,4$ г/см³, у топлива высокий объёмный удельный импульс, равный 396 г/см³, что выше, чем у AF-315E (при давлении в камере 0,7 МПа и степени расширения сопла 50: 1 в условиях замерзания). Температура пламени довольно высокая: ~ 2130 °С, воспламеняется пропеллент только при

использовании предварительно нагретого слоя катализатора под 1,0 МПа. SHP163 демонстрирует эксплуатационную стабильность и достаточный уровень безопасности, что делает его привлекательным для применения в качестве экологически чистого и безопасного жидкого топлива.

Компания IHI AEROSPACE Co., Ltd. (Япония) на протяжении более 12-ти лет занимается разработкой семейства высокопроизводительных экологически чистых недетонирующих пропеллентов HNP209, HNP221 и HNP225 основе НГА, гидразина, метанола и воды. По объёмным удельным импульсам они превосходят гидразин, примечательна относительно низкая адиабатическая температура пламени по сравнению с вышеуказанными энергетическими ионными монотопливами. Теоретический удельный импульс HNP209 составляет ~ 260 с при самой высокой температуре горения ~ 1630 °С, а удельный импульс HNP221 и HNP225 – 241 и 213 с соответственно (при давлении в камере 1,0 МПа и степени расширения 100: 1) [5, с. 4427].

Топливо HNP225 входит в группу с наименьшей адиабатической температурой пламени ~ 730 °С, что меньше, чем у гидразина (~ 930 °С), у HNP221 показатель составляет ~ 1130 °С [5, с. 4427.]. Данное свойство позволило японской компании разработать недорогие двигатели, поскольку были закрыты вопросы использования жаростойких материалов или сложного охлаждения камеры сгорания двигателя. Топлива воспламеняются благодаря каталитическому разложению. Так, соответствующие катализаторы для HNP221 и HNP225 экспериментально продемонстрировали отличную реакцию и стабильность давления сгорания по сравнению с гидразином в непрерывном или в импульсном режимах, при температурах предварительного нагрева от 200 и 300 °С соответственно.

GEM (зелёное электрическое монотопливо) – новая энергетическая ионная жидкость, состоящая из НГА, нитрата аммония, 2,2'-дипиридила, 1,2,4-триазола, 1Н-пирозола и воды, разработанная компанией Digital Solid State Propulsion (США) как превосходная замена AF-M315E. Данный вид топлива

может использоваться в многорежимной двигательной установке, электрически воспламеняться без использования тяжёлых каталитических слоёв, а также обладает значительно большим объёмным удельным импульсом по сравнению с AF-M315E и зелёными монотопливами LMP-103S на основе ДНА, разработка которых началась ещё в 1997 году.

Основные семейства монотоплив на основе ДНА – FLP-103, 105, 106, 107 и LMP-103S. LMP-103S и FLP-106 наиболее изучены, а FLP-103 использовался в космической демонстрации работы высокопроизводительной зелёной двигательной установки НРGP спутника Mango PRISMA в июне 2010 года. В состав данной смеси входили различные виды топлива, в том числе метанол, монометилформамид и диметилформамид. Позднее метанол был признан несовместимым с ДНА (совместимость достигается добавлением аммиака с целью повышения рН смеси). Семейство FLP обладает наилучшими характеристиками по сравнению с LMP-103, однако объёмный удельный импульс монотоплив на основе ДНА, указанных в данной работе, ниже, чем у AF-M315E (391 г/см³).

Топлива на основе ДНА не только воспламеняются посредством предварительно нагретых каталитических слоёв, они могут воспламеняться электрически или с помощью термического воспламенения. Пропеллент можно воспламенить с помощью резистивного нагрева путём пропускания электрического тока через топливо за менее, чем 2 миллисекунды, наименьшее количество электроэнергии для успешного воспламенения составит 20 Дж. Успешным был эксперимент зажигания LMP-103S и FLP-106 от калильной свечи. Основные преимущества LMP-103S и семейства FLP по сравнению с AF-M315E заключаются в более низкой температуре сгорания (что позволяет использовать материалы с довольно низкой температурой плавления, и упрощённую конструкцию для разработки двигателя); гибкости при использовании различных методов воспламенения (что позволяет разработать новые конструкции двигателей на монотопливе).

Таким образом, при выборе топлива для конкретного применения следует руководствоваться несколькими принципами. К примеру, рассматривая пропелленты на основе НГА и ДНА для таких миссий, как импульсные орбитальные манёвры, требующих высокой тяги, основной проблемой могут стать ограничения габаритов летательного аппарата, что приводит к необходимости оптимального использования места на борту и к миниатюризации компонентов. С целью преодоления данных ограничений с учётом сохранения высокой производительности, важно выбрать топливо с более высоким объёмным удельным импульсом, следовательно, такие пропелленты, как AF-M315E и LMP-103S, являются предпочтительными экологически чистыми монотопливами для космических миссий, основная задача которых – повышение производительности и оптимизация размеров.

Использованные источники:

1. Козловский Л.Н., Барышев С.А. Водные растворы перекиси водорода – экологически чистые пропелленты с 85-летней историей эксплуатации // XXIX МНПК «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Пенза, 10 февраля 2023. – С. 35.
2. Claßen M., Heimsch S. B., Klapötke T. M. Synthesis and Characterization of New Azido Esters Derived from Malonic Acid // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2019. – Т. 44. – № 12. – С. 1515-1520.
3. Mayer A., Wieling W. Green propulsion research at TNO the Netherlands // Transactions on aerospace research. – 2018. – Т. 2018. – № 4 – С. 1-24.
4. Hori K. et al. НГА-Based Green Propellant, SHP163–Its R&D and Test in Space // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2019. – Т. 44. – № 9 – С. 1080-1083.
5. Igarashi S. et al. Safe 0.5 N green monopropellant thruster for small satellite propulsion systems // AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. – 2019. – С. 4427.