

*Ванин Ю.В.,  
старший мастер 2 группы, механо-эрозионного  
участка, сборочно-сварочного цеха 222  
АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»  
Россия, г. Химки*

## **МОНОТОПЛИВА С ЗАКИСЬЮ АЗОТА – НЕТОКСИЧНЫЕ, НО ВЗРЫВООПАСНЫЕ?**

***Аннотация:** в статье представлены экологически чистые монотопливные соединения с закисью азота, нитросоединения, и закись азота, предварительно смешанная с углеводородами, описаны соответствующие топливные свойства, необходимые для проектирования двигательных установок, используемых в небольших спутниках, и двигателей большой тяги. Наиболее важным положительным свойством пропеллентов на основе закиси азота, наряду с высокой экологичностью, является их способность к самонаддуву, а недостатком – чрезмерно высокая температура горения с возможностью образования воспламеняющихся паров в топливном баке. Дополнительно приводятся примеры основных успешных отечественных и зарубежных разработок данного вида топлива.*

***Ключевые слова:** топливо, закись азота, ISPS NOFBX, нитрометан, полимерный азот, экологичность, ракетный двигатель.*

***Annotation:** the paper presents ecofriendly monofuel compounds with nitrous oxide, nitro compounds, and nitrous oxide premixed with hydrocarbons. Here we describe the corresponding fuel properties required for designing propulsion systems used in small satellites and high thrust engines. The most important positive property of nitrous oxide-based propellants, along with their high environmental friendliness, is their ability to self-inject, while the disadvantage is their excessively*

*high combustion temperature with the risk of flammable vapor production in the fuel tank. Additionally, examples of the main successful domestic and foreign solutions of this fuel are considered.*

**Key words:** *fuel, nitrous oxide, ISPS NOFBX, nitromethane, polymeric nitrogen, ecofriendliness, rocket engine.*

Топливные смеси с закисью азота ( $N_2O$ ) изучались со времён Второй мировой войны, однако их разработка и использование были прекращены с 1960-х годов до недавнего времени из-за доступности гидразина, который чрезвычайно токсичен и имеет относительно высокую температуру замерзания  $+1\text{ }^\circ\text{C}$  – нестабильное свойство, присущее любому веществу с положительной энтальпией образования. В связи с текущими экономическими и политическими реформами, направленными на экологизацию использования топлива, исследования топливных смесей с закисью азота были возобновлены.

Закись азота может использоваться как окислитель с различными видами топлива. Он гораздо менее токсичен, чем гидразин, и имеет более низкую температуру кипения, хотя его можно сжигать при комнатной температуре под давлением. Как и гидразин,  $N_2O$  обладает положительной энтальпией образования, что делает его потенциально нестабильным и жизнеспособным монотопливом. Разлагается пропеллент с помощью катализатора на горячую смесь азота и кислорода.

Плотность хранения  $N_2O$  в жидком виде составляет  $\sim 0,745\text{ г/см}^3$  при  $20\text{ }^\circ\text{C}$  и давлении пара  $\sim 5,2\text{ МПа}$ . Следовательно, с подходящими сосудами под давлением  $N_2O$  может поддерживаться в стабильных и удобных для эксплуатации условиях. Отметим также его прекрасную совместимость с материалами стандартных резервуаров, включая металлы, пластмассы и композитные материалы [1, с. 3-6].

Хотя  $N_2O$  в качестве монотоплива обладает более низкой производительностью, чем большинство энергетических ионных жидкостей, экспериментальный результат удельного импульса, полученный при эксплуатации  $N_2O$ , равен 206 с при температуре 1640 °С и давлении 0,3 МПа при расширении сопла 200 : 1, что выше, чем у высококонцентрированного пероксида водорода (~ 180 с) [2, с. 20].

Сдерживающим фактором для серьёзного развития представленного топливного направления в прошлом являлись сложности, связанные с созданием силовых установок, которые бы безопасно работали с монотопливными смесями  $N_2O$ . Так, в погоне за высокой производительностью и упрощёнными системами подачи топлива, эксперименты со смесями  $N_2O$  и аммиака привели к многочисленным взрывам и разрушениям двигателей без возможности их восстановления. Однако инновационные исследования настоящего времени максимально приблизились к желаемому результату.

Так, Innovative Space Propulsion Systems (ISPS, компания Firestar Technologies) представила монотопливо ISPS NOFBX – смесь закиси азота в качестве окислителя с этаном, этеном или ацетиленом в качестве топлива, которое использовалось в двигателе с диапазоном тяги 0,4 Н – 445 Н и глубоким дросселированием, удельной импульсной производительностью ~ 325 с, в то время как теоретическое значение составляло ~ 345 с, а температура камеры ~ 2927 °С при 0,7 МПа. Топливо может храниться в виде насыщенной жидкости в широком диапазоне температур, с критической точкой 39,48 °С и 7,19 МПа [2, с. 20]. Отмечено, что ISPS NOFBX имеет более высокий удельный импульс и низкий уровень токсичности по сравнению с гидразином.

Ещё одна смесь углеводородов оксидов азота ( $NO_x$ ) – смесь закиси азота с этанолом ( $N_2O$  /  $C_2H_5OH$ ). Среди углеводородов этанол показал лучшую воспламеняемость и умеренную температуру пламени, а также

продемонстрировал стабильность и смешиваемость с  $N_2O$ . Физические свойства выбранной смеси показали плотность насыщенной жидкости, равную  $0,892 \text{ г/см}^3$ , критическую точку в значении  $36,45 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $6,3 \text{ МПа}$ , при этом давление пара в «точке пузырька» составляло  $2,6 \text{ МПа}$ , в то время как теоретический удельный импульс равнялся  $331 \text{ с}$ , температура сгорания составила  $2820 \text{ }^\circ\text{C}$ . Испытание проводилось с двигателем мощностью  $600 \text{ Н}$ , при этом было достигнуто значение удельного импульса, равное  $259 \text{ с}$ . Недостатками, выявленными в ходе данного эксперимента, явились высокая температура сгорания, которая требует сложной конструкции двигателя и активной системы охлаждения, ожидаемая несовместимость топливной смеси из  $N_2O$  с титаном, возможность образования воспламеняющихся паров в топливном баке и низкая плотность при практических температурах хранения [3, с. 19]. Достоинство в том, что топливные смеси  $NO_x$  обладают наивысшими характеристиками, в то время как, к примеру, растворы перекиси водорода дают самые низкие характеристики даже по сравнению с гидразином [2, с. 20].

Примечателен углеводородный  $NO_x$  ( $HuNO_x$ ), представляющий предварительно смешанные монотопливные вещества, в которых окислитель и топливо соединены в одном баке. Топливная смесь  $HuNO_x$  использует закись азота с этиленом ( $N_2O / C_2H_4$ ) из-за одинакового давления паров двух соединений и имеет плотность  $0,879 \text{ г/см}^3$ . Зарегистрированный теоретический удельный импульс вакуума составляет  $303 \text{ с}$ , полученный при температуре  $-43,15 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $2,5 \text{ МПа}$ . Ключевым недостатком является высокая температура горения (до  $2991 \text{ }^\circ\text{C}$ ), что свидетельствует о важной необходимости в ограничителе обратного воспламенения [4, с. 29-30].

Популярным нитросоединением является нитрометан ( $CH_3NO_2$ ), считаясь экологически чистым монотопливом-кандидатом для современных космических двигательных установок с относительно малой и большой тягой. По химическим свойствам  $CH_3NO_2$  – относительно нетоксичная, вязкая, легковоспламеняющаяся жидкость с плотностью  $1,1371 \text{ г/см}^3$  и температурой

замерзания  $-28,4$  °С. Хорошо сохраняется в космосе, а при добавлении стабилизаторов (к примеру, ди-трет-бутилпероксида, трихлорацетальдегида, диацетила) может заинтересовать конструкторов для успешного применения в качестве жидкого топлива [5, с. 14]. Нитрометан допустимо использовать в «многорежимных» системах, так как он успешно зарекомендовал себя как в моно-, так и в двухтопливных двигательных установках, повышая общую оптимизацию системы. В качестве топлива  $\text{CH}_3\text{NO}_2$  обладает высокой производительностью: удельный импульс равен 289 с, температура горения составляет  $\sim 2176$  °С [3, с. 19]. Следует отметить, что для таких миссий, как импульсные орбитальные манёвры, требующих высокой тяги, основной проблемой могут стать ограничения габаритов летательного аппарата, ввиду чего, с учётом сохранения высокой производительности, важно выбрать топливо с более высоким объёмным удельным импульсом [6, с. 6].

Российские учёные во главе с профессором РАН Огановым А. Р. активно ведут разработку топлива на химически нестабильном полимерном азоте. Исследователей привлекло то, что энергии в полимерном азоте может быть в 10 раз больше, чем в гексогене, и в 13 раз больше, чем в тринитротолуоле. При её выделении полимерный азот переходит в обычное газообразное состояние с двухатомными молекулами, а такое топливо абсолютно экологически чистое. Однако, чтобы его получить, нужны огромные давления, более 1 млн атм., а удержать это вещество при обычном давлении можно только при критически низких температурах. Иными словами, такой азот крайне нетехнологичен. Чтобы решить задачу, было предложено ввести в чистый азот атомы металла для снижения давления полимеризации азота примерно в 8 раз – это свидетельствует о том, что технология получения этого уникального вещества в производственных масштабах может стать реальностью, более того, суперкомпьютером лабораторно полимерный азот уже получен [7].

Таким образом, преимущества топливных смесей с  $\text{N}_2\text{O}$ , как и большинства экологически чистых монотоплив, заключаются в нетоксичности

и неканцерогенности, низкой температуре замерзания, более высоком удельном импульсе по сравнению с гидразином. Ключевым преимуществом является способность к самонаддуву, что позволяет упростить конструкцию системы подачи и системы наддува в баке. Следовательно, в ракетных установках, где движущим фактором является простота конструкции системы подачи и наддува, NO<sub>x</sub>-топливо пользуется большим спросом.

#### **Использованные источники:**

1. Palacz T. Nitrous oxide application for low-thrust and low-cost liquid rocket engine // Proceedings of the 7th EUCASS, Milano, Italy. – 2017. – С. 3-6.
2. Nosseir A.E. S., Cervone A., Pasini A. Review of state-of-the-art green monopropellants: For propulsion systems analysts and designers // Aerospace. – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 20.
3. Mayer A., Wieling W. Green propulsion research at TNO the Netherlands // Transactions on aerospace research. – 2018. – Т. 2018. – № 4. – С. 19.
4. Werling L. et al. Premixed green propellants: DLR research and test activities on nitrous oxide/hydrocarbon mixtures // Proceedings of the New Energetics Workshop (NEW), Stockholm, Sweden. – 2018. – С. 29-30.
5. Бруев В.Н., Козловский Л.Н. Экологически безопасное топливо для космических миссий // МНПК «Наука в современном мире: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Пенза, 15 января 2023. – С. 14.
6. Васянькин А.В. Ионные пропелленты – экологичная альтернатива токсичному ракетному топливу // Аллея науки. – 2023. – № 2 (77). – С. 6.
7. Медведев Ю. Российские учёные придумали новое топливо для космических ракет // Российская газета. – 2017. – № 47 (7213).