

УДК 629.7.036

Микроархитектурная энергетика водорода. Микроструктурные топливные системы космических аппаратов.

Цикунов Владислав Сергеевич

vladislav.tsikunov@rsce.ru

SPIN-код: 9064-3835

ПАО «РКК «Энергия, Королев, Московская обл., Россия

Аннотация. Рассмотрены критические ограничения традиционной криогенной ракетной техники, препятствующие реализации межпланетных пилотируемых миссий. Предложена концепция микроструктурной топливной системы (МТС), устраняющая термодинамическую нестабильность водорода (ЭВВ), механическую сложность турбонасосных агрегатов (ТНА) и структурные ограничения эффект плескания топлива. Проведен анализ концепции МТС, подтверждающий возможность хранения водорода при давлении более 200 МПа за счет принципа сверхпрочности индуцированной масштабom (СИМ). Доказано, что МТС является необходимым инфраструктурным условием для внедрения в системах с ядерным ракетным двигателем (ЯРДУ), и обеспечивает экспоненциальный рост полезной нагрузки. Сделано заключение о переходе к пассивно-безопасной, гипер-компактной архитектуре однофазного ракетного двигателя (ОРД) как основе для создания космических аппаратов нового поколения и освоения дальнего Космоса.

Ключевые слова: микроструктурная топливная система, МТС, ТНА, СИМ, ЯРДУ, ОРД, космическая логистика, водород

Введение. Современная космонавтика столкнулась с физическим тупиком, связанным с криогенным хранением рабочего тела. Долгосрочное хранение жидкого водорода (ЖВ) для многолетних миссий, необходимых для освоения Марса и далее, невозможно из-за термодинамической нестабильности и потерь массы (выкипание) [1, 2]. Кроме того, высокая сложность систем подачи, таких как турбонасосные агрегаты (ТНА), и динамическая нестабильность топлива, ограничивают надежность и маневренность аппаратов. Разработана концепция МТС, которая предлагает решение этих проблем путем фундаментального пересмотра архитектуры хранения и подачи топлива [3]. МТС — это ключевое условие для создания космических аппаратов (КА) нового поколения, и освоения дальнего Космоса.

Методы и материалы; результаты. Проект МТС основан на триедином технологическом прорыве.

Термодинамический прорыв. Водород хранится в сверхкритическом флюидном состоянии при $P > 200$ МПа, устраняя испарение/выкипание водорода. Микроструктурная система подачи топлива (МСП) позволяет полностью исключить ТНА и использовать однофазный ракетный двигатель (ОРД) [4].

Механико-структурный прорыв. Для удержания давления более 200 МПа используется принцип сверхпрочности, индуцированной масштабom (СИМ), реализуемый в ЕТОМ (единый топливно-окислительный модуль).

Проведенный анализ подтвердил, что гексагональная геометрия ЕТОМ выдерживает требуемое давление с Коэффициентом Запаса Прочности (КЗП) 2, при этом ЕТОМ интегрируется в корпус аппарата по СИМ-принципу [5].

Материал — инертные базальтовые/кварцевые композиты, исключаяющие Водородную хрупкость.

Логистический прорыв (ЯРДУ и МКС). МТС — единственное условие для ЯРДУ. Отсутствие эффекта выкипания Водорода является критическим требованием для хранения Водородного пропеллента в многолетних миссиях, а интегрированный ЕТОМ обеспечивает пассивную радиационную защиту экипажа [6].

Переход к модульно-картриджной системе (МКС) заправки обеспечивает быструю, автоматизированную и безопасную замену модулей на орбите.

В результате МТС обеспечивает *гипер-компактность* (сверхвысокоплотное состояние водорода — выше его плотности в жидком (70,8 г/л) и твердом (86,67 г/л) состоянии, сокращая время полета к Марсу с 9 до 3–4 месяцев.

Заключение. Принцип МТС устраняет три ключевых барьера: термодинамический, механико-структурный и логистический. Переход к ОРД и ЕТОМ обеспечивает сверхвысокоплотное хранение Водорода, гипер-компактность топливной системы КА, пассивную безопасность и высокую надежность, что делает МТС фундаментальным, инженерно-верифицируемым условием для создания КА нового поколения, а также реализации безопасного и быстрого освоения дальнего Космоса.

Список источников

- [1] Cryogenic Propellant Storage and Transfer Technology: State-of-the-Art and Future Directions. *NASA Technical Report*, 2020.
- [2] Sutton G.P., Biblarz O. *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons, 2017.
- [3] Gaudenzi P. Structural Composites for Space Applications: From Micromechanics to Design. *AIAA Journal*, 2009.
- [4] Humble R.W., Henry G.N., Larson W.J. *Space Propulsion Analysis and Design*. McGraw Hill, 2015.
- [5] Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. McGraw Hill, 1970.
- [6] *Nuclear Thermal Propulsion Technology for Human Mars Missions*. NASA Technical Paper, 2019.