

ЭЛЕКТРОНАСОСНАЯ СИСТЕМА ПОДАЧИ КРИОГЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА В ЖИДКОСТНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ МАШИН

Куплевацкий Д.В., Пешков Р.А., Третьяков П.А., Бельчиков Д.А.
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, kuplevatskiidv@susu.ru

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, электронасосная система подачи, высокотемпературная сверхпроводимость, жидкий кислород, жидкий метан, криогенные насосы, удельная мощность.

Развитие современной ракетно-космической техники неразрывно связано с поиском и внедрением прорывных технологий, направленных на повышение эффективности, снижение стоимости жизненного цикла и улучшение эксплуатационных характеристик жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Особую актуальность это приобретает в области создания многоразовых транспортных систем и реализации миссий по освоению дальнего космоса. Традиционные системы подачи топлива, такие как турбонасосные и вытеснительные, обладают рядом ограничений, особенно применительно к требованиям глубокого дросселирования тяги, обеспечения многократных запусков двигателя в полете и минимизации общей массы двигательной установки [1]. В качестве перспективной альтернативы рассматриваются электронасосные системы подачи (ЭНСП) компонентов топлива с потенциальными преимуществами в виде упрощения конструкции двигателя за счет исключения газогенератора и турбины, улучшения управляемости и точности регулирования параметров, а также потенциального снижения затрат на разработку и производство. Однако, массовые характеристики традиционных ЭНСП, ограниченные удельными параметрами электродвигателей и источников питания, до недавнего времени сдерживали их широкое применение в ЖРД большой тяги [2].

Кардинальное улучшение характеристик ЭНСП связано с использованием эффекта высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). Применение ВТСП материалов в обмотках электродвигателей насосов позволяет на порядки снизить потери в сопротивлениях, достичь уникальных показателей удельной мощности и высокого коэффициента полезного действия (КПД), что открывает путь к созданию компактных и легких электронасосов для ЖРД большой тяги [3]. Сочетание ВТСП ЭНСП с перспективной топливной парой жидкий кислород – жидкий метан представляет особый интерес [4]. Метан, как криогенный компонент топлива, обладает высокими энергетическими характеристиками, меньшей токсичностью по сравнению с традиционными углеводородными горючими, а также рассматривается как ключевой ресурс для производства топлива в условиях будущих лунных и марсианских миссий. Таким образом, сочетание технологий ВТСП ЭНСП и топливной пары жидкий кислород – жидкий метан может привести к созданию ЖРД нового поколения [3]. Целью исследования является анализ перспектив и выявление ключевых научно-технических проблем, связанных с разработкой и внедрением ВТСП ЭНСП в кислородно-метановых ЖРД.

Принципиальная схема ВТСП ЭНСП включает высокооборотный ВТСП электродвигатель, непосредственно соединенный с криогенным насосом, систему преобразования и управления электропитанием, источник электроэнергии и интегрированную систему криогенного охлаждения ВТСП элементов [5]. В сравнении с традиционными турбонасосными агрегатами (ТНА), ВТСП ЭНСП обладают рядом существенных системных преимуществ. Исключение газогенератора, турбины, сложных газоотводов и редуктора ведет к упрощению силовой схемы, повышению надежности и снижению стоимости производства ЖРД [2]. Потенциальное снижение сухой массы двигательной установки за счет более высокой удельной мощности ВТСП электродвигателей является критически важным фактором [3]. Управление параметрами ЖРД в системах с ВТСП ЭНСП осуществляется путем прецизионного регулирования скорости вращения электродвигателей насосов, обеспечивая

высокую точность, быстродействие и возможность глубокого дросселирования тяги [5]. Отсутствие продуктов сгорания газогенераторного газа улучшает условия для многократных запусков [6]. Применение ВТСП ЭНСП также может привести к повышению удельного импульса [2].

Основными вариантами из ВТСП материалов являются REBCO и диборид магния [3]. Проводники REBCO лучше применять при охлаждении жидким кислородом и метаном (до 90 К), диборид магния (39 К) эффективнее работает при более низких температурах, поэтому является более подходящим для жидкого водорода. Эффективность теплообмена для отвода потерь в переменном токе и теплопритоков критична [8]. Материалы должны сохранять необходимые прочностные характеристики при криогенных температурах и быть совместимы с компонентами топлива, особенно с жидким кислородом [7]. ВТСП ленты подвержены риску деградации при механических напряжениях и терморегулировании. Общий КПД определяется эффективностью ВТСП электродвигателя >99% [3], насоса, силовой электроники и системы охлаждения. Основной вклад в потери вносят АС потери в сверхпроводящих обмотках. Математическое моделирование полного энергетического баланса системы является ключевым для оценки эффективности [9].

ВТСП ЭНСП обладают значительным потенциалом для улучшения характеристик ЖРД на топливе жидкий кислород – жидкий метан, особенно для многоразовых систем и межпланетных миссий [5]. Интеграция системы охлаждения ВТСП с криогенными компонентами топлива перспективна, но требует решения тепловых задач и совместимости материалов [10]. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке надежных ВТСП компонентов, оптимизации систем охлаждения, а также на экспериментальной отработке прототипов.

Источник финансирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Челябинской области (соглашение №184/2 от 25 декабря 2024 г.).

Список литературы

1. Беляков В.А. Разработка и экспериментальная отработка методов и средств повышения эффективности испытаний кислородно-водородных жидкостных ракетных двигателей и их агрегатов: дис. д-ра техн. наук. М.: МАИ, 2017. 345 с.
2. A Review of Technology Readiness Levels for Superconducting Electric Machinery / V. M. O. Santos, F. J. M. Dias, F. Trillaud [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16, No.16. pp. 5955. DOI 10.3390/en16165955.
3. Калугин, К.С. Особенности использования метана в качестве горючего для жидкостных ракетных двигателей / К. С. Калугин, А. В. Сухов // *Вестник Московского авиационного института*. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 120-132.
4. Exploring the potential of electropump feed systems for extending high thrust and deep throttle performance for CH₄/LOX rocket engines / A.J. Musker [et al.] // 10th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 3AF). Lille, France. 2023. EUCASS2023-739.
5. Opportunities for a Liquid Rocket Feed System Based on Electric Pumps / P. Rachov [et al.] // *Journal of Propulsion and Power*. 2013. Vol. 29, No. 5. P. 1187-1195.
6. High power density superconducting rotating machines - Development status and technology roadmap / K.S. Haran, S. Kalsi, T. Arndt [et al.] // *Superconductor Science and Technology*. 2017. Vol. 30, No. 12. P. 123002. DOI 10.1088/1361-6668/aa833e.
7. Zhang Y. AC Loss Research of REBCO High-Tc Superconductors Carrying a DC Current in an AC Magnetic Field: Thesis PhD. Victoria University of Wellington, 2022. URL: https://openaccess.wgtn.ac.nz/articles/thesis/AC_Loss_Research_of_REBCO_High-Tc_Superconductors_Carrying_a_DC_Current_in_an_AC_Magnetic_Field/22180168 (дата обращения: 19.05.2025).
8. Oxygen out-diffusion in REBCO coated conductor due to heating / Ju. Lu, Ya. Xin, B.

Jarvis, H. Bai // Superconductor Science and Technology. 2021. Vol. 34, No. 7. P. 075004. DOI 10.1088/1361-6668/abfd0c.

9. NASA. 2024 NASA Technology Taxonomy. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2024. URL: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/10/nasa-2024-technology-taxonomy-report-low-resolution-final-20240730-tagged.pdf> (дата обращения: 19.05.2025).

10. К методу расчета основных характеристик перспективных бустерных электронасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей / П.А. Дубынин, М.И. Толстопятов, А.А. Зуев, В.В. Черненко // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 2. С. 325-334. DOI 10.31772/2712-8970-2023-24-2-325-334.

Сведения об авторах

Куплевацкий Демид Владимирович, аспирант, инженер-конструктор научной лаборатории «Ракеты-носители, космические и беспилотные летательные аппараты», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск. Область научных интересов: проектирование электронасосных систем подачи, сверхпроводимость.

Пешков Руслан Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Двигатели летательных аппаратов», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск. Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники, математическое моделирование.

Третьяков Павел Александрович, аспирант, инженер-конструктор научной лаборатории «Ракеты-носители, космические и беспилотные летательные аппараты», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск. Область научных интересов: численное моделирование акустических процессов, проектирование ракетно-космической техники.

Бельчиков Данила Андреевич, аспирант, инженер-конструктор научной лаборатории «Двигательные и энергетические установки летательных аппаратов», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск. Область научных интересов: проектирование жидкостных ракетных двигателей, численное моделирование газодинамических процессов

ELECTRIC PUMP SYSTEM FOR SUPPLYING CRYOGENIC FUEL COMPONENTS TO A LIQUID ROCKET ENGINE USING SUPERCONDUCTING MACHINES

Kuplevatskii D.V., Peshkov R.A., Tretiakov P.A., Belchikov D.A.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, kuplevatskiidv@susu.ru

The theses review prospects for high-temperature superconducting electric pump feed systems in liquid oxygen - liquid methane in rocket engines. Advantages include higher power density, efficiency, precise thrust control, and reusability.