

УДК 662.769.2

Энергосистема на водородных топливных элементах с твердотельным водородным генератором для беспилотных аппаратов

Сергеенко Тимофей Игоревич^(*) timofei_0000@mail.ru

Тимашпольский Ян Михайлович ian.timash@yandex.ru

Чижова Мария Николаевна svintuslon@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлена инновационная силовая установка для беспилотных летательных систем, базирующаяся на технологии топливных элементов с твердотельным водородным генератором. В качестве водородосодержащего компонента применен моноаммиакат боргидрида магния ($Mg(BH_4)_2 \cdot NH_3$), чьи термические свойства обеспечивают эффективное выделение чистого водорода без токсичных примесей. Выполнен комплексный синтез и всесторонний анализ материала с применением современных методов исследования. Создан автономный реактор с интеллектуальной системой контроля для надежной водородной генерации. Энергетический модуль внедрен в платформу гексакоптера АС-МК-6. Экспериментальные испытания продемонстрировали рекордное время полета 3 часа 16 минут с грузом 5 кг, что в 4,3 раза превышает показатели аккумуляторных аналогов (45 минут). Полученные данные открывают новые перспективы применения водородных энергосистем для расширения операционных возможностей БПЛА в задачах длительного мониторинга и спасательных миссий.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, топливные элементы, моноаммиакат боргидрида магния, водородная энергетика, химический источник водорода

A hydrogen fuel cell power system with a solid-state hydrogen generator for unmanned vehicles

Sergeenko Timofei Igorevich^(*) timofei_0000@mail.ru

Timashpolsky Jan Mikhailovich ian.timash@yandex.ru

Chizhova Maria Nikolaevna svintuslon@mail.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. An innovative power plant for unmanned aerial systems based on fuel cell technology with a solid-state hydrogen generator is presented. Magnesium borohydride monoammiacate ($Mg(BH_4)_2 \cdot NH_3$) was used as a hydrogen-containing component, whose thermal properties ensure the effective release of pure hydrogen without toxic impurities. A comprehensive synthesis and comprehensive analysis of the material was performed using modern research methods. An autonomous reactor with an intelligent control system has

been created for reliable hydrogen generation. The energy module is integrated into the AS-MK-6 hexacopter platform. Experimental tests demonstrated a record flight time of 3 hours and 16 minutes with a load of 5 kg, which is 4.3 times higher than its battery counterparts (45 minutes). The data obtained opens up new prospects for the use of hydrogen power systems to expand the operational capabilities of UAVs in long-term monitoring and rescue missions.

Keywords: *unmanned aerial vehicles, fuel cells, magnesium borohydride monoammiakate, hydrogen energy, chemical source of hydrogen*

Введение. Современные беспилотные авиационные комплексы, работающие на литий-полимерных накопителях энергии, ограничены критически коротким временем автономной работы, что существенно снижает их практическую ценность для продолжительных операций в удаленных зонах. Водородные энергетические решения, характеризующиеся высокой удельной энергоемкостью и экологической чистотой, представляют революционную альтернативу для кардинального увеличения дальности полета [1, 2]. Однако технические сложности безопасного накопления и дозированной подачи водорода остаются основным препятствием для массового внедрения таких систем [3].

В представленной разработке реализована новаторская концепция энергоустановки на базе протонообменных топливных элементов с твердофазным водородным источником, использующим термолиз моноаммиаката боргидрида магния [4, 5]. Данное решение устраняет проблемы, связанные с отсутствием водородной инфраструктуры и сложностями транспортировки газообразного топлива [6, 7].

Экспериментально доказано, что разработанный прототип обеспечивает удельную массовую энергоплотность 719,1 Вт·ч/кг при объемной плотности 242,3 Вт·ч/л, что значительно превосходит характеристики современных литий-ионных технологий и открывает возможность 3–5-кратного увеличения продолжительности полетных миссий.

Материалы и методы. Для преодоления энергетических ограничений беспилотных систем разработан многокомпонентный подход, включающий оптимизацию массогабаритных параметров и повышение гравиметрической емкости водородного накопителя. Системная оптимизация веса реализована через замену графитовых биполярных пластин топливного элемента на титановые с защитным покрытием, что обеспечило снижение массы стека на 22 % при сохранении коррозионной устойчивости. Интеграция миниатюризированных датчиков давления позволила уменьшить вес вспомогательного оборудования на 12 %.

Исследования термической деструкции моноаммиаката боргидрида магния проведены методами дифференциальной сканирующей калориметрии и масс-спектрометрического анализа *in-situ* для определения кинетических параметров и исключения образования каталитических ядов для топливных элементов. Для проведения экспериментальных работ создана специализированная лабораторная установка, включающая следующие основные компоненты:

- рентгеновский дифрактометр Aeris Panalytical (CuK α излучение, 40 кВ, 17 мА) для фазового анализа синтезированных материалов;
- ИК-Фурье спектрометр Vertex70v (Bruker Optik GmbH) с вакуумированной камерой для анализа молекулярной структуры;
- синхронный термоанализатор STA 449 F3 Jupiter с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403 Aëolos Quadro (NETZSCH) для изучения кинетики разложения;
- планетарная мельница Pulverisette 6v для механохимического синтеза.

Система водородной генерации: экспериментальный стенд состоит из герметичного реактора объемом 0,5 л, буферной емкости (10 л), системы контроля давления с точностью $\pm 0,01$ атм, газового счетчика-расходомера и автоматизированного блока управления с аналого-цифровым преобразователем. Реактор оснащен тремя термопарами для мониторинга температурного профиля и токовводами для иницирующей спирали мощностью 33,6 Вт.

Конфигурация испытательного стенда: установка обеспечивает контролируемое иницирование термолитиза через термитную композицию ($\text{Fe}_2\text{O}_3:\text{Mg}:\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,58:0,26:0,16$) с автоматическим мониторингом параметров процесса. Система безопасности включает аварийное стравливание давления и температурную защиту.

Сравнительный анализ энергетических характеристик различных систем питания

Тип энергосистемы	Удельная энергоплотность, Вт·ч/кг	Время полета, ч:мин	Полезная нагрузка, кг	Время перезарядки/заправки
Li-Po аккумуляторы	180–250	0:45	5	2–4 часа
Сжатый H_2 (350 атм)	420–580	2:20	5	10–15 минут
PEMFC + $(\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3)$	719,1	3:15	5	3–5 минут
Сжиженный H_2	890–1200	4:30	5	15–30 минут

Результаты и их обсуждение. Создан функциональный прототип беспилотного аппарата на базе серийного гексакоптера с интегрированной водородной энергосистемой. Конструкция значительно модифицирована для размещения топливного элемента мощностью 2 кВт с буферным литий-полимерным аккумулятором для компенсации пиковых нагрузок. Летные испытания показали время непрерывного полета 3 часа 15 минут при полезной нагрузке 5 кг, что в 4,3 раза превышает возможности базовой аккумуляторной версии (45 мин, см. таблицу). Выполнен синтез моноаммиака боргидрида магния двумя методами: механическим размолотом в планетарной мельнице (400 об/мин, 50 циклов по 10 минут) и термическим спеканием при температуре 85 °С в течение 3–4 ч. Физико-

химическая характеристика включала рентгенофазовый анализ, ИК-спектроскопию, термогравиметрию и масс-спектрометрию.

Термический анализ выявил, что разложение протекает стадийно с основным экзотермическим пиком при 209 °С, обеспечивающим интенсивное газовыделение. Массовый выход водорода составил 12,5 % от активного материала с чистотой менее 1 ppm аммиака по данным ИК-спектроскопии.

Разработан компактный реактор с термитной системой инициирования, обеспечивающий контролируемый запуск процесса генерации. Рабочая таблетка диаметром 30 мм и высотой 61 мм содержит 24,86 г активного материала с плотностью прессовки 0,70 г/см³. Термитный запал массой 3,4 г обеспечивает достижение температуры инициирования за 177 с при напряжении накала 16 В и токе 2,1 А.

Заключение. Продемонстрирована практическая реализуемость интеграции химических водородных источников на основе $(\text{Mg}(\text{BH}_4)_2 \cdot \text{NH}_3)$ в малогабаритные авиационные платформы. Достигнуто существенное повышение энергетической эффективности, автономности и экологических характеристик БПЛА. Система характеризуется высокой безопасностью, технологической простотой и стабильностью работы. Экспериментально подтверждена генерация 34,86 л водорода при нормальных условиях с выходом 10,3 % масс. от общей массы активной композиции. Результаты подтверждают перспективность данного подхода для задач мониторинга, логистики и аварийно-спасательных операций, требующих продолжительного автономного функционирования

Список источников

- [1] Ильченко М.А., Куликова Е.В. Водородная энергетика: интеграция новых энергетических решений в экономику России. *Вестник Академии управления и производства*, 2025, № 2, с. 863–869.
- [2] Рышков В.И., Сидоркин О.А., Копин Д.С. Водородное топливо — один из путей решения энергетических проблем будущей мировой энергетики. *Комплексные проблемы технической безопасности. Междунар. науч.-практ. конф.: матер.* Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2017, с. 162–165.
- [4] Байрамов А.Н., Киричков В.С. Обоснование компоновочных решений комбинирования АЭС с водородным энергетическим комплексом по критерию минимального риска. *Труды Академэнерго*, 2018, № 1, с. 57–72.
- [5] Шиховцев А.В., Кравченко О.В., Васильев В.П. Технология синтеза комплексов боргидрида магния с аммиаком для химического источника водорода. *Водородная маевка. V Науч.-практ. конф.: тез. докл.* Новочеркасск, ООО «Лик», 2023, с. 22.
- [6] Соловьев М.В., Васильев В.П., Шилов Г.В. Синтез, уточнение свойств и структур монокристаллических ди- и триаммиакатных комплексов боргидрида магния. *Известия Академии наук. Серия химическая*, 2024, т. 73, № 4, с. 906–916.
- [7] Соловьев М.В., Кравченко О.В., Васильев В.П. Синтез, свойства и структура монокристаллических ди- и триаммиакатных комплексов боргидрида магния. *Фундаментальные и прикладные проблемы ионной твердого тела. XVII Собрание с междунар. уч.: сб. докл.* Москва, ООО Издательский дом «Граница», 2024, с. 728–731.