

УДК 629.78

Система переработки органических отходов биологической системы жизнеобеспечения межпланетных космических миссий

Субботин Родион Сергеевич¹Тикка Владислав Николаевич²Кудрицкий Аркадий Николаевич²

ekorum@voenmeh.ru

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия² БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена проблеме переработки органических отходов в длительных космических миссиях. Рассмотрен метод «мокрого» сжигания с использованием пероксида водорода и переменного тока, приведены данные по энергопотреблению и продуктам реакции. Предложены пути усовершенствования технологии для создания замкнутой системы жизнеобеспечения.

Ключевые слова: космические миссии, органические отходы, замкнутая система жизнеобеспечения, «мокрое» сжигание, перекись водорода, минерализация

Актуальность и проблема. Для длительных космических миссий с большим экипажем масса необходимых запасов становится критической. Решением являются регенерационные системы, повышающие замкнутость циклов жизнеобеспечения. На российском сегменте МКС коэффициент замкнутости по воде достигает 0,91 (система конденсации СРВ-К2М) и 0,75 (система переработки урины СРВ-УМ), однако полная переработка органических отходов не ведется, что крайне необходимо в условиях долговременных космических миссий без возможности быстрой доставки и пополнения продовольственных запасов.

Перспективное решение. Одним из наиболее реализуемых методов признано «мокрое» сжигание, апробированное в эксперименте «БИОС-3». Его принцип — окисление органики в водной среде атомарным кислородом, который выделяется из пероксида водорода (H_2O_2) под действием переменного электрического тока при температуре 95–98 °С. Продукты реакции — минерализованный питательный раствор и газовая смесь (CO_2 — 3,6 %, O_2 — 65,6 %, H_2 — 27,5 %), которые могут возвращаться в круговорот веществ космических оранжерей.

Энергоэффективность и недостатки. Энергопотребление процесса сильно зависит от типа отходов: для переработки экзометаболитов человека оно составляет 776 Вт·ч/л, а для растительной биомассы — около 8000 Вт·ч/л. КПД использования H_2O_2 также варьируется от 15,3 % до 71,8 % по оценкам экспериментов, проведенных с реактором в Институте биофизики СО РАН. Ключевые недостатки базовой установки: высокий расход перекиси водорода, необходимость нейтрализации аммиака (3,2 % в газовой фазе) и проблемы с обслуживанием электродов и твердыми остатками.

Пути усовершенствования. Для создания полностью замкнутой системы предложены модернизации.

Регенерация H_2O_2 : организация узла, где водород и кислород, выделяющиеся в основном реакторе, используются для синтеза новой порции перекиси водорода через окисление и восстановление антрахинона в бензольном растворе. Однако такой способ восполнения является трудноосуществимым из-за сложности последующей экстракции пергидроля в водный раствор. Поэтому предлагается перейти к более «чистому» и менее габаритному способу производства перекиси водорода из воды и кислорода с помощью твердофазного электролиза. Схожий метод использовался для получения кислорода в рамках эксперимента MOXIE на марсоходе *perseverance*.

Конструктивные изменения: замена электродов на систему «центральный электрод-звезда — корпус реактора» для равномерного электролиза и установка измельчающего устройства (винт или ультразвуковой генератор) для борьбы с твердыми включениями. Дополнительно возможно осуществить доразложение осадка с помощью жесткого ультрафиолета. Ко всему прочему, увеличить эффективность разложения могут наночастицы оксида цинка и оксида титана, а именно реакция фотокатализа с их участием. Диоксид титана поглощает фотоны света, что приводит к генерации пар электрон-дырка. Эти электроны и дырки реагируют с водой и кислородом, образуя сильные окислители, такие как супероксидные анионы (O_2^-), гидроксильные радикалы ($\cdot\text{OH}$) и другие свободные радикалы. Эти активные частицы затем атакуют и разрушают органические загрязнители, разлагая их на более простые и безопасные соединения, такие как вода и углекислый газ.

Очистка газов: дожигание примесных углеводородов и спиртов на платиновом катализаторе при 950–1050 °С. Либо перегонка газов снова через контур ультрафиолетового очищения внутри емкости реактора.

Использование керамических катализаторов: каталитическое разложение перекиси водорода при помощи специальных керамических стержней из диоксида марганца.

Заключение. Метод «мокрого» сжигания является адаптируемым решением для замыкания циклов в космических миссиях. Его относительная простота, умеренные температурные режимы и возможность организации замкнутого цикла по реагентам делают его перспективным не только для космоса, но и для использования в экстремальных земных условиях.

Список источников

- [1] Salisbury F.B., Gitelson J.I., Lisovsky G.M. Bios-3: Siberian experiments in bioregenerative life support. *BioScience*, 1997, vol. 47, no. 9, pp. 575–585.
- [2] Murray A.T. Electrosynthesis of hydrogen peroxide by phase-transfer catalysis. *Joule*, 2019, vol. 3, no. 12, pp. 2942–2954.
- [3] Nishimi T. Mechanistic study on the production of hydrogen peroxide in the anthraquinone process. *European Journal of Organic Chemistry*, 2011, vol. 22. <https://doi.org/10.1002/ejoc.201190057>

-
- [4] Frossard E. Recycling nutrients from organic waste for growing higher plants in the Micro Ecological Life Support System Alternative (MELISSA) loop during long-term space missions. *Life Sciences in Space Research*, 2024, vol. 40, pp. 176–185.
 - [5] Riedl H., Pfeleiderer G. U.S. Patent 2,158,525, Germany, I.G. Farbenindustrie, 1936.

