

ПОДСИСТЕМА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ДЛЯ БИОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Е. А. Морозов^{1,2*}, С. В. Трифонов^{1,2}, М. Ю. Салтыков¹, А. В. Мурыгин², А. А. Тихомиров^{1,2}

¹Институт биофизики СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: transserfer89@gmail.com

На кафедре замкнутых экологических систем Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева совместно с Институтом биофизики Сибирского отделения Российской академии наук ведутся разработки искусственного высокопроизводительного физико-химического звена редуцентов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения, в частности, для готовящегося эксперимента БИОС-4 с экипажем из 3 человек. Физико-химическая переработка отходов требуется из-за неприемлемости для вывода на орбиту очень больших буферных емкостей, а значит, и масс – многих естественных составляющих биологических звеньев переработки отходов. Подсистема физико-химических реакторов для переработки органических отходов в удобрения для выращивания культурных растений на гидропонике периодически совершенствуется. Параллельно разрабатываются различные варианты подобных функциональных звеньев с различными характеристиками. Рассматривается подсистема физико-химических реакторов переработки отходов в биолого-технической системе жизнеобеспечения БИОС-4. Целью статьи является обзор текущего состояния особенностей разработки технологий переработки отходов с использованием подсистемы физико-химических реакторов на основе метода «мокрого сжигания», а также ее автоматизации и компьютерного мониторинга параметров протекания процесса. Рассматриваемая установка для переработки органических отходов в удобрения применительно к замкнутым экосистемам космического назначения состоит из подсистемы реакторов «мокрого сжигания», разложения мочевины и синтеза H_2O_2 . Авторы разрабатывают единый интерфейс сбора данных о параметрах работы вышеуказанных реакторов и систему автоматического управления ими. Представлены технические детали протекающих, разрабатываемых и проектируемых процессов переработки отходов. Дано целостное представление о звене физико-химической переработки отходов на экспериментальном стенде БИОС-4 сегодня. К настоящему моменту представлены действующие установки либо концептуальные решения для их разработки, включая автоматизацию. Для всех основных звеньев технологической подсистемы переработки отходов применительно к биолого-техническим системам жизнеобеспечения космического назначения ведется их оптимизация и экспериментальная проверка.

Ключевые слова: пилотируемые космические полеты, замкнутые системы жизнеобеспечения, круговорот, технологические процессы, переработка отходов, удобрения, автоматизация.

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 3, P. 585–591

SUBSYSTEM OF PHYSICO-CHEMICAL REACTORS OF MINERALIZING WASTES FOR SPACE APPLICATION BIO TECHNICAL LIFE SUPPORT SYSTEMS

Ye. A. Morozov^{1,2*}, S. V. Trifonov^{1,2}, M. Yu. Saltykov¹, A. V. Murygin², A. A. Tikhomirov^{1,2}

¹Institute of Biophysics SB RAS

50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: transserfer89@gmail.com

The Department of Closed Ecological Systems of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology together with the Institute of Biophysics SB RAS are developing the artificial high-performance physicochemical link of the decomposers for bio technical life support systems for space applications, in particular for the forthcoming experiment BIOS-4 with a crew of 3 people. The physicochemical processing of waste is required because of the very large buffer capacities thus masses for orbital launching of many natural components comprising the biological waste

treatment links. A subsystem of physicochemical reactors for the processing of wastes into fertilizers for cultivating edible plants on hydroponics is being periodically improved. Different versions of the similar functional links with different characteristics are being developed in parallel. The subject of the article is the subsystem of physical-chemical reactors of organic waste processing in the bio technical life support system BIOS-4. The aim is to present the review of peculiarities of the development of the organic wastes treatment physical-chemical reactors subsystem based on "wet combustion" method, as well as its automation and computer monitoring of the process flow parameters. The considered technological subsystem of organic wastes treatment into fertilizers applied to space application closed ecosystems comprises the reactors of "wet combustion", urea decomposition, and H_2O_2 synthesis. The authors develop a united interface of collecting data of the reactors operation parameters, and the reactor's automation control system. Technical details of the ongoing, developed and projected processes are presented. A holistic view has been given of the physical-chemical reactors waste processing link at the BIOS-4 experimental facility today. To date, existing installations or conceptual solutions for their development, including automation, are presented for all the main links of the technological chain of waste processing with reference to the bio technical life support systems for space purposes, and their optimization and experimental verification are carried out.

Keywords: human spaceflight, closed life support systems, turnover, technological processes, waste treatment, fertilizers, automation.

Введение. Для пилотируемых космических миссий длительностью более 2-х лет, начиная от полета на Марс и далее, а тем более для решения задач терраформирования планет и межзвездной экспансии, высокотехнологичные биолого-технические системы жизнеобеспечения (БТСЖО), включающие человека, являются необходимым компонентом космических аппаратов такого назначения. Процессы переработки органических отходов играют важную роль в формировании БТСЖО космического назначения, определяя размеры буферных емкостей и время автономного существования БТСЖО [1].

Отличие процессов получения пищи в земных и космических условиях заключается в очень жестких требованиях к минимизации массы всей системы в последнем случае. Многие земные технологии земледелия слишком трудоемки, масштабны, массивны и нетехнологичны для вывода их на орбиту и использования в период космической миссии. В то же время многие космические технологии слишком дороги и нерентабельны для земных приложений, однако совершенно незаменимы в будущих космических миссиях. Для минимизации массы БТСЖО и повышения удельной полезности каждого килограмма выводимой на орбиту полезной нагрузки требуется резко повышать (в сравнении с биосферными циклами) скорости оборота веществ в экологических трофических циклах и снижать буферную емкость экосистем [2].

Снижение буферных емкостей в экосистемах порождает множество проблем устойчивости их функционирования [3]. Так, в планетарном масштабе регулирование газового состава атмосферы происходит естественным образом благодаря очень большой буферности атмосферы, в то время как в герметичной кабине БТСЖО объем атмосферы очень мал и требует тщательного контроля [4] для выравнивания всплесков концентраций различных газовых компонентов, как технологическими способами (подбор шага конвейеров различных культурных растений), так и дополнительными техническими средствами (например, управляемый различной логикой микроводорослевый фотобиореактор, имеющий большой диапазон интенсивностей фотосинтеза).

Естественная биodeградация отмерших и полупереваренных растительных и животных органических остатков и традиционные практики их компостирования в земных условиях требуют слишком массивных буферных емкостей [5], что неприемлемо для БТСЖО космического назначения. Поэтому в БТСЖО космического назначения представляется целесообразным разрабатывать различные подсистемы физико-химических реакторов [6], которые выполняют роль редуцентов в экосистеме. В процессе исследований такие подсистемы могут существенно варьироваться и оптимизироваться. Отлаженные технологические процессы, которые уже претерпевают существенные структурные изменения, подлежат автоматизации. Их снабжают датчиками для контроля состояния среды БТСЖО, надстраивают системы управления физико-химическими реакторами, объединяя их во все более сложные модули и систему управления БТСЖО как единое целое. В данной статье рассматриваются ведущиеся в ИБФ СО РАН разработки подсистемы физико-химических реакторов переработки органических отходов в удобрения для выращивания культурных растений на гидропонике [7].

Целью данной статьи является обзор особенностей оригинальных технологий и разработок физико-химических реакторов переработки органических отходов применительно к биолого-техническим системам жизнеобеспечения нового поколения с высокой степенью замыкания круговоротных процессов и их особенностей. Работы ведутся на кафедре ЗЭС СибГУ, являющейся базовой кафедрой ИБФ СО РАН.

Подсистема физико-химических реакторов. Объектом исследования является технологическая подсистема физико-химической переработки органических отходов в удобрения для растений, а также автоматизация, мониторинг и управление вышеперечисленными процессами. Проблемы исследования заключаются в поиске путей повышения степени замкнутости, технологичности и надежности отдельных звеньев технологической подсистемы переработки органических отходов, уменьшении массы БТСЖО в расчете на члена экипажа, а также в автоматизации, мониторинге и управлении вышеперечисленными процессами.

Весьма перспективным для искусственного физио-химического звена редуцентов в будущих БТСЖО с экипажем из нескольких человек представляется использовать принцип жидкофазного окисления органических отходов активными формами кислорода в водной среде. H_2O_2 на сегодня является наиболее экологически чистым, эффективным и легко воспроизводимым во внутрисистемном круговороте видом окислителя. Разрабатываемая последовательная технологическая подсистема переработки органических отходов для получения из них питательных растворов для выращивания культурных растений, преимущественно на гидропонике, применительно к замкнутым экосистемам космического назначения состоит из трех основных реакторов: «мокрого сжигания», разложения мочевины и синтеза H_2O_2 . Упрощенная схема технологического процесса представлена на рис. 1.

Сначала органические отходы (в первую очередь экзометаболиты человека, а также, возможно, несъедобная биомасса растений, рыбные отходы и т. д.) смешиваются с 33%-м водным раствором H_2O_2 и через сутки поступают в реактор «мокрого сжигания» [8]. Перекись водорода активируется переменным электрическим током [9], образуя радикалы $\bullet O$ и $\bullet OH$, которые запускают цепную реакцию окисления органических веществ в растворе. Получаемый на выходе «мокрого сжигания» продукт состоит из раствора, газа и небольших количеств осадка. Состав газовых компонентов и технология их вовлечения в круговоротные процессы БТСЖО описана в [10]. После процесса «мокрого сжигания» более 90 % мочевины остается в растворе.

Поскольку мочевина не усваивается многими культурными растениями, раствор вместе с осадком далее направляется в реактор разложения мочевины. Ранее использовалась технология разложения мочевины ферментом уреазы, получаемой из соевой муки [11]. Процесс проходил при простой механизации и не требовал специальной системы управления. В настоящее

время разрабатывается альтернативный метод разложения мочевины с помощью катализатора из платиновой фольги. Процесс автоматического управления реактором разложения мочевины на платине заключается в поддержании постоянного тока в цепи при меняющейся электропроводности раствора в результате нагрева и химических реакций, а также термостатирования при выходе реакции на рабочую температуру и отключении по прошествии заданного времени. В первом приближении такой процесс может осуществляться по жестко заданной по времени программе.

Доокисление осадка. После любого варианта процесса разложения мочевины осадок отстаивают и доокисляют в смеси $HNO_3 + H_2O_2$ в соотношении 1:1. Процесс извлечения элементов минерального питания высших растений из осадка в доступные формы в растворе описан в [12]. Необходимую для доокисления осадка и коррекции pH поливочных растворов на гидропонике азотную кислоту получают нитрификацией аммиака, связываемого в газовых скрубберах реакторов «мокрого сжигания» и разложения мочевины в 6 % HNO_3 . Процесс доокисления осадка, остающегося в продуктах «мокрого сжигания» раствора экзометаболитов человека в смеси $HNO_3 + H_2O_2$ (1:1), может проводиться в реакторе, аналогичном установке «мокрого сжигания», но меньшего размера, либо накапливаться за несколько дней и проводиться в основной установке. Поскольку HNO_3 сильно увеличивает электропроводность раствора, требуются существенно меньшие уровни напряжения. Количество HNO_3 определяется из предположения, что весь переходящий в газообразное состояние при первичном «мокром сжигании» раствора экзометаболитов NH_3 преобразуется нитрификатором в равное количество молей HNO_3 и возвращается полностью на доокисление осадка, к которому добавляется H_2O_2 в молярном соотношении 1:1. Обычно используется 4,18 мл 65%-го HNO_3 и 8,24 мл 33%-го водного раствора H_2O_2 на осадок с 1 л раствора экзометаболитов человека.

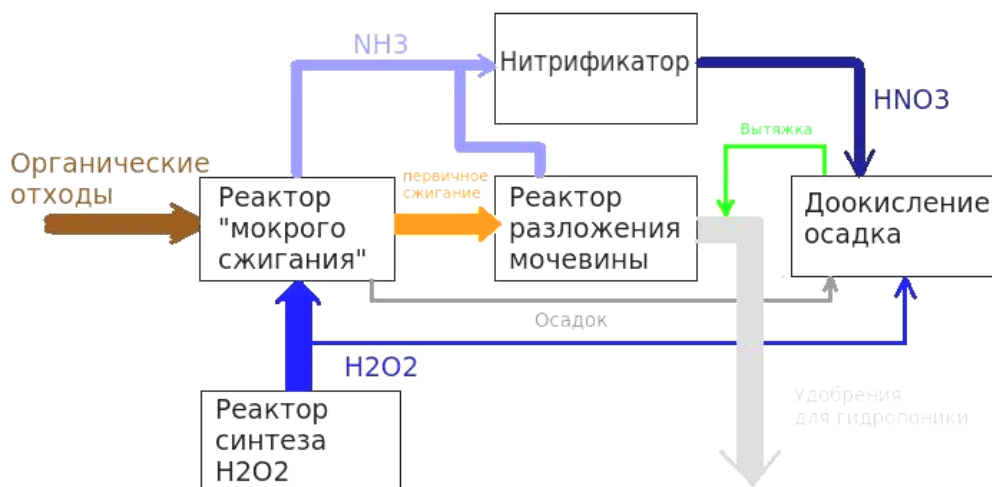


Рис. 1. Упрощенная схема технологической подсистемы переработки органических отходов для БТСЖО высокой степени замкнутости на примере проекта БИОС-4

Fig. 1. Simplified chart of organic wastes treatment technological chain for high-closure BTLSS on BIOS-4 project as example

Напряжение очень сильно зависит от площади поперечного сечения раствора между электродами и, следовательно, от заполняемости реактора. Обычно осадок с 9 л раствора минерализованных экзометаболитов с суммарным объемом кислоты перекиси и дистиллированной воды, используемой для смыва, порядка 300 мл разгоняют 5 мин при напряжении около 28 В, при этом ток вырастает с 3–5 до 7,5–10 А и раствор начинает кипеть (электропроводность раствора зависит также от его температуры), далее напряжение снижают до 14 В, при этом ток падает приблизительно до 3,5 А и находится на таком уровне порядка 2 часов до конца реакции. Конец реакции определяется отсутствием H_2O_2 в растворе при титровании перманганатом калия. Реакция доокисления осадка при фиксированных уровнях раствора может проводиться двумя переключениями через заданные интервалы времени, однако от уровня раствора в реакторе, связанного с его поперечным сечением, зависит ток в цепи и скорость реакции. Если уровни раствора не будут нормированы и стандартизированы, то для управления процессом потребуются следящая система, регулирующая напряжение для удержания значений тока в определенных пределах. Однако в большинстве случаев стандартизация процесса доокисления осадка по объемам компонентов выглядит более простым решением, позволяя сделать управление по жесткой программе.

Авторами разработана и экспериментально проведена на растениях салата, взятого в качестве тест-объекта, технология доокисления осадка от «мокрого сжигания» в водной смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$. Более половины таких необходимых элементов минерального питания для высших растений, как Са, Mg, Р, Fe и др., были ранее связаны в труднорастворимом осадке и недоступны для минерального питания. Удалось перевести более 90 % вышеуказанных элементов минерального питания в ионную форму, доступную в растворе. Достигнуто увеличение продуктивности салата более чем в 2 раза при использовании питательного раствора, приготовленного из одинакового количества минерализованных экзометаболитов человека с использованием технологии растворения осадка, по сравнению с ранее использовавшейся технологической подсистемой [12], поскольку некоторые из выводимых в раствор элементов были лимитирующими для роста культурных растений в условиях максимального замыкания круговорота веществ. Проанализирована большая часть газовых компонентов процесса, ведутся работы по изучению динамики окисления остающихся от доокисления осадка в смеси $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ небольших количеств воска в почвоподобном субстрате. Работы по вовлечению осадка от «мокрого сжигания» в круговорот БТСЖО обладают принципиальной новизной и делаются впервые в мире.

Модификация установки «мокрого сжигания». Была разработана, аппаратно и программно реализована и апробирована в течение более 2 лет регулярной работы система мониторинга в реальном времени с записью на компьютер параметров протекания процесса «мокрого сжигания» для реактора с рабочим объемом 6 л, разгонным напряжением 100 В и рабочим напряжением 50 В, а также автоматическое и/или дистанционное управление через компьютер вышеуказанной установкой [13].

В настоящее время изготовлен реактор «мокрого сжигания» с рабочим объемом 9 л для экипажа из 3 человек, который будет, в частности, оснащен подсистемой физико-химических реакторов приготовления удобрений из органических отходов и иными технологиями для высокозамкнутой БТСЖО нового поколения. Проблемой работы новой установки с таким реактором на 9 л оказалась измененная геометрия с меньшим расстоянием между электродами, изменилось соотношение тока и напряжения: 56 В – разгонное и 28 В – рабочее, при токе от 5–7 до 12–18 А. Материал стенок был заменен с керамики на фторопласт, и тщательно загерметизированы газовые пути. В результате тщательной герметизации газовых путей пороговое значение давления, сигнализирующее о переключении с разгонного напряжения на рабочее, стало достигаться слишком рано – через 10–15 мин, по сравнению с 60–90 мин для ранее отработанной керамической версии реактора с рабочим объемом 6 л, в результате раствор не успевал разогреться до рабочей температуры (95–100 °С), что увеличивает время протекания процесса и ухудшает качество продукта, оцениваемое по химическому потреблению кислорода. Для повышения теплоизоляции реактор был покрыт термоизоляционной пленкой, однако это не решило проблему.

У новой установки «мокрого сжигания» рабочим объемом 9 л изменяется логика работы автоматики, требуется еще одна ступень. Включение пеногасителя и катализатора происходит по достижении давления, равного высоте столба жидкости в колбе для связывания NH_3 , как и ранее, но переключение напряжения с разгонного на рабочие осуществляется по иному принципу – по достижении заданной рабочей температуры раствора (95 °С). Отключение установки происходит по разряжению –2 мм вод.ст., как и ранее. Также актуальна задача разработки аналогичной системы компьютерного мониторинга (хода процессов переработки и движения веществ) и автоматизации для остальных реакторов вышеуказанной технологической подсистемы для создания единой информационной системы управления экспериментальным стендом БТСЖО.

Целесообразным может оказаться автоматическая дозация H_2O_2 в ходе реакции при использовании процесса разложения мочевины с применением уреазы, получаемой из соевой муки, по заданным интервалам времени. Также возможна автоматическая дозация части H_2O_2 в ходе первичного процесса «мокрого сжигания», управляемая по току для сокращения расхода H_2O_2 .

Человеку для пищеварения необходимо потребление NaCl , в то время как для большинства культурных растений данный компонент является ингибитором и губителен в повышенных концентрациях. В этой связи требуется обессоливание питательных растворов для культурных растений с целью поддержания приемлемо низких концентраций NaCl в поливочных растворах. Для этого в настоящее время используются растения-галофиты [14]. Параллельно ведется разработка физико-химических методов обессоливания питательных растворов диализом [15], однако на данный момент галофиты более перспективны.

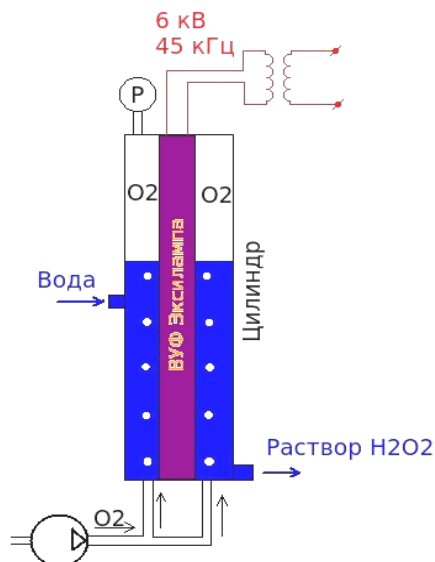


Рис. 2. Возможная схема синтеза H_2O_2 из внутрисистемной воды и электроэнергии применительно к БТСЖО космического назначения

Fig. 2. Probable H_2O_2 synthesis scheme from intra-system water and electricity for space application BTLSS

Синтез перекиси водорода. Процесс синтеза H_2O_2 является самым энергоемким в предполагаемой искусственной физико-химической части звена редуцентов. Наиболее важной на сегодня задачей для запуска эксперимента по замыканию системы нового поколения БИОС-4 с людьми, как первого значимого шага экспериментальной проверки существующих на сегодня концептуальных решений для полетной версии БТСЖО, является создание энергоэффективной, не выделяющей токсичных газов, технологичной и легко встраиваемой в существующую схему круговоротных процессов БТСЖО установки синтеза H_2O_2 из электроэнергии и имеющихся в системе потоков веществ. Преобладающий сегодня в промышленности антрохиноновый процесс синтеза H_2O_2 крайне проблематично использовать для БТСЖО из-за сложности, объемности и массивности технологической подсистемы, а также потребности в реагентах.

Ранее синтез H_2O_2 предполагалось осуществлять из кислорода и растворов минерализованных экзотебололитов на газодиффузионных электродах по процессу, описанному в [16]. Однако основным недостатком этого метода является крайне низкий срок службы газодиффузионных электродов, необходимость их частой замены и трудность воспроизводства в рамках БТСЖО, что увеличивает ее общую массу. В настоящее время параллельно ведутся исследования по разработке реактора синтеза H_2O_2 из воды и кислорода под давлением с помощью ионизации насыщенного кислородом слоя жидкости эксилампой в диапазоне длин волн вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Из всех процессов физико-химической переработки отходов процесс синтеза H_2O_2 в любой реализации – наиболее энергоемкий, даже при достижении теоретического минимума энергопотребления [15].

Известный процесс синтеза H_2O_2 катодным восстановлением кислорода на газодиффузионном элект-

роде применительно к БТСЖО имеет существенный недостаток – крайне низкий срок службы газодиффузионных пористых электродов и трудность их изготовления в условия БТСЖО. В настоящее время авторы ведут подготовку эксперимента по синтезу H_2O_2 из внутрисистемной воды, барботируемой кислородом под давлением под воздействием вакуумного ультрафиолета или ионизирующих излучений (рис. 2).

Проводятся теоретические исследования для определения оптимальной длины волны ВУФ эксилампы или конструкции ионизатора, а также повышения эффективности процесса с помощью катализаторов.

Планируется провести серию экспериментов для получения поверхности оптимума эффективности процесса синтеза H_2O_2 в зависимости от следующих факторов:

1. Длина волны. Эксилампы на галогенидах излучающие в ВУФ-диапазоне, имеют определенные пики мощности для каждого вида галогена. Нужно подобрать наиболее эффективные длины волн для синтеза H_2O_2 , поскольку проблема данного метода заключается в том, что ВУФ-излучение одновременно интенсивно синтезирует и разлагает H_2O_2 , и на некоторых длинах волн на разложение H_2O_2 идет до 90 % энергии, идущей на синтез.
2. Интенсивность излучения. Поиск баланса между затрачиваемой мощностью и выходом реакции.
3. Давление атмосферы из чистого O_2 внутри реактора. Давление повышает интенсивность и эффективность реакции, однако чем выше давление, тем необходимы более мощные насосы для нагнетания O_2 и более массивная камера для удержания создаваемого давления.
4. Толщина слоя воды. ВУФ-излучение сильно поглощается водой, более 90 % мощности задерживается в единицах мм слоя воды.
5. Скорость потока. С одной стороны, чем выше скорость потока, тем больше продукта получается,

с другой стороны, концентрация H_2O_2 ниже. Нужно определить, при какой скорости потока получается максимальный выход молей H_2O_2 на единицы затрачиваемой энергии при приемлемых объемах и буферных массах.

6. Интенсивность барботажа. Насыщенность слоя воды кислородом должна быть такой, чтобы обеспечивать максимальный выход продукта при минимальных энергозатратах.

7. Катализаторы и стабилизаторы. H_2O_2 – активный окислитель и нестабильное соединение. Для стабилизации H_2O_2 используются ZnO , $Zn(MnO_4)_2$ и другие вещества [17], которые не выделяются из потоков веществ в имеющемся круговороте БТСЖО. Расход катализаторов и стабилизаторов и их попадание в питательные растворы должны быть пренебрежимо малы, если они вредны для человека и/или тяжело восстанавливаются в рамках БТСЖО.

Иные параметры процесса, которые могут оказаться существенными, если их варьирование технически реализуемо доступными средствами.

После получения данной поверхности оптимума процесса будет возможно создание полномасштабной установки, синтез алгоритмов и системы управления реактором синтеза H_2O_2 . Второй возможный подход заключается в поиске путей существенного продления срока службы электродов и облегчения процесса их воспроизводства в системе для процесса, описанного в [16].

Заключение. Представлено современное состояние разработок искусственного высокопроизводительного звена редуцентов – технологической подсистемы физико-химических реакторов, включая принципы их автоматизации, для искусственных высокзамкнутых экосистем космического назначения. Полученные результаты и ведущиеся авторами в настоящее время исследования по доработке технологической схемы процессов последовательной переработки отходов в удобрения являются частью большого цикла работ по развитию высокзамкнутых БТСЖО космического назначения. Представляется, что данные разработки могут быть востребованы при освоении среднего и в долгосрочной перспективе дальнего космоса, начиная от исследовательских баз на Марсе и других планетах, до решения задач отдаленной перспективы терраформирования и межзвездной колонизации.

Благодарности. Работы по переходу от аналоговой схемы управления к цифровой, созданию программы пользовательского интерфейса и обработки данных установки «мокрого сжигания», а также доокислению осадка и вовлечению его в круговорот веществ БТСЖО, получены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14-14-00599) в ИБФ СО РАН. Остальные работы выполнены в рамках реализации интеграционного проекта № 5 (блок № 4) СО РАН и государственного задания ИБФ СО РАН по теме № 56.1.4. на 2013–2020 годы.

Acknowledgements. Work on changing analog control scheme to digital, user program interface development and data processing of “wet incineration” installation, as well as sediment further oxidation and its involvement into BTLSS matter turnover were conducted

with the financial support of the Russian Scientific Foundation grant (project 14-14-00599) at IBP SB RAS. Other works were conducted in the framework of the integration project number 5 (unit number 4) of the SB RAS and the Institute of Biophysics SB RAS State task theme № 56.1.4. for 2013–2020.

Библиографические ссылки

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. Man-made Closed Ecological Systems / Taylor & Francis Inc. 2003. 400 p.
2. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects / A. A. Tikhomirov [et al.] // *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40, iss. 11. Pp. 1741–1745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.
3. Барцев С. И. Отношение подобия и редукция сложности моделей экосистем // Математическое моделирование в экологии. ЭкоМатМод–2009 : материалы конф. Пушино, 2009. С. 25–26.
4. Замкнутая система: человек – высшие растения / под ред. Г. М. Лисовского. Новосибирск : Наука, 1979. 160 с.
5. Биофизика. Открытый учебник [Электронный ресурс] / под ред. С. И. Барцева. Красноярск, 2017. 184 с. URL: <http://build.molpit.org/pub/biophysics/tutorial.pdf> (дата обращения: 22.08.2017).
6. MELISSA: a loop of interconnected bioreactors to develop life support in Space / F. Gòdia [et al.] // *Journal of Biotechnology*. 2002. Vol. 99, iss. 3. Pp. 319–330. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00222-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00222-5).
7. Возможные пути включения экзометаболитов человека в массообмен биологической системы жизнеобеспечения / С. А. Ушакова [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2009. Т. 43, № 2. С. 61–63.
8. Перспективы использования «мокрого сжигания» органических отходов в перексиде водорода для замкнутых систем жизнеобеспечения / С. В. Трифонов [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2014. Т. 22, № 2. С. 203–208.
9. Устройство оптимизированной утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящее к получению из них удобрений : пат. 146378 Рос. Федерация : МПК С 05 F 3/00 (2006.01) / Морозов Е. А., Трифонов С. В., Куденко Ю. А. и др. Опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
10. Assessing the feasibility of involving gaseous products resulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a biotechnical life support system / A. Tikhomirov [et al.] // *Adv. in Space Res.* 2012. Vol. 49. P. 249–253.
11. Физико-химическая переработка экзометаболитов человека для замкнутых систем жизнеобеспечения / Е. Ф. Сутормина [и др.] // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2011. Т. 19. С. 413–420.
12. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems / A. A. Tikhomirov [et al.] // *Doklady Akademii Nauk, Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016. Vol. 470. P. 316–318.

13. Компьютерная автоматизация установки «мокрого сжигания» органических отходов для замкнутых экосистем / М. Ю. Салтыков [и др.] // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 17, № 2. С. 438–443.

14. Possibility of *Salicornia europaea* use for the human liquid wastes inclusion into BLSS intrasystem mass exchange / N. A. Tikhomirova [et al.] // *Acta Astronautica*. 2008. Vol. 63. Pp. 1106–1110.

15. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Trifonov S. V. Physicochemical Conversion of Human Exometabolites for the NaCl Involvement into the Mass Exchange in Closed Life Support Systems // *Doklady Akademii Nauk*. 2016. Vol. 466, № 1. Pp. 114–116. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

16. Электросинтез перекиси водорода из кислорода в газодиффузионных электродах в растворах минерализованных экзометаболитов / Г. А. Колягин [и др.] // *Электрохимия*. 2013. Т. 49, № 10. С. 1120–1124. DOI: 10.7868/S0424857013100095.

17. Schumb W. C., Satterfield C. N., Wentworth R. L. *Hydrogen peroxide* / A. C. S. Monograph. No. 128. New York : Reinhold Publishing Corporation, 1955. 759 p.

References

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. *Man-made Closed Ecological Systems*. Taylor & Francis Inc., 2003, 400 p.

2. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Kovaleva N. P., Lamaze B., Lobo M., Lasseur Ch. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects. *Advances in Space Research*. Vol. 40, Iss. 11, 2007, P. 1741–1745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.

3. Bartsev S. I. [Similarity relationships and complexity reduction in ecosystems models]. *EcoMathMod 2009* [Materials Scientific Conf. “Mathematical modelling in ecology”]. Puschino, Russia, 2011, P. 25–26 (In Russ.).

4. Lisovsky G. M. et al. *Zamknutaya sistema: chelovek – vishie rastenya*. [A closed system: human – higher plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 160 p.

5. Biophysics. Open tutorial. Edited by S. I. Bartsev, Krasnoyarsk, 2017. 184 p. Available at: <http://build.molpit.org/pub/biophysics/tutorial.pdf> (accessed 22.08.2017).

6. Gòdia F., Albiol J., Montesinos J. L., Pérez J., Creus N., Cabello F., Mengual X., Montras A., Lasseur Ch. MELISSA: a loop of interconnected bioreactors to develop life support in Space. *Journal of Biotechnology*. 2002, Vol. 99, Iss. 3, P. 319–330. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(02\)00222-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00222-5).

7. Ushakova S. A., Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Tikhomirova N. A., Anischenko O. V. [Possible ways of human exometabolites inclusion into mass turnover of biological life support systems]. *Aerospace and ecological medicine*. 2009, Vol. 43, No. 2, P. 61–63 (In Russ.).

8. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Klevetz V. V. [Prospects for using “wet” incineration of

organic waste in hydrogen peroxide for closed life support systems]. *Khimia v interesah ustoychivogo razvitiya*. 2014, Vol. 22, No 2, P. 203–208 (In Russ.).

9. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Degermendzi A. G. *A device for optimized treatment of human wastes and inedible plant biomass for production of fertilizers*. Patent No. 146378, Russia, 2014.

10. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Trifonov S. V., Ushakova S. A. Assessing the feasibility of involving gaseous products resulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a bio-technical life support system. *Advances in Space Research*. 2012, Vol. 49, P. 249–253. DOI: 10.1016/j.asr.2011.10.003.

11. Sutormina E. F. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Ivanova Yu. A., Pinaeva L. G., Tikhomirov A. A., Isupova L. A. [Physico-chemical treatment of human exometabolites for closed life support systems]. *Khimia v interesah ustoychivogo razvitiya*. 2011, Vol. 19, P. 413–420 (In Russ.).

12. Tikhomirov A. A., Trifonov S. V., Morozov E. A., et al. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems. *Doklady Akademii Nauk, Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016, Vol. 470, P. 316–318 (In Russ.).

13. Saltykov M. Yu., Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. [Computer automation of organic wastes “wet incineration” installation for closed ecosystems]. *Vestnik SibGAU*. 2017, Vol. 17, No. 2, P. 438–443 (In Russ.).

14. Tikhomirova N. A., Ushakova S. A., Tikhomirov A. A. et al. Possibility of *Salicornia europaea* use for the human liquid wastes inclusion into BLSS intrasystem mass exchange. *Acta Astronautica*. 2008, Vol. 63, P. 1106–1110.

15. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Trifonov S. V. [Physicochemical Conversion of Human Exometabolites for the NaCl Involvement into the Mass Exchange in Closed Life Support Systems]. *Doklady Akademii Nauk*. 2016, Vol. 466, No. 1, P. 114–116. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

16. Kolyagin G. A., Kornienko V. L., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Trifonov S. V. [Electrosynthesis of hydrogen peroxide from oxygen in gas-diffusion electrode in solutions of mineralized exometabolites]. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2013, Vol 49, No. 10, P. 1120–1124 (In Russ.). DOI: 10.7868/S0424857013100095.

17. Schumb W. C., Satterfield C. N., Wentworth R. L. *Hydrogen peroxide*, A. C. S. Monograph No. 128. Reinhold Publishing Corporation, New York, 1955, 759 p.

© Морозов Е. А., Трифонов С. В., Салтыков М. Ю., Мurygin А. В., Тихомиров А. А., 2017