

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РЫБНЫХ ОТХОДОВ В РЕАКТОРЕ «МОКРОГО» СЖИГАНИЯ ДЛЯ ЗАМКНУТЫХ ЭКОСИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**С. В. Трифонов<sup>1,2\*</sup>, Е. А. Морозов<sup>1,2</sup>, А. В. Мuryгин<sup>2</sup>, А. А. Тихомиров<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт биофизики СО РАН

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

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

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

\*E-mail: trifonov\_sergeri@inbox.ru

*Технологии утилизации органических отходов внутри замкнутых экосистем (ЗЭС) космического назначения позволяют вовлечь вещество отходов в массообменный процесс ЗЭС, что обеспечивает поддержание жизнедеятельности экипажа. Среди таких технологий перспективной представляется комплексная технология, включающая утилизацию и вовлечение во внутрисистемный массообмен рыбных отходов. Это связано с тем, что рыба рассматривается как один из перспективных источников животного белка для экипажа ЗЭС. В связи с этим представлены результаты исследований по разработке технологии минерализации органических отходов, включая рыбные отходы. Требования, предъявляемые к такой технологии, включают, в частности, экологичность образующихся продуктов, приемлемую скорость переработки (среднее время переработки суточной нормы отходов не превышает суток), достаточную легкость и компактность, простоту включения продуктов в трофическую цепь биологических звеньев ЗЭС и возможность совместно перерабатывать различные типы органических отходов, характерных для ЗЭС (плотные и жидкие отходы жизнедеятельности человека, несъедобная растительная биомасса и продукты жизнедеятельности и несъедобная биомасса других биологических звеньев ЗЭС). Разработанный в Институте биофизики СО РАН метод «мокрого» сжигания в перекиси водорода удовлетворяет вышеперечисленным требованиям и был взят за основу технологического процесса утилизации рыбных отходов. В ходе исследования была экспериментально доказана эффективность совместного окисления рыбных отходов с экзометаболитами человека, что в совокупности с процессом пережигания осадка в реакторе «мокрого» сжигания позволяет минерализовать рыбные отходы в достаточной мере, чтобы использовать продукты переработки в качестве источника минерального питания растительного звена ЗЭС. Общее время технологических процессов составляет примерно 14 ч. Удастся вывести в доступную для растений форму более 90 % минеральных макроэлементов. Полученная динамика процесса позволяет в дальнейшем наладить автоматическое управление реактором на основании показаний текущего времени с возможностью аварийного отключения по показаниям давления, температуры и силы тока. Представленная работа открывает перспективы для разработки блока физико-химической комплексной переработки различных видов органических отходов для ЗЭС космического назначения.*

*Ключевые слова: замкнутые системы жизнеобеспечения, массообмен, технологические процессы, переработка отходов, удобрения.*

Siberian Journal of Science and Technology. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 949–955

**DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY FOR MINERALIZATION OF FISH WASTE IN THE “WET” COMBUSTION REACTOR FOR THE CES INTENDED FOR SPACE FLIGHTS**S. V. Trifonov<sup>1,2\*</sup>, E. A. Morozov<sup>1,2</sup>, A. V. Murygin<sup>2</sup>, A. A. Tikhomirov<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Institute of Biophysics SB RAS

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

<sup>2</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

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

\*E-mail: trifonov\_sergeri@inbox.ru

*By using technologies of organic waste processing within Closed Ecological Systems (CES) intended for space flights, waste material can be involved in the CES material cycling, enabling life support of the crew. An integrated technology, which includes fish waste processing and involvement in the mass exchange in the system, seems a promising process. Fish is considered as one of the potential sources of animal protein for the CES crew. Thus, this paper reports the results of developing the technology for mineralization of organic waste, including fish waste. Such a technology must meet the following requirements: the resultant products must be environmentally friendly, processing must*

*take a reasonable period of time (the average time of processing of the daily waste is no longer than 24 h), the processing facility must be easy to handle and compact, the products must be readily incorporated into the food chain of the CES biological components, and the technology must be suitable for simultaneous processing of various types of organic waste typical of the CES (human solid and liquid wastes, inedible plant biomass, and waste products and inedible biomass of other biological components of the CES). The method of "wet" combustion in hydrogen peroxide developed at the Institute of Biophysics SB RAS fulfills the above requirements, and, thus, it was used as the basis for the fish waste processing technology. The process of oxidation of fish waste together with human solid and liquid waste developed in this study enables both burning the sediment in the "wet" combustion reactor and mineralizing fish waste to products that can be used as a source of mineral nutrients for the plant component of the CES. The total duration of the technological processes is about 14 h. More than 90 % of mineral macro elements are present in the resultant products in the form available to plants. The process dynamics achieved in this study suggests that, in the future, the reactor can be controlled automatically, based on the running time data, with the emergency shutdown based on indicators of pressure, temperature, and current intensity. The present study offers the opportunity to develop a compartment of physico-chemical processing of various organic waste types for the CES intended for space flights.*

*Keywords: closed life support systems, mass exchange, technological processes, waste processing, fertilizers.*

**Введение.** Применение замкнутых систем жизнеобеспечения (ЗСЖО) для продолжительных миссий человека на Луне, Марсе и других небесных телах требует организации круговоротных массообменных процессов. Такие процессы являются ключевым моментом, так как позволяют вновь получать из отходов жизнедеятельности экипажа и других органических отходов, характерных для ЗСЖО, жизненно важные для человека продукты: кислород, воду и пищу. Благодаря этому снижается необходимость в поставках продуктов на инопланетные базы, что значительно удешевляет их эксплуатацию и повышает их автономность. При этом для организации такого круговорота требуются технологии и оборудование, имеющие существенный вес и размеры. Поэтому вопрос создания габаритного и простого в реализации метода утилизации органических отходов, предназначенного для их переработки в минеральные удобрения, является актуальным.

В Институте биофизики СО РАН разработан метод «мокрого» сжигания отходов в водном растворе перекиси водорода под действием переменного электрического тока. Данный метод позволяет перерабатывать различные типы отходов (экзометаболиты человека, несъедобная растительная биомасса) в течение нескольких часов при температуре и давлении, близких к нормальным [1; 2]. Получаемый таким образом минерализованный раствор может быть использован в качестве добавки минерального питания звена высших растений [3]. Способ позволяет осуществить минерализацию различных типов отходов при соответствующем подборе напряжения, подаваемого на электроды реактора, обеспечивающего приемлемую глубину минерализации (вывод большей части минеральных элементов в раствор) в течение нескольких часов и полное разложение остаточных количеств перекиси водорода в растворе. Такой соответствующий подбор напряжения далее по тексту будет обозначаться как режим минерализации.

Ранее были успешно разработаны режимы, позволяющие утилизировать в реакторе «мокрого» сжигания экзометаболиты человека и несъедобную растительную биомассу [2], источниками которых в ЗСЖО являются звено-задатчик – экипаж и источник растительной пищи – звено высших растений [4; 5]. В то же

время, если мы говорим о вземных планетарных космических базах, функционирующих автономно многие годы, необходимо решить вопрос обеспечения экипажа животной пищей. Одним из наиболее перспективных кандидатов рассматривается рыба, так как к рыбной пище нет психологического барьера и она является универсальной практически для всего населения планеты. Однако употребление рыбы в диете экипажа ведет к образованию внутри системы нового типа органических отходов – рыбных отходов (чешуя, голова и внутренности). В связи с этим целью данной работы является разработка режима и принципов минерализации рыбных отходов методом «мокрого» сжигания.

**Материалы и методы.** Метод «мокрого» сжигания подробно описан в работах [1; 6]. Способ реализации – емкость реактора из химически стойкого материала с двумя электродами и обратным холодильником для снижения интенсивности испарения также опубликован, он достаточно прост и не требует значительной массы материала и вспомогательного оборудования [3; 7]. Конструкция реактора позволяет осуществлять минерализацию любых типов органических отходов после предварительного измельчения и смешивания с перекисью водорода (33–36 %) путем подбора соответствующего режима минерализации, управляемого напряжением, подаваемым на электроды.

В данной статье в качестве потенциального источника белка для экипажа была выбрана речная рыба карась как один из представителей костистых пресноводных рыб, отличающийся неприхотливостью к среде обитания и всеядностью [8]. Речная рыба была рассмотрена в связи с тем, что для морской необходимо выдерживать определенный состав солей, тогда как пресная вода может быть легко получена конденсацией внутри системы, при этом она уже будет витализирована, так как конденсат получается от транспирационной растительной влаги.

В состав рыбных отходов были включены чешуя, внутренности и головы рыб. Кости и плавники были отнесены к съедобной биомассе, так как способ приготовления рыбы в мультиварке позволяет в достаточной мере обработать эти элементы, чтобы включить их в рацион экипажа вместе с мясом рыбы. Кроме того эти элементы послужат источником кальция

для экипажа, что необходимо в условиях пониженной гравитации Марса и Луны. Всю несъедобную биомассу высушивали при 70 °С, измельчали и смешивали с водным раствором перекиси водорода (33 %) в соотношении 4 мл H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (33 %) на 1 г сухих отходов. Данное соотношение было выбрано как начальное для пробных опытов по минерализации рыбных отходов и основывалось на норме расхода перекиси водорода при утилизации 1 г нативного кала [1].

Было выбрано два подхода в разработке режима минерализации рыбных отходов:

- 1) минерализация только рыбных отходов;
- 2) совместная минерализация экзометаболитов человека и рыбных отходов.

Совместная минерализация была выбрана исходя из соображений, что в рыбных отходах содержится большое количество высоковосстановленной органики, в том числе полиненасыщенных жирных кислот, которая может трудно поддаваться окислению или же вообще оказывать стабилизирующее действие на перекись водорода. В результате это могло привести к значительному увеличению времени минерализации и существенному снижению степени окисления из-за разложения перекиси водорода под действием переменного тока без взаимодействия с органическим материалом. Экзометаболиты человека, отличающиеся простотой окисления методом «мокрого» сжигания (время процесса – 1,5–3 ч) [1; 6], играют здесь роль активатора окисления тяжелой органики.

Вовлечение экзометаболитов требует выработки нормы соотношения перерабатываемой массы отходов жизнедеятельности человека и рыбных отходов. Суточная потребность человека в белке составляет примерно 50 г/сут, содержание белка в 100 г рыбы – около 16 г. Таким образом, исходя из данных о потребностях человека в белке, суточную норму рыбных отходов рассчитывали как массу отходов, приходящуюся на 312,5 г мяса речного карася. В сухом виде эта масса отходов составляет примерно 50 ± 2 г. Суточная норма экзометаболитов человека – 150 г нативного кала и 1,5 л урины.

Минерализацию рыбных отходов осуществляли в реакторе с рабочим объемом 1,25 л. Было выработано два режима процесса, управление которыми происходило за счет изменения величины напряжения тока, подаваемого на электроды реактора. В первом случае (ускоренный режим) стремились осуществить наиболее быстрый процесс окисления, многократно меняя значение напряжения так, чтобы процесс протекал максимально интенсивно: повышали напряжение, чтобы усилить интенсивность газовой выделений и пенообразования, и снижали напряжение, если процесс минерализации чрезмерно разогнался и возникла угроза прорыва реактора. Во втором случае (стандартный режим) был выбран режим стабильного течения реакции за приемлемое время (порядка 10 ч), при котором применили технику трехступенчатого течения процесса, как и при минерализации экзометаболитов [1]: стадия разгона реакции за счет повышенного напряжения, стадия поддержания стабильного течения реакции за счет более низкого значения напряжения и стадия дожига, при которой с помощью

повышенного напряжения осуществляли разложение остаточных количеств перекиси водорода в растворе.

После минерализации отходов полученные раствор и осадок разделяли и проводили повторную минерализацию осадка в смеси перекиси водорода (36 %) и азотной кислоты (65 %) в реакторе «мокрого» сжигания по методике, описанной в [9]. Расход перекиси (36 %) и кислоты (65 %) составил 8,24 и 4,18 мл соответственно. Повторная минерализация необходима для того, чтобы вывести из осадка в растворимую форму дополнительную массу таких элементов, как Ca, Mg, P и S, необходимых для питания звена высших растений. Вопросы синтеза перекиси водорода и азотной кислоты внутри ЗСЖО освещены в [10–12].

Эффективность работы режимов минерализации оценивали по таким параметрам, как время процесса, энергопотребление, глубина окисления раствора и осадка (оценивали по значению химического поглощения кислорода (ХПК)) и доля элементов, выходящая в растворенную форму. Эффективность повторного пережигания осадка оценивали по доле элементов, выходящих в растворенной форме из осадка в вытяжку.

**Результаты и обсуждение.** При минерализации только рыбных отходов не удалось довести процесс до конца, так как в растворе после 13 ч реакции оставалось значительное количество перекиси водорода – порядка нескольких процентов. Поэтому данный подход был признан неэффективным для утилизации рыбных отходов.

Динамика процесса совместной минерализации рыбных отходов и экзометаболитов человека отображена на рис. 1 и 2. При ускоренном режиме минерализации отходов было использовано 4 значения напряжения тока (рис. 1), из которых только два были задействованы большую часть времени – 70 и 100 В, эти значения далее были выбраны при работе со стандартным режимом. Основываясь на показаниях динамики силы тока (рис. 2), можно сделать вывод, что оба режима обеспечили примерно одинаковый выход минеральных элементов при минерализации. Это следует из того, что в конце процесса в обоих случаях объем минерализованного раствора отличался не более чем на 20 мл, при этом сила тока в конце каждого режима достигла одинаковых значений. Следовательно, большего выхода минеральных элементов можно достичь только повторным окислением осадка в смеси перекиси водорода и азотной кислоты.

Из данных табл. 1 видно, что при стандартном режиме минерализации отходов процесс занимает большее время и протекает с большим энергопотреблением, однако при данном режиме процесс протекает стабильно: пенообразование происходит не столь интенсивно и снижается риск прорыва реактора. Также следует обратить внимание на то, что при стандартном режиме образовалось примерно в три раза меньше осадка, при этом значение ХПК раствора увеличивается только на треть. Это связано с тем, что из-за более глубокой минерализации осадка часть недоокисленных органических соединений уходит в раствор в виде взвеси. Степень минерализации осадка при стандартном режиме вдвое выше, и получается,

что при данном режиме литр минерализованных отходов (осадок + раствор) минерализован в два раза глубже, чем при ускоренном:  $\sim 15,5$  и  $\sim 7,2$  г/л для ускоренного и стандартного режимов соответственно. Также видно, что при стандартном режиме содержание липидов в осадке в два раза ниже, чем при ускоренном. Все это свидетельствует о более глубокой минерализации органических отходов в случае использования стандартного режима. Поэтому данный режим был взят за основу для совместной утилизации рыбных отходов и экзометаболитов человека.

Рассматривая степень выхода минеральных элементов в раствор (табл. 2), видно, что такие элементы, как Ca, Fe, Mg и P, в основной массе (от 80 до 90 %) находятся в осадке. Поэтому при добавлении таких продуктов минерализации в питательный раствор для выращивания растений фототрофного звена ЗСЖО на

нейтральном субстрате они окажутся в недоступной для растений форме. Данные элементы могут быть усвоены растениями при внесении осадка в почвоподобный субстрат [13–15], однако в этом случае время утилизации осадка в почвоподобном субстрате, а значит и время возвращения элементов в массообменный цикл ЗСЖО, может достигать нескольких месяцев [16]. Это может потребовать повторной минерализации осадка в реакторе «мокрого» сжигания в смеси перекиси водорода и кислоты.

Повторная минерализация привела к выходу в доступную для растений форму (в составе раствора и вытяжки из осадка) более 90 % минеральных макроэлементов и около 84 % железа (табл. 3). Время процесса и его удельное энергопотребление при этом составили 3,5 ч и 7,2 кВт·ч на 1 л минерализуемых отходов соответственно.

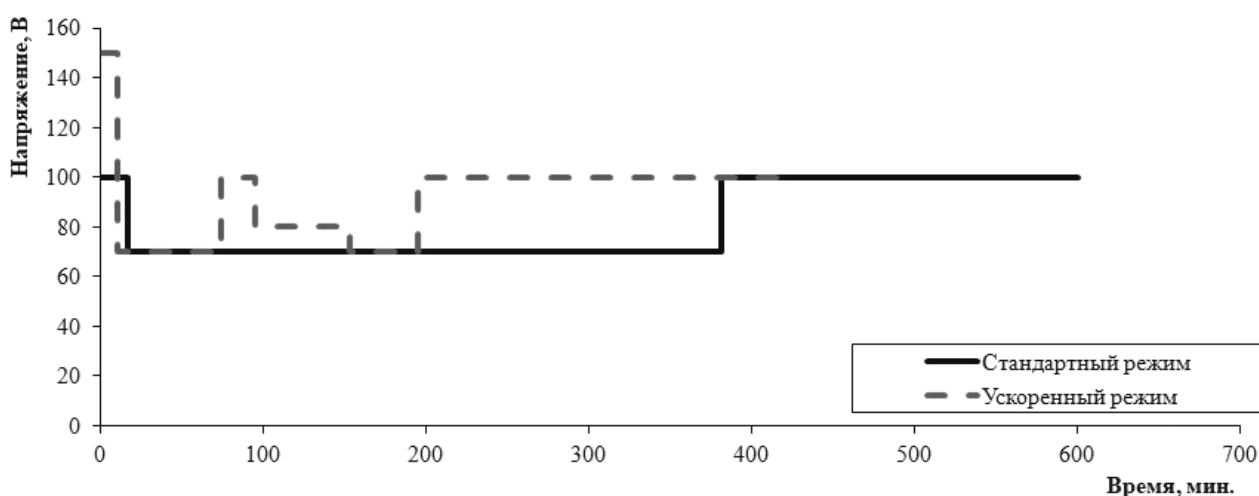


Рис. 1. Динамика изменения напряжения тока на электродах при различных режимах совместной минерализации рыбных отходов с экзометаболитами человека

Fig. 1. Dynamics of voltage change at electrodes under different regimes of joint mineralization of fish wastes with human exometabolites

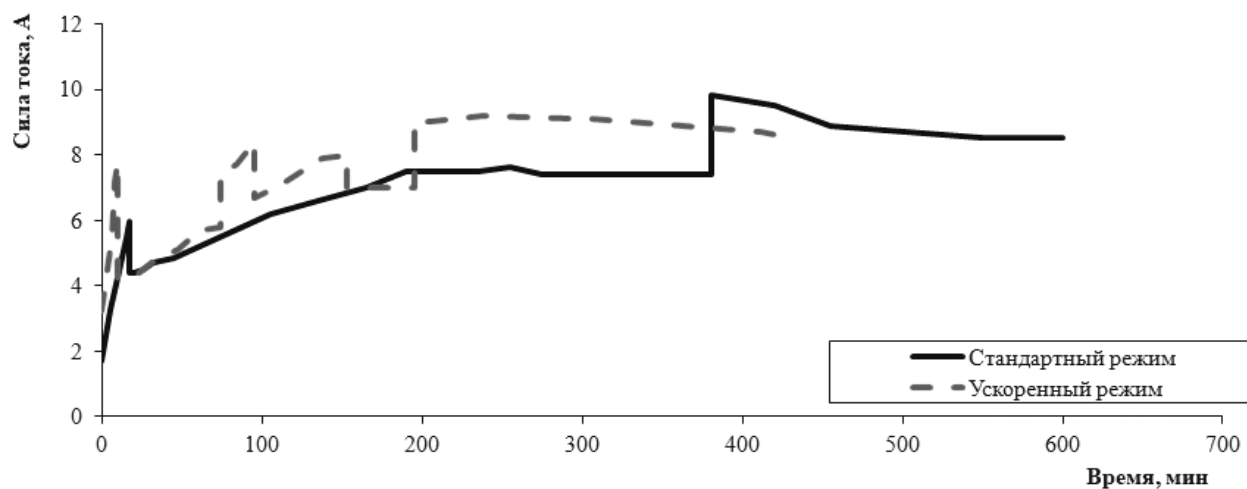


Рис. 2. Динамика изменения силы тока на электродах при различных режимах совместной минерализации рыбных отходов с экзометаболитами человека

Fig. 2. Dynamics of current intensity change at electrodes under different regimes of joint mineralization of fish wastes with human exometabolites

Таблица 1

## Эффективность различных режимов совместной минерализации рыбных отходов с экзометаболитами

Режим	Конечные продукты	ХПК, мг/л	Осадок, мг/л	Время реакции, мин	Удельное энергопотребление, кВт·ч/л
Ускоренный	Раствор	3711,23	6234,40	429	4,16
	Осадок	11747,48			
Стандартный	Раствор	4985,42	2233,87	600	4,98
	Осадок	2166,41			

Таблица 2

## Распределение минеральных макроэлементов и железа в продуктах совместной переработки рыбных отходов и экзометаболитов человека, %

Продукт минерализации	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S
Раствор	0,7	1,1	95,8	18,2	94,8	18,1	95,9
Осадок	99,3	98,9	4,2	81,8	5,2	81,9	4,1

Таблица 3

## Распределение минеральных макроэлементов и железа в продуктах переработки после повторной минерализации осадка, %

Продукт минерализации	Ca	Fe	K	Mg	Na	P	S
Раствор	0,7	1,1	95,8	18,2	94,8	18,1	95,9
Вытяжка из осадка	94,4	83,0	4,0	78,6	5,0	78,5	3,9
Конечный осадок	4,9	15,9	0,2	3,2	0,2	3,4	0,2

Таким образом, можно сказать, что оптимальным методом утилизации рыбных отходов является их совместная минерализация с экзометаболитами человека в реакторе «мокрого» сжигания с последующим пережиганием осадка в смеси перекиси водорода и кислоты.

**Заключение.** В результате выполненной работы был выработан подход в утилизации рыбных отходов применительно к массообменным процессам ЗСЖО космического назначения. Установлено, что минерализация рыбных отходов в реакторе «мокрого» сжигания требует присутствия легкоокисляемой органики как активатора процесса окисления. В качестве такой органики в условиях ЗСЖО выступают экзометаболиты человека. Показано, что стандартный режим хода процесса минерализации, поддерживающий устойчивое окисление без критических моментов повышения газовой выделенности и пенообразования, приводит к более глубокому окислению отходов при сравнительно небольшом повышении удельного энергопотребления. Показана эффективность проведения повторной минерализации осадка в реакторе «мокрого» сжигания в смеси перекиси водорода и кислоты для более полного выведения минеральных элементов в доступную для растений форму.

В итоге, разработанная технология минерализации рыбных отходов имеет следующие характеристики: общее время процессов минерализации отходов и повторного окисления осадка составляет 13,5 ч, удельное энергопотребление – 12,2 кВт·ч/л, степень выхода минеральных макроэлементов и железа – более 90 и 80 % соответственно. Данные показатели удовлетворяют требованиям организации массообменных процессов внутри ЗСЖО, поэтому разработанная технология является перспективной для включения

в структуру замкнутых экосистем, так как расширяет функциональные возможности физико-химического блока в области переработки органических отходов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИБФ СО РАН по теме № 56.1.4. на 2013–2020 годы.

**Acknowledgements.** This work was conducted in the framework of the Institute of Biophysics SB RAS State task theme № 56.1.4. for 2013–2020.

## Библиографические ссылки

1. Перспективы использования «мокрого» сжигания органических отходов в перекиси водорода для замкнутых систем жизнеобеспечения / С. В. Трифонов [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. № 2 (22). С. 203–208.
2. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A. Bioassay of products of organic waste mineralization: An approach for closed ecosystems // Ecological Engineering. 2016. Vol. 91. P. 139–142.
3. Пат. 2111939 Российская Федерация, МКИ<sup>6</sup> С 05 F 3/00. Способ утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящий к получению из них удобрений / Куденко Ю. А., Павленко Р. А. № 96114242/13 ; заявл. 10.07.96 ; опубл. 27.05.98, Бюл. № 15. 4 с.
4. Замкнутая система: человек – высшие растения / под ред. Г. М. Лисовского. Новосибирск : Наука, 1979. 160 с.
5. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. Man-made Closed Ecological Systems. Taylor & Francis Inc., 2003. 400 p.
6. Trifonov S. V., Kudenko Y. A., Tikhomirov A. A. Prospects for using a full-scale installation for wet combustion of organic wastes in closed life support systems //

Life Sciences in Space Research. 2015. Vol. 7. P. 15–21. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lssr.2015.08.003>.

7. Пат. 141130 Российская Федерация. С 05 F 3/00. Устройство утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящее к получению из них удобрений / Трифонов С. В., Куденко Ю. А., Тихомиров А. А., Дегерменджи А. Г. № 2013154367/13 ; заявл. 06.12.13 ; опубл. 27.05.15, Бюл. № 15. 4 с.

8. Кабальский В. Н. Выращивание рыб в малых водоемах фермерских хозяйств // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2013. № 14 (19). С. 69–73.

9. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems / A. A. Tikhomirov [et al.] // Doklady Biochemistry and Biophysics. 2016. Vol. 470. P. 316–318. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

10. 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.

11. Assessment of Composition and Toxicity for Plants of Gases Produced during Physicochemical Processing of Human Exometabolites as Applied to Biotechnical Life Support Systems / A. A. Tikhomirov [et al.] // Doklady Biochemistry and Biophysics. 2011. Vol. 441. P. 252–254. DOI: 10.1134/S1607672911060032.

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

13. Characteristics of the soil-like substrates produced with a novel technique combining aerobic fermentation and earthworm treatment / W. Kang [et al.] // Advances in Space research. 2012. Vol. 50. P. 1495–1500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.038>.

14. Velichko V. V., Tikhomirov A. A., Ushakova S. A. Estimating CO<sub>2</sub> gas exchange in mixed age vegetable plant communities grown on soil-like substrates for life support systems // Life Sciences in Space Research, 2017. Article in press. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.11.001>.

15. Light intensity and production parameters of phytocenoses cultivated on soil-like substrate under controlled environment conditions / A. A. Tikhomirov [et al.] // Advances in Space Research. 2003. № 31 (7). P. 1775–1780. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)80020-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)80020-0).

16. Use of human wastes oxidized to different degrees in cultivation of higher plants on the soil-like substrate intended for closed ecosystems / A. A. Tikhomirov [et al.] // Advances In Space Research. 2010. Vol. 46. P. 744–750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.024>.

## References

1. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Klevetz V. V. [Prospects of using organic wastes “wet” incineration in hydrogen peroxide for closed life support systems]. *Khimia v interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2014, Vol. 2 (22), P. 203–208 (In Russ.).

2. Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A. Bioassay of products of organic waste mineralization: An

approach for closed ecosystems. *Ecological Engineering*. 2016, Vol. 91, P. 139–142.

3. Kudenko Ju. A., Pavlenko R. A. *MKI6 C 05 F 3/00 Sposob utilizatsii otkhodov zhiznedeyatel'nosti cheloveka i nes'edobnoy biomassy rasteniy, privodyashchiy k polucheniyu iz nikh udobreniy* [Way of utilization of human wastes and inedible plant biomass, gaining hydroponic fertilizer]. Patent No 2111939, Russia, 1996.

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

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

6. Trifonov S. V., Kudenko Y. A., Tikhomirov A. A. Prospects for using a full-scale installation for wet combustion of organic wastes in closed life support systems. *Life Sciences in Space Research*. 2015, Vol. 7, P. 15–21. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lssr.2015.08.003>.

7. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Tikhomirov A. A., Degermendzi A. G. *A device for treatment of human wastes and inedible plant biomass for production of fertilizers*. Patent No 141130, Russia, 2013.

8. Kabalskiy V. N. [Fish cultivation in small ponds on farms]. *Vestnik Rossiyskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2013, Vol. 14 (19), P. 69–73 (In Russ.).

9. Tikhomirov A. A., Trifonov S. V., Morozov E. A. et al. Development of human exometabolites deep mineralization method for closed ecosystems. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2016, Vol. 470, P. 316–318. DOI: 10.1134/S1607672916010051.

10. 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 interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2011, Vol. 19, P. 413–420 (In Russ.).

11. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Degermendzhi A. G., Trifonov S. V., Sutormina E. F., and Ivanova Yu. A. Assessment of Composition and Toxicity for Plants of Gases Produced during Physicochemical Processing of Human Exometabolites as Applied to Biotechnical Life Support Systems. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2011, Vol. 441, P. 252–254. DOI: 10.1134/S1607672911060032.

12. 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.

13. Kang W., He W., Li L., Hong L. Characteristics of the soil-like substrates produced with a novel technique combining aerobic fermentation and earthworm treatment. *Advances in Space research*. 2012, Vol. 50, P. 1495–1500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.038>.

14. Velichko V. V., Tikhomirov A. A., Ushakova S. A. Estimating CO<sub>2</sub> gas exchange in mixed age vegetable plant communities grown on soil-like substrates for life support systems. *Life Sciences in Space Research*. 2017. Article in press. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2017.11.001>.

15. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Gribovskaya I. A., Tirranen L. S., Manukovsky N. S., Zolotukhin I. G., Karnachuk R. A., Gros J.-B., Lasseur Ch. Light intensity and production parameters of phytocenoses cultivated on soil-like substrate under controlled environment conditions. *Advances in Space Research*. 2003, No. 31 (7), P. 1775–1780. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)80020-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)80020-0).

16. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Ushakova S. A. et al. Use of human wastes oxidized to different degrees

in cultivation of higher plants on the soil-like substrate intended for closed ecosystems. *Advances In Space Research*. 2010, Vol. 46, P. 744–750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.024>.

© Трифонов С. В., Морозов Е. А.,  
Мурыгин А. В., Тихомиров А. А., 2017