

УДК 544.623.032.52

Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-751-759

Для цитирования: Трифонов С. В., Тихомиров А. А., Мuryгин А. В. Автоматизированная система очистки жидких продуктов переработки отходов для замкнутых экосистем космического назначения // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24, № 4. С. 751–759. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-751-759.

For citation: Trifonov S. V., Tikhomirov A. A., Murygin A. V. [Automated system for cleaning liquid waste products for closed ecosystems for space purposes]. *Siberian Aerospace Journal*. 2023, Vol. 24, No. 4, P. 751–759. Doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-751-759.

Автоматизированная система очистки жидких продуктов переработки отходов для замкнутых экосистем космического назначения

С. В. Трифонов^{1,2*}, А. А. Тихомиров^{1,2}, А. В. Мuryгин²

¹Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. 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: trifonov_sergei@inbox.ru

Обеспечение жизнедеятельности человека в течение нескольких лет в изолированных условиях будущих марсианских и лунных баз представляется возможным при организации круговоротного процесса преобразования органических отходов, в том числе экзометаболитов человека (кал, урина), в необходимые ему продукты: воду, кислород и пищу. Перспективным способом организации такого круговоротного процесса является создание трехзвенной замкнутой экосистемы (ЗЭС): человек, звено получения удобрений из органических отходов и растения, где растения синтезируют необходимые человеку продукты. В работе рассмотрена оригинальная схема комплексной установки очистки жидких продуктов переработки экзометаболитов человека от поллютантов в процессе получения питательных растворов для выращивания растений в условиях ЗЭС. Переработку экзометаболитов человека осуществляли в устройстве физико-химического окисления в водной среде перекиси водорода под действием переменного электрического тока – в реакторе «мокрого» сжигания. Подобрано периферийное оборудование для организации системы автоматического управления установкой очистки, выявлены проблемы и разработаны подходы в автоматизации технологических процессов и создании программного обеспечения для взаимодействия человека с предлагаемой установкой. Выполнены эксперименты по выращиванию растений салата, подтверждающие эффективность предлагаемых процессов очистки жидких продуктов переработки экзометаболитов человека. Сделан вывод, что созданная комплексная установка очистки, оснащенная предлагаемым программным обеспечением, может быть использована для научных исследований применительно к тематике ЗЭС, в том числе космического назначения.

Ключевые слова: управление технологическим процессом, системы жизнеобеспечения, утилизация органических отходов, обессоливание, растительное звено.

Automated system for cleaning liquid waste products for closed ecosystems for space purposes

S. V. Trifonov^{1,2*}, A. A. Tikhomirov^{1,2}, A. V. Murygin²

¹Institute of Biophysics SB RAS

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

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

Ensuring human life activity for several years in isolated conditions of future Martian and lunar bases is possible with the organization of a circular process of converting organic waste, including human exometabolites (cal, urin), into the products he needs: water, oxygen and food. A promising way to organize such a circular process is to create a three-link closed ecosystem (CES): a person, a link for obtaining fertilizers from organic waste and plants - where plants synthesize the products necessary for a person. The paper considers the original scheme of a complex installation for the purification of liquid products of processing of human exometabolites from pollutants in the process of obtaining nutrient solutions for growing plants in a CES. The processing of human exometabolites was carried out in a device for physicochemical oxidation of hydrogen peroxide in an aqueous medium under the action of alternating electric current – in a “wet” combustion reactor. Peripheral equipment was selected for the organization of the automatic control system of the cleaning plant, problems were identified and approaches were developed in the automation of technological processes and the creation of software for human interaction with the proposed installation. Experiments on the cultivation of lettuce plants have been carried out, confirming the effectiveness of the proposed processes of purification of liquid products of processing of human exometabolites. It is concluded that the created integrated cleaning plant, equipped with the proposed software, can be used for scientific research in relation to the subject of CES, including space purposes.

Keywords: process control, life support systems, utilization of organic waste, desalination, plant link.

Введение

Проблеме создания замкнутых экосистем (ЗЭС) для обеспечения жизнедеятельности человека в условиях длительного космического полета и пребывания на небесных телах (Луна, Марс, астероиды и др.) в настоящее время уделяется все большее внимание ведущими космическими агентствами и другими крупными исследовательскими центрами [1; 2]. В России разработкой замкнутых экосистем космического назначения активно занимается Институт биофизики СО РАН [3]. При этом большое внимание уделяется созданию моделей замкнутых экосистем, на основе которых отрабатываются различные закономерности круговоротных процессов, которые затем могут быть основой для создания полномасштабных замкнутых экосистем с человеком. Будущие замкнутые экосистемы должны включать как биологические, так и физико-химические методы окисления отходов для последующего их включения в круговоротные процессы [4–17]. Для обеспечения эффективной работы физико-химических процессов окисления органических и неорганических отходов в ЗЭС крайне важно создание и устойчивое функционирование комплекса необходимых приборов и оборудования. Неотъемлемой частью такого оборудования является установка очистки жидких продуктов переработки отходов жизнедеятельности человека (кал, урина), поскольку в процессе окисления отходов возникают поллютанты, ингибирующие рост растений. В Институте биофизики СО РАН ведутся исследования по созданию таких методов очистки применительно к замкнутым экосистемам. В частности, разрабатывается программное обеспечение (ПО), позволяющее автоматизировать процессы очистки [17; 18].

Целью данной работы является биотестирование растворов, получаемых после очистки, и разработка цифровой автоматизированной системы управления для установки физико-химической очистки минерализованных экзометаболитов человека.

Методы и подходы

Продолжительное ежедневное прямое внесение минерализованных экзометаболитов в ирригационный раствор вызовет его засоление из-за высокого содержания NaCl в урине человека [19; 20]. Кроме того, метод «мокрого» сжигания практически не способен утилизировать мочевины, что повышает риск развития в системе условно патогенных уробактерий [21] и снижает доступность азота для растительного звена ЗЭС. Поэтому комплекс физико-химической переработки органических отходов включает в себя, помимо «мокрого» сжигания, еще несколько последовательных процессов очистки растворов минерализованных экзометаболитов, для каждого из которых разработан реактор [18]: 1) разложение мочевины; 2) выделение Cl₂; 3) синтез

HCl; 4) выделение щелочи; 5) выделение Na_2CO_3 ; 6) синтез NaCl. В совокупности эти 6 реакторов являются установкой очистки жидких продуктов физико-химической переработки продуктов жизнедеятельности человека.

Для оценки влияния жидких продуктов физико-химического окисления экзометаболитов человека на растения использовали ранее разработанные методические подходы по приготовлению на этой основе питательных растворов для их последующего использования в экспериментальной модели замкнутой экосистемы при условии регулярной (1 раз в 7 сут.) замены 1/8 части питательного раствора водой, т. е. за 8 недель происходила полная смена раствора [22].

Изучение влияния возможных поллютантов в питательном растворе потребовало проверки возможности длительного использования несменяемых растворов, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека, для выращивания растений. Объектом исследований являлся салат сорта «Московский парниковый». Растения в условиях экспериментальной модели замкнутой экосистемы выращивали методом гидропоники на керамзите. Технология и условия выращивания аналогична описанным ранее [22; 23]. Длительность выращивания от всходов до состояния технической зрелости 21 сут. В опытном варианте раствор был приготовлен на основе жидких продуктов минерализации. Контрольные варианты – стандартный раствор Кнопа: контроль 1 – несменяемый раствор с коррекцией; контроль 2 – через каждые 7 сут. раствор меняли на свежеприготовленный. В процессе роста растений коррекцию несменяемых поливных растворов проводили исходными растворами на основе содержания доступных форм азота.

При создании системы автоматизированного управления и программного обеспечения для установки очистки желателен единообразный подход, благодаря которому будет осуществлено однотипное отображение параметров процессов и меню программирования реакторов, а также использована однотипная форма алгоритма автоматизации управления всеми реакторами. Это важно, так как реакторы разные и оператору удобнее контролировать и настраивать их при единообразном отображении интерфейса. Кроме того, разрабатываемая система автоматизации и ПО должны быть легко адаптируемы к подключению возможных новых реакторов в структуру установки очистки. Следуя этой логике автоматика и ПО должны быть адаптируемы и к подключению реактора «мокрого» сжигания и остальных реакторов подсистемы физико-химической минерализации отходов [17]. Это представляется возможным, так как схема взаимодействия программ, соответствующая указанным требованиям к автоматике и ПО установки очистки, одинакова и для реактора «мокрого» сжигания (рис. 1).

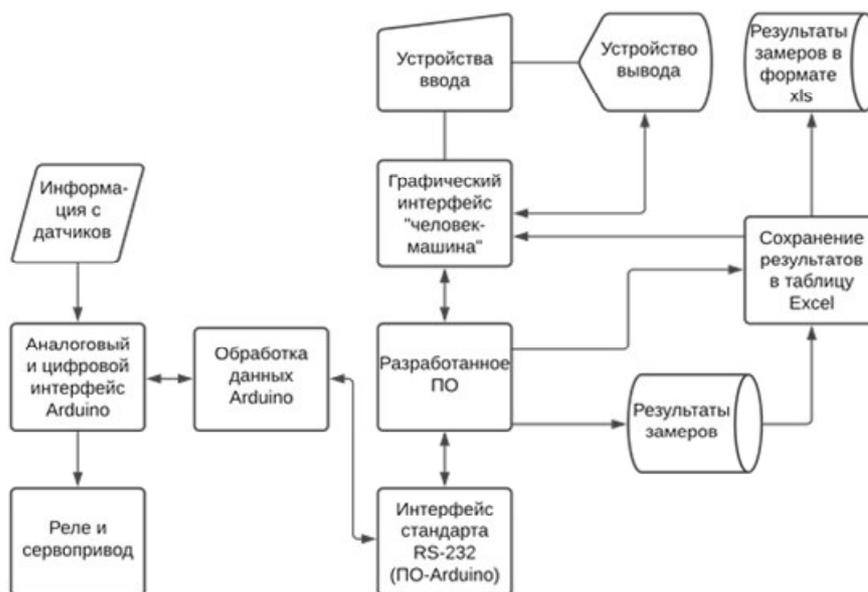


Рис. 1. Схема взаимодействия программ

Fig. 1. Scheme of program interaction

С целью обеспечения взаимодействия с периферийными устройствами, включая датчики, реле, сервоприводы и другие, было принято решение о применении платформы Arduino в связи с ее удобством программирования, широкой поддержкой аппаратных модулей и датчиков. Для программирования Arduino выбрана среда разработки Arduino IDE. Для разработки программного обеспечения с ориентацией на создание удобного интерфейса для конечного пользователя была добавлена дополнительная среда разработки Visual Studio с использованием языка программирования C#.

Алгоритмы работы реакторов

Исследование влияния поллютантов в питательном растворе показало, что биомасса растений салата, выращенных на несменяемых растворах опытного и контрольного вариантов, достоверно не отличалась, как и не было достоверных отличий от биомассы растений, выращенных на контрольных регулярно сменяемых растворах (табл. 1).

Таблица 1

Сухая масса (г) в расчете на одно растение салата сорта «Московский парниковый», выращенное на растворах, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека

Тип питательного раствора	Общая биомасса	Биомасса листьев
Несменяемый раствор экзометаболитов	3,3±0,4	2,9±0,3
Несменяемый раствор Кнопа (контроль 1)	2,8±0,5	2,4±0,5
Сменяемый раствор Кнопа (контроль 2)	2,7±0,9	2,1±0,4

Таким образом, экспериментально показана принципиальная возможность длительного использования питательных растворов, приготовленных на основе жидких продуктов минерализации экзометаболитов человека для выращивания растений фототрофного звена замкнутой экосистемы.

Исходя из анализа процессов физико-химического блока переработки отходов жизнедеятельности человека за основу логического управления был взят алгоритм автоматического управления реакторами [18, рис. 2, Б], логика работы которого заключается в поддержании параметров условий технологического процесса в заданных диапазонах и остановке процесса при достижении целевым параметром заданного значения. В работе [18] не раскрывается принцип работы блока корректировки параметров условий, который является проблемным моментом при попытке создания единой структуры алгоритма автоматического управления установки очистки. Это связано с тем, что процессы в реакторах установки разнообразны: протекают в жидкой и газообразной фазе, имеют один или несколько этапов, могут требовать частичного вмешательства оператора. Поэтому поддержание определенных значений параметров условий в конечном счете требует различных аппаратных и логических решений. В итоге, несмотря на возможность единообразного отображения параметров технологических процессов, программные настройки работы разных реакторов и алгоритмы управления будут отличаться друг от друга.

Необходимость индивидуального подхода в настройках к каждому реактору установки очистки указывает на возможность применения общего ПО для всех реакторов подсистемы физико-химической минерализации отходов [17], включая реактор «мокрого» сжигания, алгоритм работы которого отличается от алгоритма работы установки очистки (рис. 2).

В результате было разработано ПО, в котором для удобства пользователя рабочее пространство оператора разбито на вкладки, где каждой вкладке соответствует свой реактор (рис. 3).

Для каждой вкладки предусмотрены поля для вывода показателей в текстовом формате, кнопки для управления реактором, поля для построения графиков по результатам замеров, а также время работы и текущая дата.

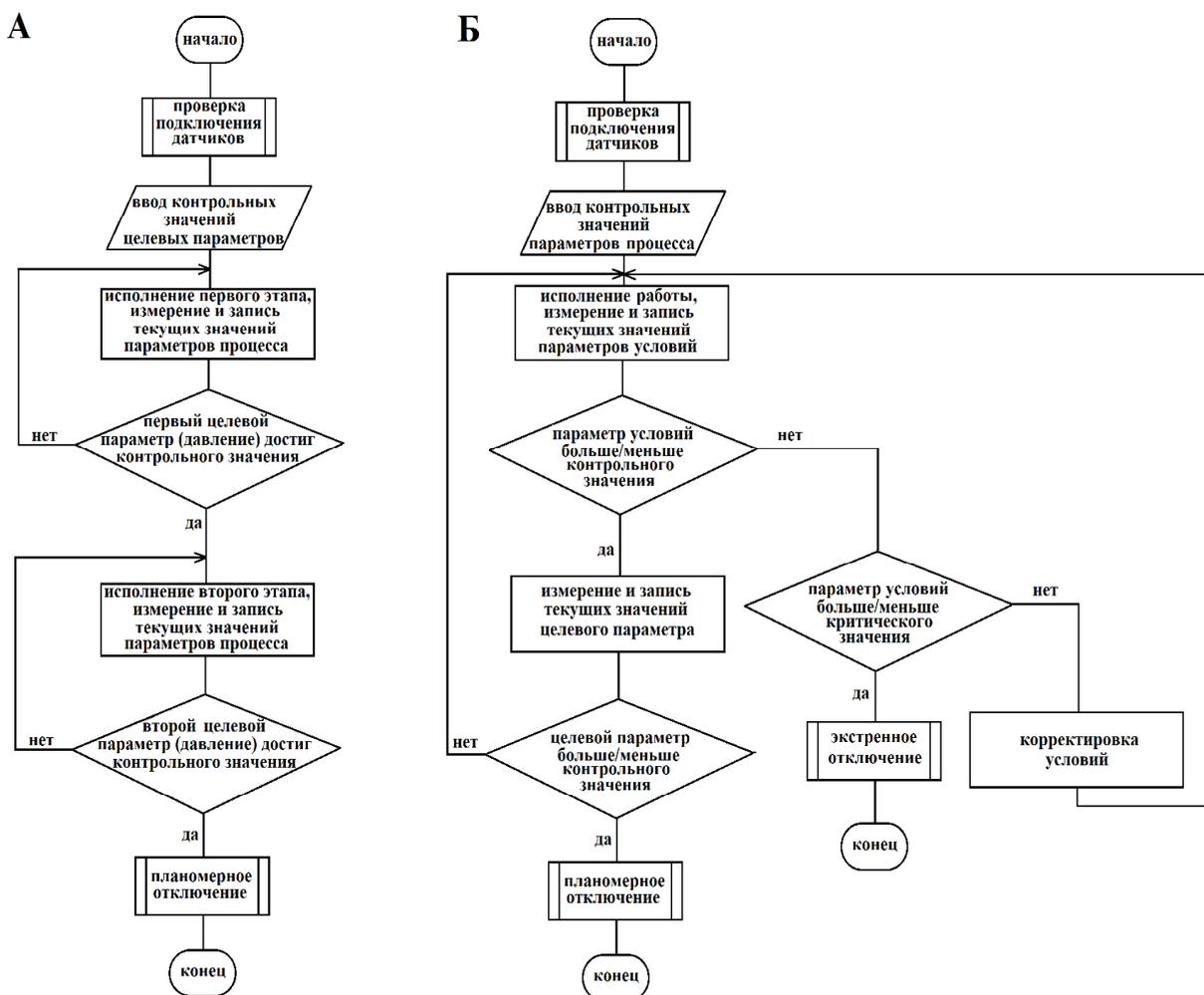


Рис. 2. Алгоритмы работы реакторов:
 А – без контроля параметров условий процесса;
 Б – с контролем параметров условий процесса

Fig. 2. Reactor operation algorithms:
 А – without control of the parameters of the process conditions;
 Б – with control of the parameters of the process conditions

По кнопке «Запустить», в порт подключения подается сигнал, далее Arduino начинает передавать показания запущенного процесса. Данные выводятся в соответствующих полях, и по этим данным начинается построение графиков, представленных на рис. 3, где каждой вкладке соответствует реактор / процесс физико-химической переработки продуктов жизнедеятельности человека. Предлагается четырехцветная маркировка вкладок для обозначения состояния процессов: состояние 1 – процесс не запущен, не текущая вкладка; состояние 2 – процесс не запущен, текущая вкладка; состояние 3 – процесс запущен, не текущая вкладка; состояние 4 – процесс запущен, текущая вкладка. Настройки работы реакторов позволяют ввести значения параметров каждого процесса очистки для автоматического поддержания и корректировки условий его протекания.

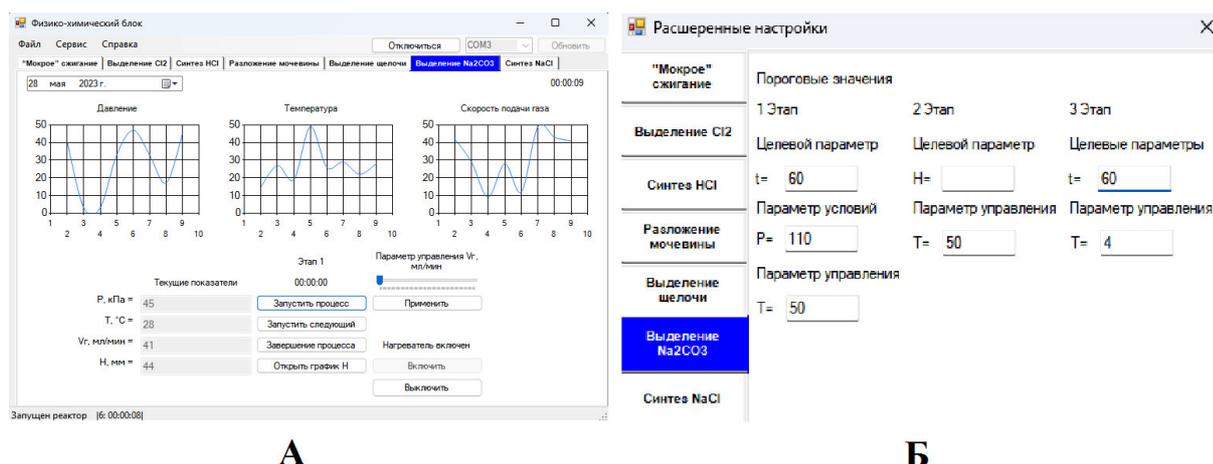


Рис. 3. Окно ПО во время работы:
 А – отображение параметров текущего процесса (выделение Na_2CO_3);
 Б – отображение настроек реактора выделения Na_2CO_3

Fig. 3. The software window during operation:
 А – displaying the parameters of the current process (Na_2CO_3 extraction);
 Б – displaying the settings of the Na_2CO_3 extraction reactor

Когда процесс запущен, помимо вывода данных в текущем времени, осуществляется запись данных в текстовый документ. Все результаты измерений сохраняются в отдельные папки в директории ПО. Названия файлов содержат точную дату запуска. А в самих документах описывается номер запущенного реактора и результаты измерений по времени.

Заключение

Подобрано периферийное оборудование для организации системы автоматического управления, выявлены проблемы и разработаны подходы в автоматизации данных процессов и создании программного обеспечения для взаимодействия человека с предлагаемой установкой. Выполнены эксперименты по выращиванию растений салата, подтверждающие эффективность предлагаемых процессов очистки жидких продуктов переработки экзометаболитов человека.

Таким образом, созданная комплексная установка очистки, оснащенная предлагаемым программным обеспечением, может быть использована для научных исследований применительно к тематике ЗЭС, в том числе космического назначения.

Благодарности. Работы по созданию и апробации установки по очистке от загрязнителей газовой среды были выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 121101300066-7).

Acknowledgements. The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121101300066-7).

Библиографические ссылки

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. D. Manmade Closed Ecological Systems. New York: Taylor and Francis, 2003. 402 p.
2. Wheeler R. M. Agriculture for space: People and places paving the way // Open agriculture, 2017. Vol. 2 (1). P. 14–32.
3. Assessment of the possibility of establishing material cycling in an experimental model of the bio-technical life support system with plant and human wastes included in mass exchange / A. A. Tikhomirov, S. A. Ushakova, V. V. Velichko et al. // J. Acta Astronaut. 2011. Vol. 68. P. 1548–1554.

4. Waste bioregeneration in life support CES: development of soil organic substrate / N. S. Manukovsky, V. S. Kovalev, V. Ye., Rygalov, I. G. Zolotukhin // *Advances In Space Research*. 1997. Vol. 10. P. 1827–1832.
5. Wenting H., Yidong X., Hong L. A technique for preparing soil-like substrate for bioregenerative life support system // *17th IAA Humans in Space Symposium*. Moscow, 2009. P. 53.
6. Пат. 2111939 Российская Федерация, МПК С 05 F 3/08. 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.
7. Nelson M., Dempster W. F., Allen J. P. Integration of lessons from recent research for “Earth to Mars” life support systems // *Advances in Space Research*. 2008. Vol. 41. P. 675–683.
8. Canadian advanced life support capacities and future directions / M. Bamsey, T. Graham, M. Stasiak et al. // *Advances in Space Research*, 2009. Vol. 44. P. 151–161.
9. Drysdale A. E., Ewert M. K., Hanford A. J. Life support approaches for Mars missions // *Advances in Space Research*. 2003. Vol. 31 (1). P. 51–61.
10. Farges B., Poughon L., Creuly C., Cornet J.-F., Dussap C.-G., Lasseur C. Dynamic Aspects and Controllability of the MELiSSA Project: A Bioregenerative System to Provide Life Support in Space // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2008. Vol. 151. P. 686–699.
11. Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique / S. S. Guo, R. X. Mao, L. L. Zhang et al. // *Reach*, 2017. Vol. 6. P. 1–10.
12. Walker J., Granjou C. MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space // *Futures*. 2017. Vol. 92. P. 59–69.
13. Escobar C., Naby J. Past, present, and future of closed human life support ecosystems – a review // *47th International Conference on Environmental Systems*. Charleston, 2017. P. 18.
14. Putnam D. F. Composition and Concentrative Properties of Human Urine. NASA contract report. Washington, 1971. 107 p.
15. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Zolotukhin I. G. Physical-chemical treatment of wastes: A way to close turnover of elements in LSS // *Acta Astronautica*, 2000. Vol. 46. P. 585–589.
16. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Pavlenko R. A. Mineralization of wastes of human vital activity and plants to be used in a life support system // *Acta Astronautica*. 1997. Vol. 41. P. 193–196.
17. Подсистема физико-химических реакторов минерализации отходов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения / Е. А. Морозов, С. В. Трифонов, Салтыков М. Ю. и др. // *Сибирский журнал науки и технологии*. 2017. Т. 18, № 3. С. 585–591.
18. Разработка принципов управления блоком обессоливания для замкнутых систем жизнеобеспечения космического назначения / А. А. Тихомиров, С. В. Трифонов, Е. А. Морозов, А. В. Мурыгин // *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2022. Т. 23, № 3. С. 551–560.
19. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS / S. A. Ushakova, N. P. Kovaleva, I. V. Gribovskaya et al. // *Adv. Space Res.* 2005. Vol. 36. (7). P. 1349–1353.
20. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS / S. A. Ushakova, N. P. Kovaleva, I. V. Gribovskaya et al. // *Advances in Space Research*. 2005. Vol. 36. P. 1349–1353.
21. Mobley H., Mendz G., Hazell S. *Helicobacter pylori: Physiology and Genetics*. ASM Press, 2001. 626 p.
22. A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems / S. A. Ushakova, A. A. Tikhomirov, N. A. Tikhomirova et al. // *Advances In Space Research*. 2012. Vol. 50, No. 7. P. 932–940. DOI: 10.1016/j.asr.2012.05.023.
23. Автоматическая система контроля концентраций O₂ и H₂ в технологических газовых контурах биотехнических систем жизнеобеспечения космического назначения / Е. А. Морозов,

Трифонов С. В., Мурыгин А. В. и др. // Сибирский журнал науки и технологии. 2018. Т. 19, № 4. С. 691–697.

References

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. D. *Manmade Closed Ecological Systems*. New York, Taylor and Francis, 2003, 402 p.
2. Wheeler R. M. *Agriculture for space: People and places paving the way*. *Open agriculture*. 2017, Vol. 2 (1), P. 14–32.
3. Tikhomirov A. A., Ushakova S. A., Velichko V. V., Tikhomirova N. A., Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. V., Gros J.-B., Lasseur Ch. Assessment of the possibility of establishing material cycling in an experimental model of the bio-technical life support system with plant and human wastes included in mass exchange. *J. Acta Astronaut.* 2011, Vol. 68, P. 1548–1554.
4. Manukovsky N. S., Kovalev V. S., Rygalov V. Ye., Zolotukhin I. G. Waste bioregeneration in life support CES: development of soil organic substrate. *Advances In Space Research*. 1997, Vol. 10, P. 1827–1832.
5. Wenting H., Yidong X., Hong L. A technique for preparing soil-like substrate for bioregenerative life support system. *17th IAA Humans in Space Symposium*. Moscow, 2009, P. 53.
6. Kudenko Yu. A., Pavlenko R. A. *Sposob utilizatsii otkhodov zhiznedeyatel'nosti cheloveka i nesjedobnoy biomassy rasteniy, privodyashhiy k polucheniyu iz nih udobreniy* [Way of utilization of human wastes and inedible plant biomass, gaining hydroponic fertilizer]. Patent RF, no. 2111939, 1998.
7. Nelson M., Dempster W. F., Allen J. P. Integration of lessons from recent research for Earth to Mars life support systems. *Advances in Space Research*. 2008, Vol. 41, P. 675–683.
8. Bamsey M., Graham T., Stasiak M. et al. Canadian advanced life support capacities and future directions. *Advances in Space Research*. 2009, Vol. 44, P. 151–161.
9. Drysdale A. E., Ewert M. K., Hanford A. J. Life support approaches for Mars missions. *Advances in Space Research*. 2003, Vol. 31, P. 51–61.
10. Farges B., Poughon L., Creuly C. et al. Dynamic Aspects and Controllability of the MELiSSA Project: A Bioregenerative System to Provide Life Support in Space. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2008, Vol. 151, P. 686–699.
11. Guo S. S., Mao R. X., Zhang L. L. et al. Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique. *Reach*. 2017, Vol. 6, P. 1–10.
12. Walker J., Granjou C. MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space. *Futures*. 2017, Vol. 92, P. 59–69.
13. Escobar C., Nabity J. Past, present, and future of closed human life support ecosystems – a review. *47th International Conference on Environmental Systems*. Charleston, 2017, P. 18.
14. Putnam D. F. *Composition and Concentrative Properties of Human Urine*. NASA contract report. Washington, 1971, 107 p.
15. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Zolotukhin I. G. Physical-chemical treatment of wastes: A way to close turnover of elements in LSS. *Acta Astronautica*. 2000, Vol. 46, P. 585–589.
16. Kudenko Yu. A., Gribovskaya I. A., Pavlenko R. A. Mineralization of wastes of human vital activity and plants to be used in a life support system. *Acta Astronautica*. 1997, Vol. 41, P. 193–196.
17. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Saltykov M. Yu. et al. [Physico-chemical waste mineralization reactors subsystem for closed bio technical life support systems for space application]. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, No. 3, P. 585–591 (In Russ.).
18. Tikhomirov A. A., Trifonov S. V., Morozov Ye. A., Murygin A. V. [Development of control principles for the desalination unit for closed life support systems for space purposes]. *Siberian Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 3, P. 551–560 (In Russ.).

19. Ushakova S. A., Kovaleva N. P., Gribovskaya I. V. et al. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS. *Adv. Space Res.* 2005, Vol. 36 (7), P. 1349–1353.

20. Ushakova S. A., Kovaleva N. P., Gribovskaya I. V., Dolgushev V. A., Tikhomirova N. A. Effect of NaCl concentration on productivity and mineral composition of *Salicornia europaea* as a potential crop for utilization NaCl in LSS. *Advances in Space Research.* 2005, Vol. 36, P. 1349–1353.

21. Mobley H., Mendz G., Hazell S. *Helicobacter pylori: Physiology and Genetics.* ASM Press, 2001, 626 p.

22. Ushakova S. A., Tikhomirov A. A., Tikhomirova N. A. et al. A biological method of including mineralized human liquid and solid wastes into the mass exchange of bio-technical life support systems *Advances In Space Research.* 2012, Vol. 50, No. 7, P. 932–940. DOI: 10.1016/j.asr.2012.05.023.

23. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. [Automatic Control System of O₂ and H₂ Concentrations in Technological Gas Circuits of BTLSS Space Application]. *Siberian Journal of Science and Technology.* 2018, Vol. 19, No. 4, P. 691–697 (In Russ.).

© Тихомиров А. А., Трифонов С. В., Морозов Е. А., Мурыгин А. В., 2023

Тихомиров Александр Аполлинариевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией управления биосинтезом фототрофов, Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук; заведующий кафедрой замкнутых экосистем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Трифонов Сергей Викторович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией проблем создания круговоротных процессов искусственных экосистем, Институт биофизики Сибирского отделения Российской Академии наук; доцент кафедры замкнутых экосистем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Мурыгин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: avm514@mail.ru.

Tikhomirov Alexander Apollinariievich – Dr. Sc., professor, Head of laboratory of Phototrophic Biosynthesis Control, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Head of chair of Closed EcoSystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: alex-tikhomirov@yandex.ru.

Trifonov Sergei Viktorovich – Ph. D., head of Laboratory for Problems of Establishing Cycling Processes of Artificial Ecosystems, Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Department of Closed Ecosystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Murygin Alexander Vladimirovich – Dr. Sc., professor, Head of chair of Information and Management Systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: avm514@mail.ru.
