

УДК 544.623.032.52

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-551-560

Для цитирования: 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. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-551-560.

For citation: 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. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-3-551-560.

Разработка принципов управления блоком обессоливания для замкнутых систем жизнеобеспечения космического назначения*

А. А. Тихомиров^{1,2}, С. В. Трифонов^{1,2*}, Е. А. Морозов¹, А. В. Мурыгин²

¹Институт биофизики 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

Освоение Солнечной системы человеком подразумевает создание долгосрочных обитаемых баз на ряде космических тел: Луне, Марсе и др. Поддержание на таких базах среды благоприятной для экипажа возможно благодаря системам жизнеобеспечения (СЖО), в которых реализуется замкнутый массообмен продуктов и отходов между экипажем, звеном высших растений и другими звеньями. Замкнутость повышает надежность и автономность системы, снижает стоимость ее снабжения. Управление таким массообменом представляет трудной технической задачей, требующей затрат многих человеко-часов, что является ценным ресурсом при осуществлении пилотируемых космических миссий. В общем случае эта задача решается средствами автоматики, однако, необходимо учитывать специфику процессов, поддерживающих массообмен, так как это позволит найти пути упрощения аппаратной и логической составляющих, повысить их универсальность и надежность.

В данной статье представлен анализ технологических процессов экспериментального блока выделения NaCl из растворов минерализованных метаболитов человека и предложен простой алгоритм управления, который без принципиальных изменений может быть использован для всех процессов блока. Без разработки цикла превращений NaCl становится практически невозможным создание долгосрочно функционирующей биолого-технической системы жизнеобеспечения – оптимального варианта СЖО для инопланетных баз. В таких системах происходит массообмен между экипажем и звеном высших растений и существует опасность накопления NaCl в ирригационных растворах и последующего отравления растительного звена. Поэтому проблема управления циклом превращений NaCl в массообменных процессах высокой степени замкнутости является актуальной, а универсальные принципы автоматизированного управления могут быть использованы не только в космических, но и земных приложениях: в замкнутых агротехнических циклах и научно-образовательных стендах.

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

* Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0287-2021-0024).

The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0287-2021-0024).

Development of control principles for the desalination unit for closed life support systems for space purposes

A. A. Tikhomirov^{1,2}, S. V. Trifonov^{1,2*}, Ye. A. Morozov¹, 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

The development of the Solar system by humans implies the creation of long-term habitable bases on a number of cosmic bodies: the Moon, Mars, etc. Maintaining an environment favorable for the crew on such bases is possible thanks to life support systems (LSS), in which a closed mass transfer of products and waste between the crew, the unit of higher plants and other links is implemented. Closure increases the reliability and autonomy of the system, and reduces the cost of its supply. Controlling such mass transfer appears to be a difficult technical task requiring many man-hours, which is a valuable resource in the implementation of manned space missions. In the general case, this problem is solved by means of automation, however, it is necessary to take into account the specifics of the processes that support mass transfer, since this will allow finding ways to simplify the hardware and logical components, increase their versatility and reliability.

This article presents an analysis of the technological processes of the experimental unit for the separation of NaCl from solutions of mineralized human metabolites and proposes a simple control algorithm that can be used for all processes of the unit without fundamental changes. Without the development of a NaCl transformation cycle, it becomes almost impossible to create a long-term functioning biological and technical life support system – the optimal LSS option for alien bases. In such systems, mass transfer occurs between the crew and the link of higher plants and there is a danger of NaCl accumulation in irrigation solutions and subsequent poisoning of the plant link. Therefore, the problem of controlling the NaCl transformation cycle in mass transfer processes of a high degree of closure is relevant, and the universal principles of automated control can be used not only in space, but also in terrestrial applications: in closed agrotechnical cycles and scientific and educational stands.

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

Введение

Замкнутые искусственные экосистемы, включающие человека и высшие растения, представляют научный интерес в исследованиях круговоротных процессов естественных и искусственных экосистем. Технологии, разрабатываемые для организации массообмена между экипажем и звеном высших растений, планируется использовать при создании биотехнических систем жизнеобеспечения (БТСЖО) планетарных баз, в том числе лунной и марсианской [1–3]. Одним из ключевых моментов в организации массообмена является быстрая и экологически чистая переработка органических отходов, в том числе метаболитов человека, в удобрения. Существует ограниченное число методов такой утилизации [1–12], каждый из которых имеет недостатком высокое относительное содержание NaCl в продуктах переработки. Постоянное их использование в качестве удобрений приведет к засолению ирригационных растворов и снижению производительности космической оранжереи при ее долговременном многомесячном функционировании. В итоге экипаж начнет испытывать дефицит растительной пищи, а затем воды и кислорода. В этой связи представляется актуальным развитие технологий обессоливания [13; 14], в том числе развитие автоматизированного управления соответствующими технологическими процессами.

Очевидно, что разработку технологии извлечения NaCl рациональнее всего выполнять в комплексе с технологией переработки отходов, так как основным источником NaCl в массо-

обмене являются метаболиты человека. В Институте биофизики СО РАН ведется разработка комплекса физико-химической переработки отходов растительного и животного происхождения, в том числе метаболитов человека, для вовлечения элементов, содержащихся в данных отходах, в круговорот массообменных процессов БТСЖО. Данный комплекс основывается на минерализации отходов методом «мокрого» сжигания, суть которого заключается в окислении органических отходов в водном растворе перекиси водорода под действием переменного электрического тока [12; 15; 16]. В результате такой переработки образуется минерализованный раствор, который может быть использован для приготовления ирригационного раствора звена высших растений [15; 16]. Данный метод имеет большое преимущество в скорости утилизации и экологической безопасности получаемых продуктов (раствор и газ) [16].

Помимо опасности засоления, получаемая реакторная жидкость не может быть непосредственно внесена в ирригационный раствор для растений, так как метод «мокрого» сжигания практически не способен утилизировать мочевины, что повышает риск развития в системе условно патогенных уробактерий [16]. Поэтому комплекс физико-химической переработки органических отходов включает в себя несколько процессов [12]:

- 1) «мокрое» сжигание отходов;
- 2) разложение мочевины;
- 3) выделение NaCl.

Для налаживания надежного массообменного цикла БТСЖО необходимо, чтобы все процессы комплекса переработки отходов протекали в течение технологически приемлемого времени (не более 1–2 суток). Предпочтительнее всего было бы иметь возможность переработать суточную норму жидких выделений человека в течение суток.

Данная работа посвящена разработке принципов управления технологическими процессами разложения мочевины и выделения NaCl из раствора минерализованных метаболитов человека, полученных методом «мокрого» сжигания. В разрабатываемом блоке выделения NaCl осуществляется несколько физико-химических последовательных и параллельных процессов. Несмотря на различия в химии процессов, их динамика схожа, а условия протекания обеспечиваются аналогичными физико-химическими методами. Это позволяет выстроить аппаратную и программную часть элементов блока таким образом, чтобы имелась возможность взаимной замены комплектующих. Благодаря этому будет повышена живучесть и надежность БТСЖО, снижены риски успешного выполнения миссии.

Технологические процессы блока обессоливания

Общая схема экспериментального комплекса физико-химической переработки органических отходов представлена на рис. 1. Согласно этой схеме, после переработки в реакторе «мокрого» сжигания, минерализованные экзометаболиты поступают в реактор ферментативного разложения мочевины с помощью уреазы [16; 17]. Также в этот реактор происходит периодическое поступление HCl, синтезируемого в реакторе синтеза HCl [18], для коррекции уровня pH раствора. Процесс гидролиза мочевины в растворе завершается при снижении уровня ее концентрации до определенного значения.

Далее раствор поступает в выделитель Cl₂, где вследствие электролиза происходит образование газообразного Cl₂, который поступает в реактор синтеза HCl [18], необходимой для получения NaCl на последнем этапе технологического процесса. Выделение Cl₂ происходит за счет электролиза раствора и завершается при снижении уровня концентрации Cl⁻ в растворе до определенного значения.

Синтез HCl [12] протекает до тех пор, пока весь газообразный хлор, образованный на предыдущем этапе, не будет конвертирован в кислоту и зафиксирован в воде, то есть процесс останавливается при достижении определенного значения концентрации HCl в водном растворе.

После разложения мочевины и выделения хлора раствор поступает в электролизер, в котором осуществляется выделение щелочной части из минерализованных метаболитов, содержа-

щей в себе основную долю металлов. Кислая и нейтральные части возвращаются в ирригационный раствор. Процесс выделения щелочной части направлен на понижение концентрации Na^+ в растворе, поэтому сигналом к его окончанию служит снижение уровня этой концентрации до определенного значения, определяемого оператором.

Далее в реакторе синтеза карбоната натрия происходит выделение Na_2CO_3 из щелочного раствора, а остальные компоненты щелочного раствора в виде раствора карбонатов возвращаются в ирригационный раствор. Синтез Na_2CO_3 многоступенчатый:

- 1) барботаж воздухом и нагрев до определенной температуры щелочного раствора, пока он не будет сконцентрирован до определенного объема (уровня);
- 2) барботаж CO_2 раствора NaHCO_3 и KHCO_3 , до достижения определенного давления газа над раствором;
- 3) охлаждение до определенной температуры и раствора Na_2CO_3 и K_2CO_3 и поддержание пониженного давления над раствором определенное время.

На последнем физико-химическом этапе в реакторе синтеза NaCl происходит смешивание Na_2CO_3 и HCl с образованием раствора NaCl . Процесс протекает в жидкой фазе и завершается при достижении требуемого уровня pH. Далее полученный раствор с высоким содержанием NaCl может быть доочищен для непосредственного получения пищевой соли либо использован для культивирования галофитов в фототрофном звене, обеспечивающих человека NaCl .

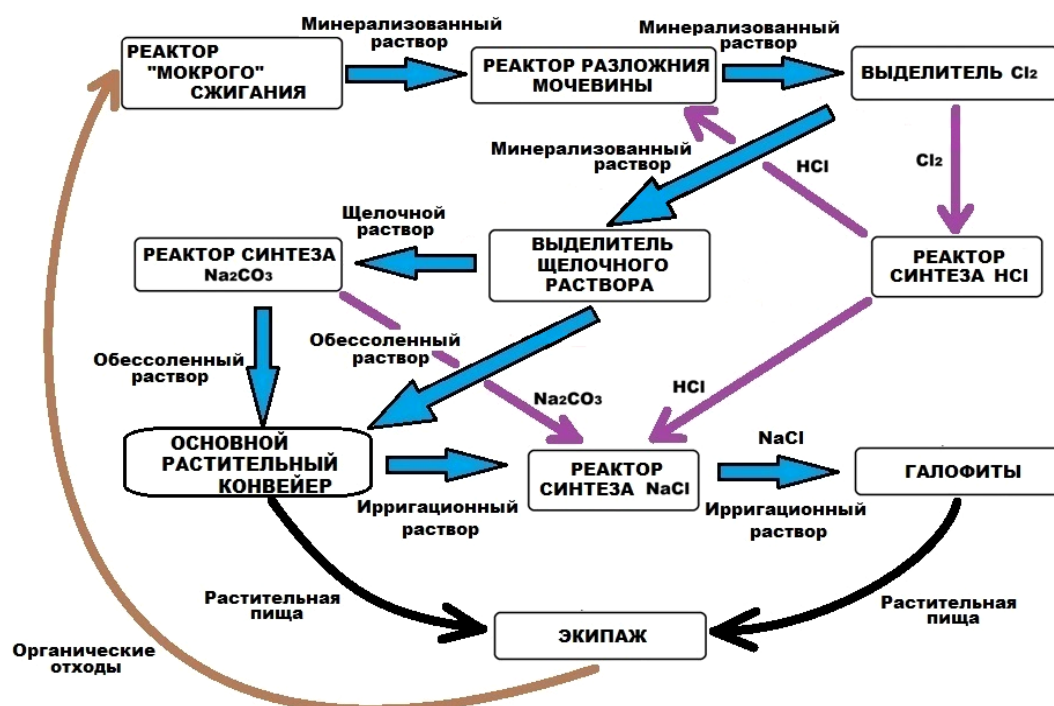


Рис. 1. Цикл NaCl в массообмене БТСЖО

Fig. 1. Cycle of NaCl in the mass transfer of BTLSS

Экспериментально показано, что разрабатываемая физико-химическая технология обессоливания минерализованных метаболитов человека в перспективе позволит менее чем за сутки удалять из раствора до 80 % NaCl , который в дальнейшем может быть использован для получения пищевой соли экипажа [19]. Выявление аналогичных моментов в технологических процессах блока обессоливания позволит применить универсальные, взаимозаменяемые элементы аппаратного обеспечения и логического управления процессами, что поможет значительно сократить массу блока, повысить его надежность, а оператору проще сохранять контроль, переходя от одного технологического этапа к другому.

Принципы управления блока обессоливания

Каждый из технологических процессов блока обессоливания можно охарактеризовать монотонным достижением целевым параметром определенного значения, интересующего оператора. На этапе разложения мочевины о завершении процесса можно ориентироваться по изменению концентрации мочевины, или продукта ее гидролиза – NH_4^+ , что технологически проще реализуется измерительными электродами [19]. Окончание процессов выделения Cl_2 и синтеза HCl определяется по показаниям концентрации Cl^- в растворе, процесса выделения щелочной части – по показаниям концентрации Na^+ в растворе. Выделение карбоната натрия и синтез NaCl завершаются при достижении определенного времени или значения pH, или уровня раствора. Во всех случаях оператор должен получать данные, в том числе графические, по динамике и текущему значению, только одного целевого параметра процесса, чтобы снизить вероятность ошибки и риски успешного завершения работы блока.

Соответствующие условия для технологических процессов блока обессоливания должны обеспечиваться поддержанием в оптимальном диапазоне ряда параметров среды: температуры и давления газа над раствором, температуры, pH и уровня раствора. Эти параметры могут корректироваться методом релейной автоматики путем включения/отключения исполнительного устройства (нагревателя, насоса кислоты или воздушного насоса) в зависимости от показаний датчиков. Также необходимо отслеживать критические отклонения от оптимальных параметров, способные привести к разрушению технологической линии.

Исходя из изложенных характеристик процессов, управление блоком обессоливания можно разделить на две автоматизированные подсистемы, контролирующие достижение целевого параметра и параметры условий соответственно (см. таблицу). Первая подсистема отслеживает факт достижения целевым параметром определенного значения (сигнал о завершении технологического этапа), а также динамику этого процесса для контроля скорости его течения. Динамику может контролировать оператор, ориентируясь по характеру тренда значений целевого параметра, или автоматика, удерживая значения производных целевого параметра в заданных диапазонах. Вторая подсистема поддерживает параметры среды в требуемом диапазоне либо экстренно останавливает процесс при их выходе за критическое значение.

Контролируемые параметры этапов обессоливания

Этап	Контролируемые параметры	
	Целевой параметр	Параметры условий
Разложение мочевины	Концентрация NH_4^+	t° раствора, pH
Выделение Cl_2	Концентрация Cl^-	t° раствора, V раствора
Синтез HCl	Концентрация Cl^-	t° раствора, V раствора
Выделение щелочного раствора	Концентрация Na^+	t° раствора, V раствора
Синтез Na_2CO_3	V раствора/ P газа/ Время	t° раствора
Синтез NaCl	pH	t° раствора

Примечание. t° – температура; V – объем; P – давление.

Подобие задач управления технологическими процессами позволяет использовать одинаковую логику работы алгоритма управления (рис. 2) на всех этапах обессоливания. Работа алгоритма должна начинаться с блока предопределенного процесса: проверки подключения датчиков и исполнительных устройств для оценки технического состояния агрегатов. Далее необходим блок данных: ввод оператором значений целевых параметров и параметров условий процесса – для возможности использования одного устройства управления на всех этапах обессоливания. Также это позволит применять систему управления для проведения опытов с физико-химическими процессами в настраиваемых экспериментальных условиях.

После ввода значений параметров работу начинает подсистема, контролирующая текущие параметры условий технологического процесса. Блок процессов считывает и записывает данные о параметрах условий. Далее блок принятия решений сравнивает значения этих параметров с требуемыми диапазонами значений. Если значение параметра находится внутри диапазона,

включая его граничные значения, то процесс протекает нормально и контроль переходит подсистеме, отслеживающей достижение целевым параметром заданного значения. Если значение параметра условий находится вне требуемого диапазона, то следующий блок принятия решений сравнивает текущее значение параметра условий с критическим диапазоном значений. Если значение параметра находится внутри критического диапазона, включая его граничные значения, то блок процессов выполняет акт корректировки условий исполнительными устройствами, после чего цикл алгоритма возвращается на этап работы блока процессов, который считывает и записывает данные об обновленных параметрах условий. Если значение параметра условий находится вне критического диапазона, то блок предопределенного процесса проводит подготовку реактора к экстренному отключению и алгоритм завершает работу, отключая реактор.

Подсистема контроля целевого параметра начинает работу, если значения параметров условий находятся в заданном диапазоне. Блок процессов считывает и записывает данные о текущем значении целевого параметра. Далее блок принятия решений сравнивает текущее значение с требуемым. Если значение параметра меньше требуемого, то процесс продолжается, и цикл возвращается к блоку процессов, который считывает и записывает данные об обновленных параметрах условий. Если значение целевого параметра больше либо равно заданному, то блок предопределенного процесса проводит подготовку реактора к планомерному отключению и алгоритм завершает работу, отключая реактор.

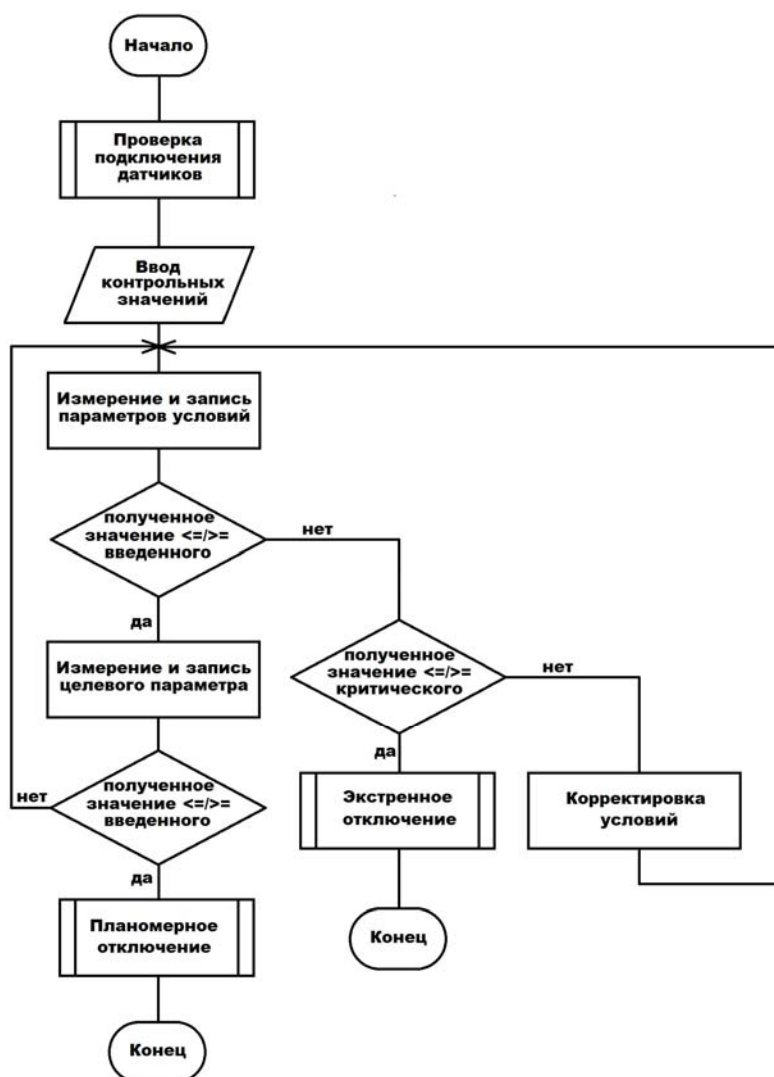


Рис. 2. Алгоритм работы программы автоматизации

Fig. 2. Algorithm of the automation program

Функциональная схема автоматики представлена на рис. 3. Элементы схемы являются универсальными и могут принимать участие в нескольких этапах работы блока выделения NaCl.

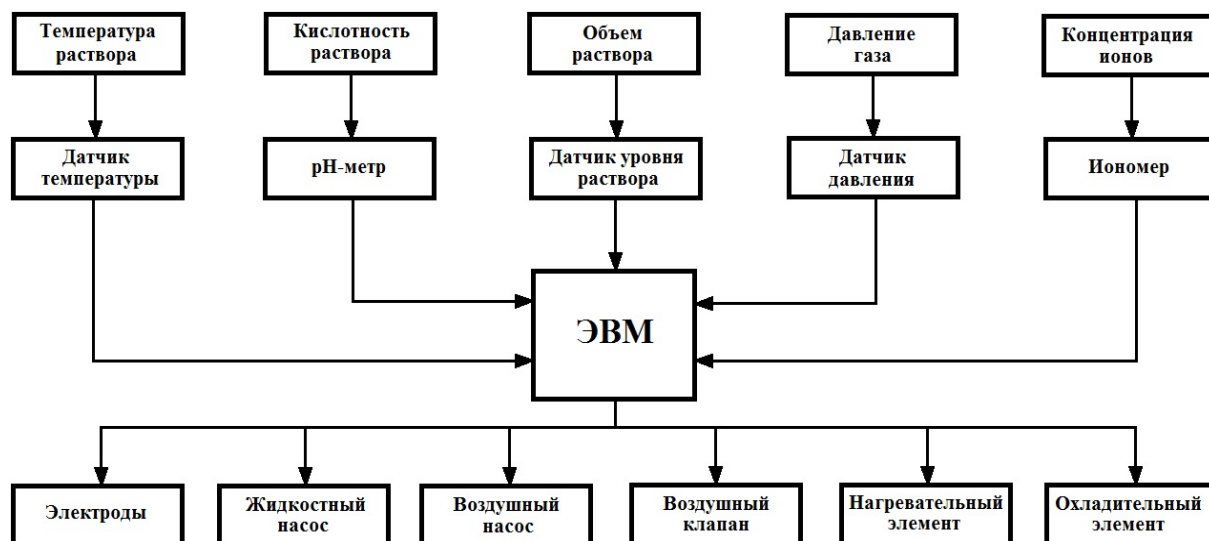


Рис. 3. Функциональная схема автоматики блока выделения NaCl

Fig. 3. Functional scheme of the NaCl extraction block automation

Заключение

Разрабатываемый блок обессоливания растворов является частью подсистемы физико-химической утилизации органических отходов БТСЖО. В эту подсистему также входит реактор «мокрого» сжигания, процесс минерализации в котором многостадийен и имеет цепной характер. Принципы его автоматизации, изложенные в [12; 19; 20], базируются на многократном изменении целевого параметра и требуют введения дополнительного параметра – температуры – при масштабировании процесса. Вследствие этого применение подхода, изложенного в данной статье, невозможно при разработке алгоритма управления реактором «мокрого» сжигания. Тем не менее он имеет ряд преимуществ.

Представленный алгоритм может обслуживать 6 из 7 технологических этапов подсистемы физико-химической утилизации органических отходов. Использование только одного целевого параметра в качестве индикатора завершения процесса поможет оператору в сохранении контроля при переходе от одного технологического этапа к другому. Возможность внесения контрольных значений параметров условий и целевого параметра позволяет применить автоматическое управление в научно-образовательном приложении. Например, при создании опытных или образовательных стендов для изучения процессов ферментации, электродиализа и кристаллизации.

В целом можно заключить, что описанные принципы управления блоком обессоливания повысят надежность БТСЖО. Во-первых, за счет снижения нагрузки на оператора благодаря автоматизации. Во-вторых, за счет дублирования аппаратной части. Ряд параметров, контролируемых алгоритмом на разных технологических этапах, измеряют принципиально одинаково: измерительными электродами, датчиками уровня, давления и температуры. Это означает, что от одного технологического этапа к другому могут быть использованы одни и те же вычислительные устройства. Отмеченные преимущества повышают перспективность применения БТСЖО в будущих планетарных базах, что благоприятно отразится на освоении человеком Солнечной системы.

Библиографические ссылки

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. D. *Manmade Closed Ecological Systems*. Taylor and Francis, New York, 2003. 402 p.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Dynamic Aspects and Controllability of the MELiSSA Project: A Bioregenerative System to Provide Life Support in Space / B. Farges, L. Poughon, C. Creuly et al. // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2008, Vol. 151, P. 686–699.
6. 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.
7. Walker J., Granjou C. MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space // *Futures*. 2017. Vol. 92. P. 59–69.
8. Escobar C., Nabity J. Past, present, and future of closed human life support ecosystems – a review // *47th International Conference on Environmental Systems*. 2017. P. 18.
9. Putnam D. F. *Composition and Concentrative Properties of Human Urine*. NASA contract report, Washington, 1971. 107 p.
10. 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.
11. 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.
12. Подсистема физико-химических реакторов минерализации отходов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения / Е. А. Морозов, С. В. Трифонов, М. Ю. Салтыков и др. // *Сибирский журнал науки и технологии*. 2017. Т. 18, № 3. С. 585–591.
13. Cherif M., Mkacher I., Dammak L. Water desalination by neutralization dialysis with ion-exchange membranes: Flow rate and acid/alkali concentration effects // *Desalination*. 2015. Vol. 361. P. 13–24.
14. 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.
15. 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. P. 932–940.
16. Tikhomirov A., Kudenko Yu., Trifonov S., Ushakova S. 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.
17. Физико-химическая переработка экзометаболитов человека для замкнутых систем жизнеобеспечения / Е. Ф. Сутормина, С. В. Трифонов, Ю. А. Куденко и др. // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2011. Т. 19. С. 413–420.
18. Пат. 157597 Российская Федерация, МПК С 01 В 7/01. Устройство каталитического синтеза HCl из газообразного H₂ и Cl₂ / Тихомиров А. А., Куденко Ю. А., Трифонов С. В. № 2015132417/05 ; заявл. 03.08.2015 ; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
19. Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. Physical-chemical method for desalting organic waste for agricultural cycles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 839, No. 4. P. 042062.

20. Компьютерная автоматизация установки «мокрого сжигания» органических отходов для замкнутых экосистем / М. Ю. Салтыков, Е. А. Морозов, С. В. Трифонов и др. // Вестник СибГАУ. 2016. № 2 (17). С. 438–443.

References

1. Gitelson J. I., Lisovsky G. M., MacElroy R. D. *Manmade Closed Ecological Systems*. Taylor and Francis, New York, 2003, 402 p.
2. 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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.02.075>.
3. Bamsey M., Graham T., Stasiak M., Berinstain A., Scott A., Rondeau Vuk T., Dixon M. Canadian advanced life support capacities and future directions. *Advances in Space Research*. 2009, Vol. 44. P. 151–161. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.03.024>.
4. 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. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00658-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00658-0).
5. 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. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8292-2>.
6. Guo S. S., Mao R. X., Zhang L. L., Tang Y. K., Li Y. H. Progress and prospect of research on controlled ecological life support technique. *Reach*. 2017, Vol. 6, P. 1–10. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.002>.
7. Walker J., Granjou C. MELiSSA the minimal biosphere: Human life, waste and refuge in deep space. *Futures*. 2017, Vol. 92, P. 59–69. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2016.12.001>.
8. Escobar C., Nabity J. Past, present, and future of closed human life support ecosystems – a review. *47th International Conference on Environmental Systems*. 2017, P. 18. Doi: <http://hdl.handle.net/2346/73083>.
9. Putnam D. F. *Composition and Concentrative Properties of Human Urine*. NASA contract report, Washington, 1971, 107 p.
10. 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. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(00\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(00)00007-2).
11. 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. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(97\)00215-4](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(97)00215-4).
12. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Saltykov M. Yu, Murygin A. V., Tikhomirov A. A. [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.).
13. Cherif M., Mkacher I., Dammak L. Water desalination by neutralization dialysis with ion-exchange membranes: Flow rate and acid/alkali concentration effects. *Desalination*. 2015, Vol. 361, P. 13–24. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.024>.
14. 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. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.09.017>.
15. Ushakova S. A., Tikhomirov A. A., Tikhomirova N. A. Kudenko Yu. A., Litovka Yu. A., Anishchenko O. V. 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, P. 932–940. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.05.023>.

16. Tikhomirov A., Kudenko Yu., Trifonov S., Ushakova S. 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: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.003>.
17. Sutormina E. F., Trifonov S. V., Kudenko Yu. A., Ivanova Yu. A., Pinaeva L. G., Tikhomirov A. A., Isupova L. A. Physicochemical processing of human exometabolites for closed life support systems. *Chemistry for Sustainable Development*. 2011, Vol. 19, P. 375–382.
18. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Trifonov S. V. *Ustrojstvo kataliticheskogo sinteza HCl iz gazoobraznogo H₂ i Cl₂* [Apparatus of HCl catalytic synthesis from gaseous Cl₂ and H₂]. Patent RF, no. 157597, 2015.
19. Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. Physical-chemical method for desalting organic waste for agricultural cycles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, Vol. 839, No. 4, P. 042062. Doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042062>.
20. 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*. 2016, Vol. 17, No. 2, P. 438–443 (In Russ.).

© Тихомиров А. А., Трифонов С. В., Морозов Е. А., Мuryгин А. В., 2022

Тихомиров Александр Аполлинариевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией управления биосинтезом фототрофов, Институт биофизики СО РАН; 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, старший научный сотрудник лаборатории управления биосинтезом фототрофов, Институт биофизики СО РАН; доцент кафедры замкнутых экосистем, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Морозов Егор Андреевич – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник; Институт биофизики СО РАН. E-mail: transserfer89@gmail.com.

Мuryгин 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 Apollinariyevich – D. Sc., professor; Head of laboratory of Phototrophic Biosynthesis Control, Institute of Biophysics SB RAS; 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 in Artificial Ecosystems, Institute of Biophysics SB RAS; Associate Professor, Department of Closed Ecosystems, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru.

Morozov Yegor Andreevich – Ph. D., Junior researcher, Institute of Biophysics SB RAS. E-mail: transserfer89@gmail.com.

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