

УДК 544.623.032.52

Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-691-697

**Для цитирования:** Морозов Е. А., Трифонов С. В., Мурыгин А. В., Тихомиров А. А. Автоматическая система контроля концентраций  $O_2$  и  $H_2$  в технологических газовых контурах биотехнических систем жизнеобеспечения космического назначения // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19, № 4. С. 691–697. Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-691-697

**For citation:** Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. [Automatic control system of  $O_2$  and  $H_2$  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.). Doi: 10.31772/2587-6066-2018-19-4-691-697

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ $O_2$ И $H_2$ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ КОНТУРАХ БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Е. А. Морозов<sup>1,2\*</sup>, С. В. Трифонов<sup>1,2</sup>, А. В. Мурыгин<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: yegormorozov@ibp.ru

*В Институте биофизики СО РАН разрабатывается физическая экспериментальная модель замкнутой экосистемы (ЭМЗЭ), моделирующей массообменные потоки в присутствии расчетной доли метаболизма человека. Модель создана с целью проверки совместимости звена высших растений с разрабатываемыми биологическим и физико-химическим звеньями переработки органических отходов. В этой связи ЭМЗЭ не содержит в себе ряд вспомогательных реакторов (разложения мочевины, нитрификации аммиака и синтеза перекиси водорода), непосредственное взаимодействие которых с растительным звеном либо исключено, либо не несет негативного воздействия на культивируемые растения. Отсутствие перечисленных реакторов ведет к дисбалансу потоков веществ в системе, в частности, образуется избыточный кислород в результате процесса «мокрого» сжигания органических отходов в перекиси водорода. Для компенсации модельного газового баланса разрабатывается специальный газовый контур, в котором кислород удаляется путем связывания с водородом, получаемым электролизом внесистемной воды. Для управления данным процессом разработана система автоматического контроля концентрации газов, позволяющая без присутствия оператора поддерживать концентрацию водорода в безопасном диапазоне, останавливать процесс при достижении заданной концентрации кислорода, а также записывать показания датчиков в базу данных для дальнейшей обработки. Помимо предложенного методологического подхода в работе с ЭМЗЭ разработанная система управления может быть использована в полномасштабных биотехнических системах жизнеобеспечения для контроля состава кислород/водородсодержащей газовой среды в газовых контурах других физико-химических технологических процессах, например, при синтезе перекиси водорода и нитрификации аммиака.*

*Ключевые слова:* замкнутые системы жизнеобеспечения, круговорот, «мокрое» сжигание, автоматизация, переработка отходов, анализ газа, контроль состава атмосферы.

## AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF $O_2$ AND $H_2$ CONCENTRATIONS IN TECHNOLOGICAL GAS CIRCUITS OF BTLSS SPACE APPLICATION

Ye. A. Morozov<sup>1,2\*</sup>, S. V. Trifonov<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: yegormorozov@ibp.ru

*The Institute of Biophysics SB RAS is developing a physical experimental model of a closed ecosystem (EMCS) simulating mass-exchange flows in the presence of a calculated proportion of human metabolism. The model is designed to check the compatibility of the higher plant link with the biological and physicochemical links in the processing of organic wastes that are being developed. In this connection, the EMCS does not contain a number of auxiliary reactors (decomposition of urea, nitrification of ammonia and synthesis of hydrogen peroxide), the direct interaction of*

*which with the plant link is either excluded, or do not have a negative impact on cultivated plants. The absence of these reactors leads to an imbalance in the flow of substances in the system; in particular, excess oxygen is formed as a result of the process of "wet combustion" of organic wastes in hydrogen peroxide. To compensate for the model gas balance, a special gas circuit is developed in which oxygen is removed by binding to hydrogen obtained by electrolysis of off-system water. To control this process, an automatic gas concentration monitoring system has been developed that allows maintaining the concentration of hydrogen in a safe range without an operator's presence, stopping the process by achieving the required oxygen concentration, and also recording the sensor readings into the database for further processing. In addition to the proposed methodological approach, the developed control system can be used in full-scale biotechnical life-support systems to monitor the oxygen / hydrogen composition of a gas medium in a gas circuit of other physicochemical processes, for example, in the synthesis of hydrogen peroxide and ammonia nitrification.*

*Keywords: closed life support systems, turnover, wet combustion automation, waste treatment, gas analyses, atmosphere composition control.*

**Введение.** В Институте биофизики СО РАН, где находится базовая кафедра ЗЭС СибГУ им. М. Ф. Решетнева, ведутся эксперименты по гранту РНФ 14-14-00599(П) с экспериментальной моделью замкнутой экосистемы (ЭМЗЭ) [1–9]. Целью экспериментов является тестирование совокупности технологий нового поколения [10] для вовлечения отходов жизнедеятельности человека в круговорот биотехнической системы жизнеобеспечения (БТСЖО) [2; 3] в течение нескольких месяцев. ЭМЗЭ включает звено высших растений и имитирует 6 % газообмена человека и 8 % массообмена с вовлечением в него органических отходов. Одной из задач данного эксперимента является проверка динамики состава атмосферы замкнутой камеры с конвейером культурных растений с целью определения возможных потенциально опасных газовых микропримесей [7] в накопительном режиме [2; 3] для планируемого полномасштабного эксперимента БИОС-4, включающего человека, а также исследования возможных дисбалансов газового состава. В случае обнаружения таковых необходимо будет предложить пути их устранения.

Для утилизации плотных и жидких выделений человека в ЭМЗЭ используется метод «мокрого» сжигания в водном растворе  $H_2O_2$  под действием переменного тока [4; 5]. До сих пор открытым является вопрос методов синтеза перекиси водорода для работы реактора [10]. В данной экспериментальной модели ЗЭС, рассчитанной на включение доли метаболизма человека, перекись водорода вносилась извне, что приводило к выделению избыточного количества  $O_2$  в атмосферу камеры при утилизации отходов человека. Это связано с тем, что при окислении отходов порядка 20–40 %  $H_2O_2$  распадается до воды и кислорода, не вступая в реакцию с органическим веществом. В полномасштабной системе этот избыточный кислород будет вновь использован для синтеза перекиси водорода.

Для регуляции газообмена по кислороду в ЭМЗЭ необходимо разработать физико-химический метод фиксации кислорода из газовой среды. В качестве такого способа предложен контур переработки газов, в котором избыточный кислород каталитически связывается с водородом, получаемым электролизом внесистемной воды. Далее синтезируемая вода может мерно изыматься из системы, и таким образом избыточный кислород в составе воды выводится из массообмена. Для регуляции концентраций газов в таком

газовом контуре и предотвращения детонации взрывоопасной в широком диапазоне концентраций смеси  $O_2$  и  $H_2$  должна быть разработана система автоматического управления работой контура переработки газов, способная снижать концентрацию кислорода до заданных значений в безопасном режиме.

Целью данного исследования является определение кинетических характеристик каталитического процесса связывания кислорода с водородом в газовой среде и создание системы автоматического контроля работы контура переработки газов.

**Контур переработки газов.** Для определения кинетических характеристик каталитического процесса связывания кислорода с водородом был создан экспериментальный газовый контур, в котором газ из реактора «мокрого» сжигания рабочим объемом 0,25 л после фиксации аммиака в кислоте [7] поступает в газгольдер, подключенный к замкнутому контуру переработки газа (рис. 1). В контуре газ циркулирует с заданной скоростью (1 л/мин) при использовании насоса и ротаметра. Избыточный кислород реагирует с водородом в каталитической камере объемом 35 мл за счет контакта с платиновым катализатором площадью 80  $cm^2$ , нагретым до температуры 600–650 °С. На платиновом катализаторе также происходит окисление органических примесей за исключением метана, накопление которого в ЭМЗЭ в течение нескольких месяцев не приводит к негативному влиянию на растения, а его концентрация не превышает 0,1 об. % в ЭМЗЭ при ее функционировании в течение года. Параметры каталитической камеры обеспечивают время контакта с катализатором в течение 2 с при скорости протока газа 1 л/мин.

Водород поступает в контур из U-образного электролизера, объемом 350 мл, в котором содержится водный раствор КОН с концентрацией 355,8 г/л. Сила тока, проходящего через электролизер, в соответствии со вторым законом электрохимии [11] пропорциональна скорости поступления водорода в контур и в условиях стационарной концентрации водорода определяет скорость связывания кислорода.

Для определения зависимости скорости фиксации кислорода от силы тока в электролизере был проведен эксперимент по снижению концентрации кислорода в 5 л газа в режиме стационарной концентрации водорода – 1,45–1,50 об. %. Для обеспечения данной концентрации водорода через электролизер пропускали

ток 1,5 А. Чтобы избежать эффекта влияния изменения объема газа, концентрацию  $O_2$  снижали с 20 до 18 об. % (рис. 2). Результаты данного эксперимента показали, что зависимость скорости фиксации от тока составляет 0,09 л/(ч·А). Таким образом, можно рассчитать силу тока в электролизере, необходимую для снижения в течение суток концентрации кислорода в суточной норме газа из реактора «мокрого» сжигания, поступающего в ЭМЗЭ.

Для поддержания заданной расчетной доли метаболизма человека в массообменном цикле ЭМЗЭ тре-

буется ежесуточная переработка 250 мл раствора экзoметаболитов человека и перекиси водорода. Объем выделяющегося газа при минерализации 250 мл данной смеси составляет  $18 \pm 1$  л. В его состав входит в основном кислород (68 об. %), водород (28 об. %) и углекислый газ (4 об. %), а также примеси летучих органических соединений [7]. Для снижения концентрации кислорода с 68 до 10 об. % в данном объеме газа в течение суток, в условиях стационарной концентрации водорода необходим ток в электролизере, равный 6 А.

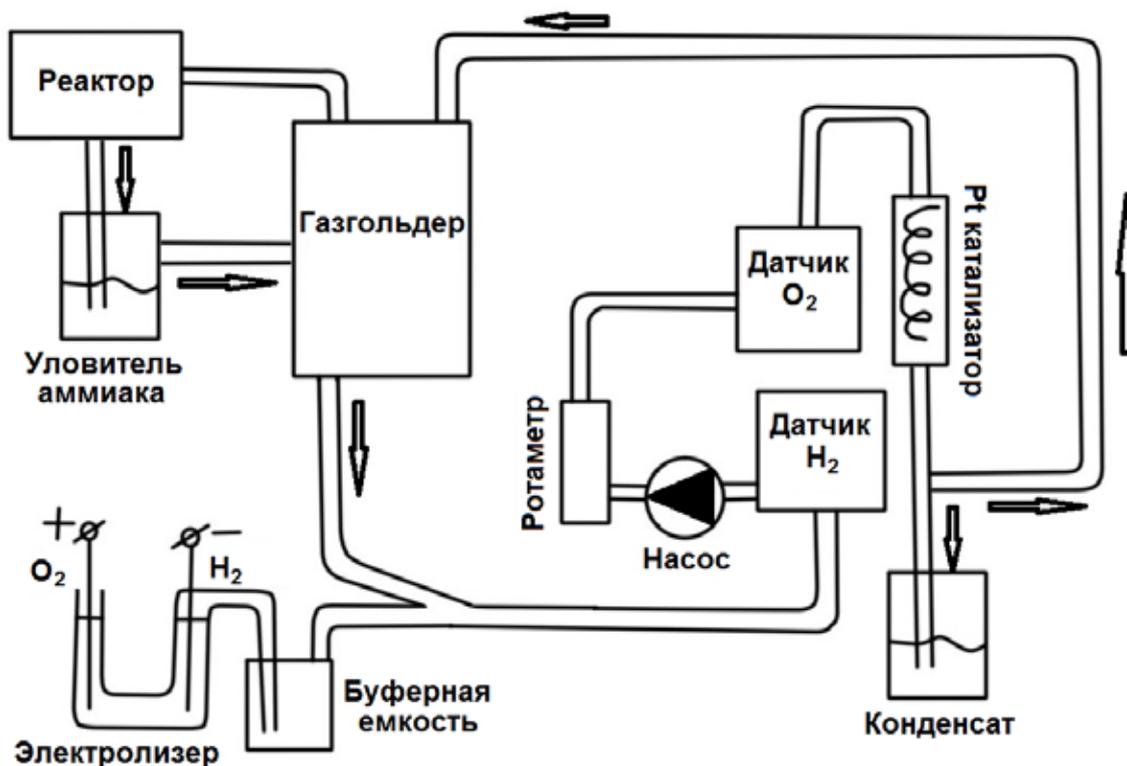


Рис. 1. Схема устройства контура переработки газа из реактора «мокрого» сжигания

Fig. 1. Scheme of the installation of the gas processing circuit from the “wet” combustion reactor

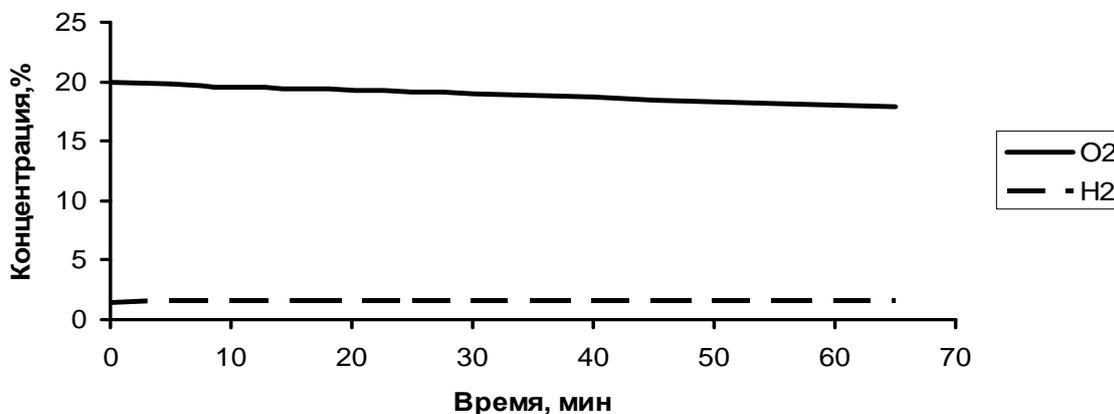


Рис. 2. Кинетические характеристики каталитического процесса связывания кислорода с водородом

Fig. 2. The kinetic characteristics of the catalytic process of oxygen binding to hydrogen

**Система автоматического контроля работы контура переработки газов.** Смесь  $O_2$  и  $H_2$  взрывоопасна в широком диапазоне концентраций – от 4 до 70 об. % водорода. Поэтому для предотвращения взрывов в процессе связывания кислорода была организована система контроля концентрации водорода в газовом контуре посредством включения и выключения электролизера в зависимости от показаний датчика водорода (см. рис. 1). Процесс переработки газа завершается при достижении заданного значения концентрации кислорода в соответствии с показаниями датчика кислорода (см. рис. 1): происходит отключение электролизера, каталитической камеры и насоса. Алгоритм работы автоматической системы представлен на рис. 3.

Аппаратно-программный комплекс выполнен с помощью датчика «Верба-Д» серии ИГС-98 исполнения 009, предназначенного для непрерывного автоматического измерения концентрации водорода, и датчика «Клевер-Д» серии ИГС-98 исполнения 021,

предназначенного для непрерывного автоматического измерения концентрации кислорода (рис. 4). Данные датчики подключены к системе контроля загазованности А-4М, предназначенной для непрерывного контроля и измерения численных значений концентраций газов в атмосфере рабочей зоны (рис. 4). Для отслеживания и фиксации в базу данных показаний с датчиков в реальном времени было осуществлено подключение к компьютеру через COM-порт с помощью конвертера сигнала RS232-RS485 [12]. Для дальнейшей обработки необходимые показания из базы данных можно вывести в файл Microsoft Excel [13].

Эксперименты, моделирующие пороговые условия, с электролизером и датчиками на водород и кислород показали, что система автоматического контроля способна успешно поддерживать концентрацию  $H_2$  в контуре в безопасном диапазоне 1,5–2,5 об. % (рис. 3) и завершать работу контура при достижении целевого значения концентрации кислорода.

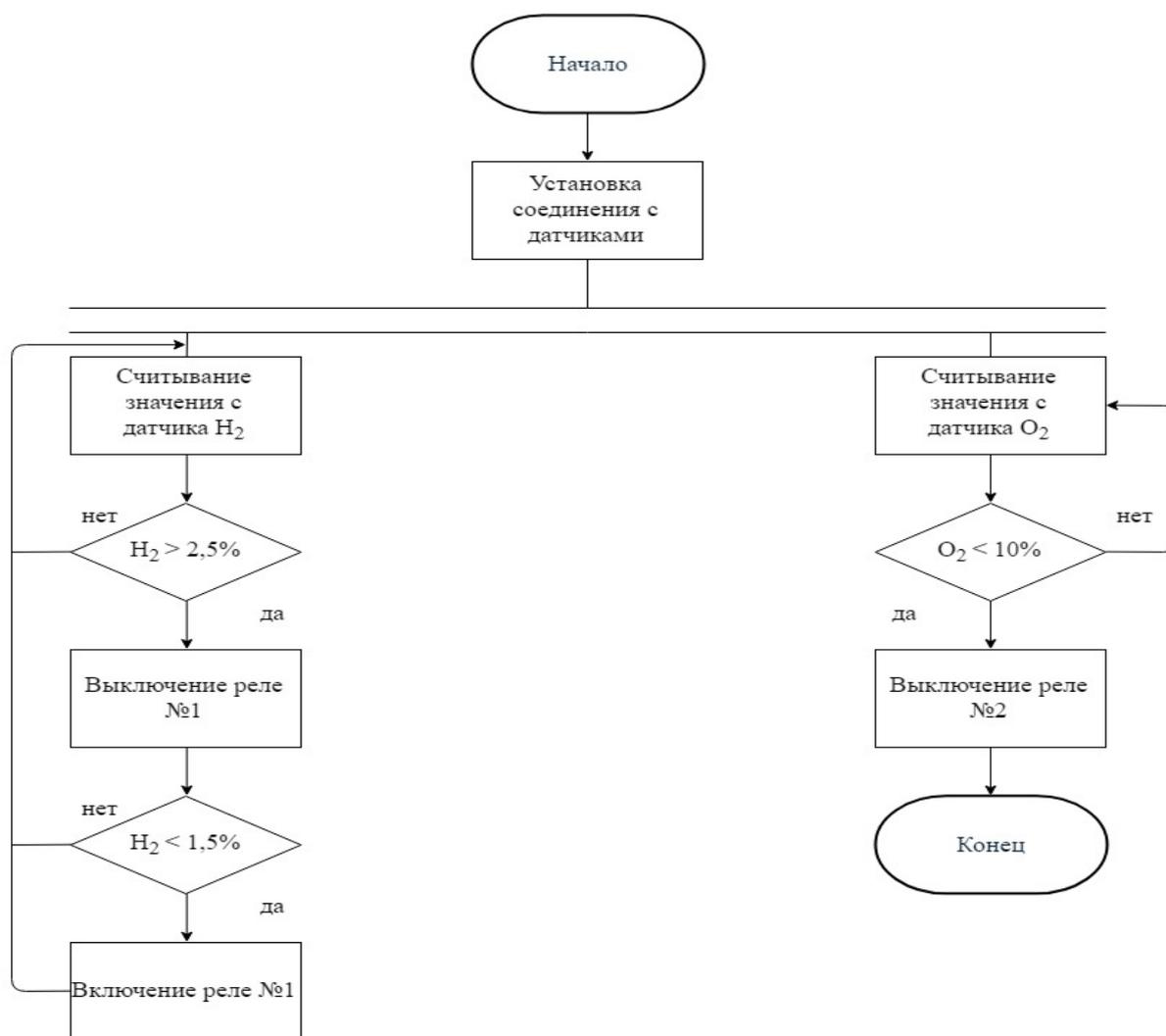


Рис. 3. Алгоритм работы автоматической системы управления контуром переработки газа

Fig. 3. The algorithm of the automatic control system of the gas processing circuit

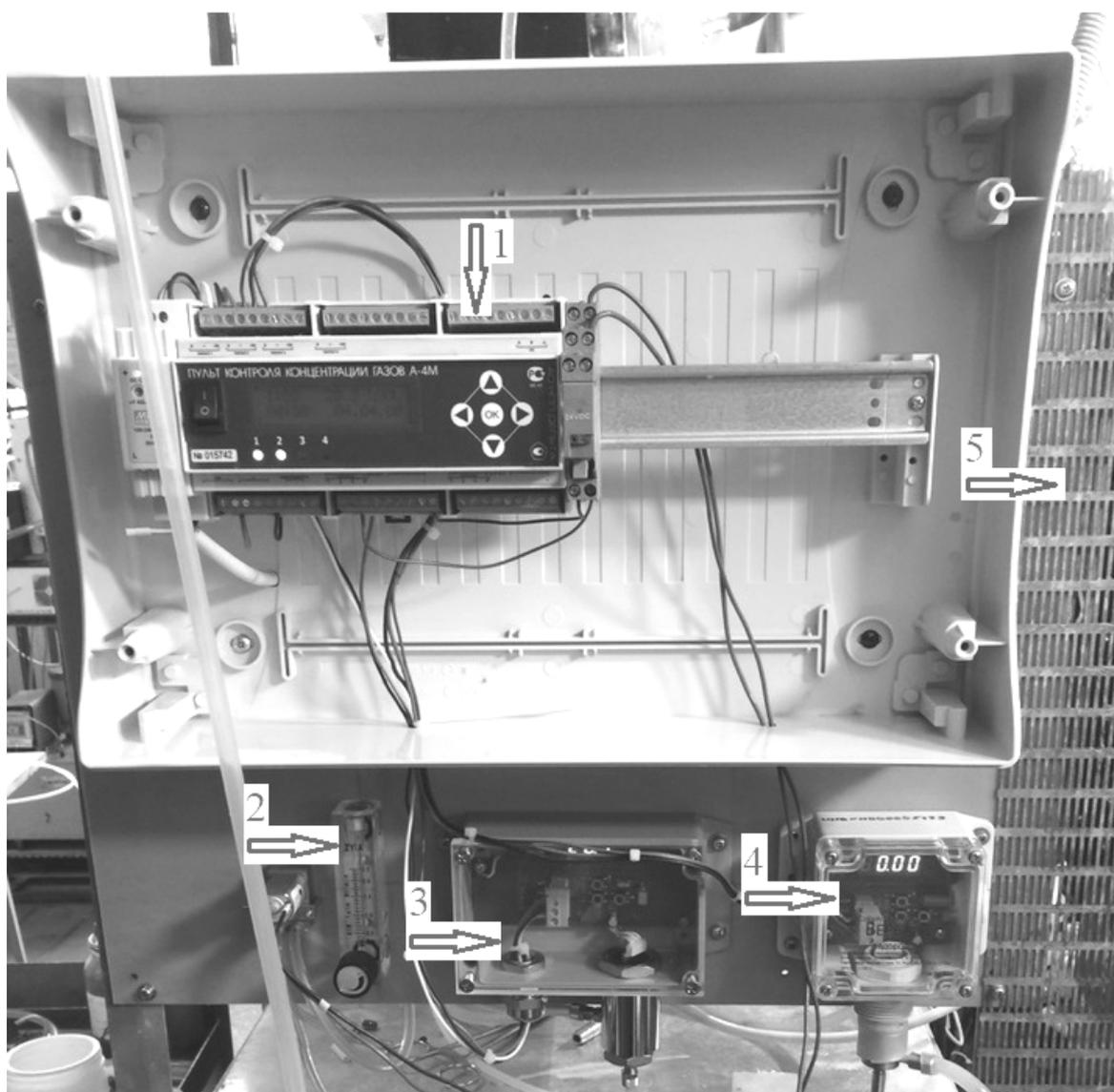


Рис. 4. Фрагмент системы автоматического контроля работы контура переработки газов:  
 1 – пульт контроля А-4М; 2 – ротаметр; 3 – датчик кислорода «Клевер-Д»;  
 4 – датчик водорода «Верба-Д»; 5 – каталитическая камера

Fig. 4. Fragment of the automatic control system of the gas processing circuit:  
 1 – control panel A-4M; 2 – a rotameter; 3 – oxygen sensor “Klever-D”;  
 4 – hydrogen sensor “Verba-D”; 5 – catalytic chamber

**Заключение.** Был сконструирован экспериментальный контур переработки газа из реактора «мокрого» сжигания и создана автоматизированная система контроля концентрации газов в данном контуре. Эксперименты по определению кинетических характеристик каталитического связывания кислорода с водородом показали, что для снижения концентрации кислорода в суточной норме газа из реактора «мокрого» сжигания, поступающего в ЭМЗЭ, требуется ток в электролизере, равный 6 А. Данное значение действительно для условий стационарной концентрации водорода, которая может быть установлена путем повышения скорости потока газа до 4 л/мин и достаточным временем контакта с катализатором. Поддержание концентрации водорода в безопасном диапазоне значений (в случае выхода контура переработки газа

из стационарного режима) завершение процесса и сохранение данных динамик концентраций газов может быть осуществлено разработанной автоматизированной системой контроля концентрации газов.

Созданная система контроля концентраций водорода и кислорода может быть также использована в замкнутых газовых контурах других физико-химических процессов полномасштабных БТСЖО, требующих определенных концентраций данных газов. Например, разрабатываемые процессы нитрификации аммиака [14] и синтеза перекиси водорода [15] могут требовать повышенных концентраций кислорода [16]. При соответствующем алгоритме работы система контроля способна поддерживать данные процессы, обеспечивая содержание кислорода в пределах требуемого диапазона.

**Благодарности.** Работы по созданию экспериментального контура переработки газов были выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14-14-00599П) в ИБФ СО РАН. Работы по созданию цифровой системы записи данных датчиков контура переработки газов 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.** The work on creation of the gas treatment circuit was conducted with the financial support of the Russian Scientific Foundation grant (project 14-14-00599П) at IBP SB RAS. The works on creating the digital data recording system of the gas treatment circuit sensors readings were conducted in the framework of the integration project number 5 (unit number 4) of SB RAS and the Institute of Biophysics SB RAS on State task theme № 56.1.4. for 2013–2020.

### Библиографические ссылки

1. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects [Электронный ресурс] / А. А. Тихомиров [et al.] // *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40, iss. 11. P. 1741–1745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.

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

3. Замкнутая система: человек – высшие растения / под ред. Г. М. Лисовского. Новосибирск : Наука, 1979. 160 с.

4. 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.

5. 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.

6. Разработка технологии минерализации рыбных отходов в реакторе «мокрого» сжигания для ЗЭС космического назначения / С. В. Трифонов [и др.] // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, № 4. С. 949–955.

7. 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 / А. Тихомиров [et al.] // *Adv. in Space Res.* 2012. Vol. 49. P. 249–253.

8. Feasibility of incorporating all products of human waste processing into material cycling in the BTLSS [Электронный ресурс] / Ye. A. Morozov [et al.] // *Life Sciences in Space Research*. 2018. Vol. 18. P. 29–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2018.05.002>.

9. Барцев С. И. Отношение подобия и редукция сложности моделей экосистем // *Математическое моделирование в экологии : материалы конференции (ЭкоМатМод-2009)*. Пушчино, 2009. С. 25–26.

10. Подсистема физико-химических реакторов минерализации отходов для биолого-технических систем жизнеобеспечения космического назначения / Е. А. Морозов [и др.] // *Сибирский журнал науки и технологий*. 2017. Т. 18, № 3. С. 585–591.

11. Скорчеллетти В. В. Теоретическая электрохимия. 4-е изд., испр. и доп. Л. : Химия, 1974. 568 с.

12. SN75185 Multiple RS-232 drivers and receivers. Texas Instruments SLLS181D [Электронный ресурс]. December 1994, revised January 2006. URL: [www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75185.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75185.pdf).

13. Кильдишов В. Д. Использование приложения MS Excel для моделирования различных задач : практ. пособие. М. : Солон-Пресс, 2015. 160 с.

14. Оценка состава и токсичности газов для растений при физико-химической переработке экзометаболитов человека применительно к биолого-техническим СЖО [Электронный ресурс] / А. А. Тихомиров [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 441, № 2. С. 266–268. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1607672911060032>.

15. Электросинтез перекиси водорода из кислорода в газодиффузионных электродах в растворах минерализованных экзометаболитов [Электронный ресурс] / Г. А. Колягин [и др.] // *Электрохимия*. 2013. Т. 49, № 10. С. 1120–1124. URL: <http://dx.doi.org/10.7868/S0424857013100095>.

16. 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. 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*, 2007, Vol. 40, Iss. 11, P. 1741–1745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.11.009>.

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

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

4. 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.).

5. 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 interesakh ustoichivogo razvitiya*. 2014, Vol. 22, No. 2, P. 203–208 (In Russ.).

6. Trifonov S. V., Morozov Ye. A., Murygin A. V., Tikhomirov A. A. Development of fish wastes mineralization technology in “wet combustion” reactor for space application CES. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2017, Vol. 18, No. 4, P. 949–955 (In Russ.).

7. Tikhomirov A., Kudenko Yu., Trifonov S. et al. Assessing the feasibility of involving gaseous products re-

sulting from physicochemical oxidation of human liquid and solid wastes in the cycling of a bio-technical life support system. *Adv. in Space Res.* 2012, Vol. 49, P. 249–253.

8. Morozov Ye. A., Trifonov S. V., Ushakova S. A., Anishchenko O. V., Tikhomirov A. A. Feasibility of incorporating all products of human waste processing into material cycling in the BTLSS. *Life Sciences in Space Research.* 2018, Vol. 18, P. 29–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2018.05.002>.

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

10. 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, Vol. 18, No. 3, P. 585–591.

11. Scorchelletti V. V. Theoretical Electrochemistry. Ed. 4th, cor. and add. Leningrad: Chemistry, 1974, 568 p.

12. SN75185 Multiple RS-232 drivers and receivers. Texas Instruments SLLS181D. December 1994, revised January 2006. URL: [www.ti.com/lit/ds/sym-link/sn75185.pdf](http://www.ti.com/lit/ds/sym-link/sn75185.pdf).

13. Kildishov V. D. *Ispol'zovanie prilozheniya MS Excel dlya modelirovaniya razlichnykh zadach. Prakticheskoe posobie* [Use of MS Excel applications to simulate various tasks. Practical Manual]. Moscow, Solon-Press Publ., 2015, 160 p.

14. Tikhomirov A. A., Kudenko Yu. A., Degermendzhi A. G. et al. 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, No. 2, P. 266–268. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S1607672911060032>.

15. 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.). URL: <http://dx.doi.org/10.7868/S0424857013100095>.

16. Schumb W. C., Satterfield C. N., Wentworth R. L. Hydrogen peroxide. *A. C. S. Monograph.* 1955, No. 128, 759 p.

© Морозов Е. А., Трифонов С. В.,  
Мурыгин А. В., Тихомиров А. А., 2018