УДК 62-523.2

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ РЕАКТОРА «МОКРОГО» СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ^{*}

С. В. Трифонов^{1, 2}, Ю. А. Куденко², А. А. Тихомиров^{1, 2}, А. В. Мурыгин¹

¹Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31 ²Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/50 E-mail: trifonov_sergei@inbox.ru

Описан принцип и методика работы реактора «мокрого» сжигания отходов человека как предполагаемого звена физико-химической переработки органических отходов замкнутой системы жизнеобеспечения. Изучена динамика и выполнен анализ параметров процесса минерализации отходов человека. В качестве показателя, характеризующего динамику реакции и позволяющего на его основе осуществить автоматический контроль процесса, было выбрано давление газа в реакторе. Описана сконструированная система автоматического управления процессом минерализации на основе показаний давления. Проведены опыты, доказывающие, что данная система может самостоятельно осуществить минерализацию отходов по заданному режиму вплоть до окончания реакции и завершить работу реактора.

Ключевые слова: системы жизнеобеспечения, автоматизация, органические отходы, «мокрое» сжигание.

DUTY AUTOMATIZATION OF HUMAN VITAL ACTIVITY WASTE «WET» INCINERATION REACTOR FOR CLOSED LIFE SUPPORT SYSTEMS

S. V. Trifonov^{1, 2}, Yu. A. Kudenko², A. A. Tikhomirov^{1, 2}, A. V. Murygin¹

¹ Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation ²Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences 50/50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation E-mail: trifonov sergei@inbox.ru

The principle of operation and working procedure of the reactor for "wet" incineration of human wastes as a possible link of physicochemical processing in a closed life support system have been described. The dynamic has been investigated and the analysis of human waste mineralization process has been carried out. The gas pressure in the reactor has been chosen as an indicator characterizing the dynamic of the reaction and allowing on its basis to provide automatic control of the process that appear from the analysis. Mineralization process of automatic control system based on pressure registration has been presented. The experiments proving that this system can independently realize waste mineralization, allows conducting the reaction in predetermined regime till its end and able to complete work of reactor have been conducted. The experiments proving that this system can independently accomplish waste mineralization in predetermined regime till its end and able to complete work of reactor have been conducted.

Keywords: life support systems, automatization, organic wastes, "wet" incineration.

Для выполнения исследований дальнего космоса, включающих миссии с непосредственным участием человека, необходимо создание замкнутых систем жизнеобеспечения (СЖО). Пилотируемые полеты продолжительностью более года требуют высокой степени замыкания СЖО и установления в ней круговоротных массообменных процессов: все необходимые продукты для жизнедеятельности человека (вода, кислород, пища) должны быть восстановлены в конечном итоге из отходов жизнедеятельности человека. Наиболее перспективными представляются системы, сочетающие в себе как биологические, так и физико-химические методы регенерации среды. При этом роль регенерации кислорода, растительной пищи и воды ложится на растительное звено, а переработка отходов в минеральные удобрения для растений может быть выполнена как биологическими методами – переработка растительных отходов в почвоподобном субстрате [1–3], так и физико-химическими – переработка экзометаболитов человека [4; 5].

^{*} Работа выполнена в рамках Госзадания по теме № 56.1.4; раздел VI, подраздел 56 Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

В Институте биофизики СО РАН был разработан оригинальный метод физико-химической утилизации отходов человека в водном растворе перекиси водорода под действием переменного электрического тока в реакторе «мокрого» сжигания [4]. Образующиеся таким образом продукты – минерализованный раствор и газ - не оказывают токсичного воздействия на растительное звено [6]. Управление реактором требует участия оператора, что представляет собой проблему, так как отвлекает на себя часть рабочего времени экипажа, которое могло бы быть использовано для выполнения задач миссии. В связи с этим была поставлена цель и задачи настоящей работы - разработать принцип реализации автоматической системы управления и провести испытания созданной таким образом системы.

Устройство реактора «мокрого» сжигания. Принципиальная схема функционирования реактора подробно описана в [7]. Это корпус реактора, выполненный из керамики или стекла, в котором находится водный раствор H₂O₂ (33 %) В раствор помещаются измельченные отходы. Внутри реактора имеются угольные электроды, к которым подводится переменное напряжение, в верхней части сосуда помещен вертикальный обратный холодильник для возвращения в объем водного конденсата и пеногаситель для сбивания образующейся пены (рис. 1). Контроль параметров процесса минерализации обеспечивается с помощью датчиков давления газа в реакторе и температуры раствора, а также амперметра и вольтметра. Управление ходом процесса осуществляется с помощью изменения напряжения, подаваемого на электроды. Опытным путем было установлено, что для успешного протекания реакции необходимо изначально подавать напряжение 100 В, ускоряя процесс, а затем снижать его до 50 В, поддерживая нормальный ход реакции, и держать на данном уровне вплоть до окончания процесса. В качестве минерализуемых отходов использовали экзометаболиты человека, смешанные с H₂O₂ (33 %): 0,5 мл H₂O₂ (33 %) на 1 мл урины и 4 мл H₂O₂ (33 %) на 1 г плотных отходов; соотношение плотных и жидких отходов – 1 г:10 мл. Общий объем емкости реактора составляет 12 л, объем заливаемой смеси перекиси и отходов - 6 л.

Динамика параметров процесса и разработка принципов автоматизации. Динамика параметров процесса минерализации отображена на рис. 2 и 3. Как видно из рис. 2, температура раствора в процессе ускорения реакции плавно поднимается до 100 °С и держится на этом уровне до конца. Сила тока также увеличивается до некоторого значения при разгоне процесса, ступенчато падает при переключении напряжения до 50 В и далее практически не меняется с небольшим увеличением при полном выходе газа из раствора в конце реакции. Данные показатели не имеют каких-либо характерных признаков, опираясь на которые можно было бы отработать принципы автоматического управления.



Рис. 1. Принципиальная схема реактора «мокрого» сжигания: 1 – крышка для залива перекиси и отходов; 2 – сливной клапан; 3 – вентиль; 4 – обратный холодильник; 5 – электроды; 6 – мембрана сбивания пены; 7 – емкость для сброса излишков пены; а, б – сосуды, предохраняющие от смешивания раствор из реактора и кислоту из сосуда сбора аммиака; с – сосуд фиксации аммиака с 6%-ной азотной кислотой

Наиболее четко ход процесса отображает динамика величины давления газа (рис. 3), выделяющегося в ходе окисления органических отходов. Видно, что спустя некоторое время после начала процесса давление начинает лавинообразно расти и необходимо снижать напряжение, чтобы избежать прорыва пены из реактора. Далее давление вновь начинает лавинообразно расти, достигает некоторого максимума, а затем снижается до атмосферного или ниже при полном выходе газа (значение 0...-20 мм вод. ст. на графике) - это и есть момент окончания реакции. Такой вид динамики давления связан с тем, что окисление органических соединений в перекиси водорода протекает по радикально-цепному механизму. Таким образом, контролировать работу реактора было решено, ориентируясь на показания датчика давления. Давление в 200 мм водного столба является критичным для хода реакции, при данном значении необходимо понижать напряжение до 50 В и включать пеногаситель, что и делали при ручном управлении процессом. В случае переключения напряжения со 100 на 50 В при давлении выше 200 мм вод. ст., наблюдается бурный ход реакции с чрезмерным выбросом газа, при котором необходимо выключать напряжение и экстренно сливать раствор из реактора. Переключение со 100 на 50 В при давлении 80 мм вод. ст. давало устойчивый ход процесса, это значение и было выбрано как рабочее для автоматического переключения напряжения, а -20 мм вод. ст. - как сигнал завершения реакции и отключения реактора. Общее время процесса при устойчивом режиме составляло 1,5 ч, а при критичном давлении – 75 мин.



Рис. 2. Динамика температуры раствора, силы тока и напряжения



Рис. 3. Динамика давления газа в реакторе (превышение над атмосферным) и напряжения

Устройство системы автоматического управления и ее работа. Создание системы автоматики для управления процессом окисления в реакторе соответствует схеме по типу «одной кнопки». В основе схемы управления процессом по сигналу датчика давления лежит схема преобразователя сигнала от величины давления в сигналы включения соответствующих реле, предназначенных для ведения технологического процесса.

Система автоматики состоит из силового блока (трансформаторы № 1 и 2), блока управления и блока измерения давления.

Силовой блок состоит из трансформаторов ТПП-245, установленных на заранее заданное напряжение. В случае работы установки в режиме окисления экзометаболитов человека трансформатор № 1 установлен на 100 В, трансформатор № 2 – на 50 В. Плата питания преобразователя сигнала выдает напряжение для питания реле преобразователя, схемы управления и датчика давления ИКЗ6ТДф. Измерение температуры в реакторе осуществляется датчиком температуры ИС 567 (с характеристикой 100 Ω при 20 °C), помещенным в кварцевый корпус и находящимся в реакторе, и преобразователем сигнала ТРМ 210, выводящим данные о температуре оператору.

Трансформаторы включают коммутирующие пускатели на 40 А. Электрические элементы помещены в экранирующий кожух, заземлены и отвечают всем требованиям электробезопасности.

Работа системы автоматики:

1. При нажатии кнопки инициации процесса происходит общее включение питания системы: трансформатора № 1, преобразователя сигнала, блока измерения давления, пускателя пеногасителя.

2. По сигналу датчика давления, соответствующего величине 80 мм вод. ст., реле выключает трансформатор № 1 и включает трансформатор № 2 и пеногаситель. Это основная часть процесса.

3. По сигналу датчика давления (-20 мм вод. ст.) происходит общее отключение питания системы. Процесс автоматически завершается.

4. Слив продуктов реакции может быть произведен спустя любое время после окончания процесса.

Важно, что время не является параметром процесса, и присутствие оператора не нужно для завершения процесса. Динамика хода реакции при автоматическом управлении представлена на рис. 4. Видно ступенчатое изменение давления: первая ступень соответствует переключению напряжения со 100 до 50 В, а вторая – уменьшению скорости роста давления из-за открывшегося водного замка и последующего стравливания давления. Газовый путь реактора выходит в раствор HNO₃ (6 %) для фиксации аммиака, выделяющегося с газом из минерализуемого раствора, и опущен на некоторую глубину в кислотный раствор, создавая таким образом водный замок. Далее происходит лавинообразное нарастание давления с достижением некоторого максимума и резкое снижение до отрицательной величины. Достижение отрицательного давления связано с окончанием выхода газа из раствора и охлаждением газовой среды реактора обратным холодильником.

Минерализованный раствор, получаемый при автоматическом ходе процесса, не отличается по химическим показателям от раствора, получаемого в ходе ручного управления (см. таблицу), и может быть использован для выращивания культурных растений в замкнутых системах жизнеобеспечения. Отличие в содержании азота связано с более интенсивным газовыделением при ручном управлении (см. рис. 2), что привело к большему выносу аммиака из раствора и, как следствие, снижению содержания азота в растворе. Отличие в содержании основных элементов, таких как K, Na, P и S, достоверно не обнаружено. То есть степень выпадения этих элементов в осадок не увеличилась, а значит, доступность для растений при гидропонном выращивании сохраняется. Степень окисления растворов сравнивали по значению химического поглощения кислорода (ХПК), эта величина также достоверно не различалась.



Рис. 4. Ход процесса при автоматическом управлении

Элементарный состав раствора минерализованных экзометаболитов человека во вновь созданном реакторе (относительная погрешность определения – 10 %)

	Азот, мг/л		Κ,	Na,	P,	S,	ХПК,
Управление	По Кьельдалю	NH ₄₊	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л
Ручное	4813,3	883,3	1100	2300	156,2	469,3	1998
Автоматическое	6800	1400	1300	2000	173,2	478,5	2220

Созданная система автоматического управления позволяет минерализовать органические отходы с минимальным участием человека, при этом сохраняя эффективность метода в смысле глубины окисления и доступности основных элементов для растений. Система работает, основываясь на значении величины давления, являющейся критическим показателем процесса, что означает ее способность провести реакцию до конца в стабильном режиме, снижая вероятность аварийной ситуации.

Библиографические ссылки

1. 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.

2. Wenting H., Yidong X., Hong L. A technique for preparing soil-like substrate for bioregenerative life support system // 17th IAA Humans in Space Symposium. 2009. P. 53.

3. Tikhomirov A. 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.

4. Пат. 2111939 Российская Федерация. Способ утилизации отходов жизнедеятельности человека и несъедобной биомассы растений, приводящий к получению из них удобрений / Куденко Ю. А., Павленко Р. А. № 96114242/13, Бюл. № 15. 4 с.

5. Tsuga S. [et al]. Research and development of the waste processing system in the closed ecology experiment facilities // Application of a Closed Experimental System Modeling of ¹⁴C Transfer in the Environment / Institute for Inveronmental Sciences. Japan, 2007. P. 119–126.

6. 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 biotechnical life support system // Advances in Space Research. 2012. Vol. 49. P. 249–253.

7. Tikhomirov A. [et al]. Research in the Bios-3 Closed Controlled Experiment Facility of the Institute of Biophysics of the Siberian Branch of Russian Academy of Science // Application of a Closed Experemental System to Modeling of ¹⁴C Transfer in the Environment / Institute for Environmental Sciences. Japan, 2007. P. 155–162.

References

1. 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. 2. Wenting H., Yidong X., Hong L. A technique for preparing soil-like substrate for bioregenerative life support system. *17th IAA Humans in Space Symposium*. 2009, p. 53.

3. 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.

4. Kudenko Ju. A., Pavlenko R. A. Sposob utilizatsii otkhodov zhiznedejatel'nosti cheloveka i nesjedobnoj biomassy rastenij, privodjashhij k polucheniju iz nih udobrenij [Way of utilization of human wastes and inedible plant biomass, gaining hydroponic fertilizer]. Patent RF2111939, no. 96114242/13; Bjul. № 15, 4 p.

5. Tsuga S., Tako Y., Endo M., Nishidate K., Fukuda S. Research and development of the waste processing system in the closed ecology experiment facilities. *Application of a Closed Experimental System Modeling of* ¹⁴C *Transfer in the Environment.* Japan, IES, 2007, p. 119 – 126.

6. 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 biotechnical life support system. *Advances in Space Research.* 2012, vol. 49, p. 249–253.

7. Tikhomirov A., Degermendzhi A., Ushakova S., et al. Research in the Bios-3 Closed Controlled Experiment Facility of the Institute of Biophysics of the Siberian Branch of Russian Academy of Science. *Application of a Closed Experimental System Modeling of* ¹⁴C Transfer in the Environment. Japan, IES, 2007, p. 155–162.

© Трифонов С. В., Куденко Ю. А., Тихомиров А. А., Мурыгин А. В., 2014



TECHNOLOGICAL PROCESSES AND MATERIALS

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАТЕРИАЛЫ

