



## РАЗРАБОТКА РЕГЕНЕРИРУЕМОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ДЛЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ\*

*Н. В. Постернак<sup>1</sup>, Ю. А. Ферантонов<sup>1</sup>, С. Н. Ерохин<sup>1</sup>, В. В. Донских<sup>1</sup>,  
М. Б. Алехина<sup>2</sup>, Л. Н. Мухамедиева<sup>3</sup>, А. А. Пахомова<sup>3</sup>, Д. С. Царьков<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ОАО Корпорация «Росхимзащита»

д. 19, Моршанское шоссе, г. Тамбов, 392680, Россия

тел.: +7 (4752) 56-06-80; e-mails: mail@roshimzaschita.ru, ferapontova2005@yandex.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

д. 9/2, Миусская пл., Москва, 125047, Россия; тел.: +7(499)978-86-60

<sup>3</sup>ГНЦ РФ – «Институт медико-биологических проблем РАН»

д. 76А, Хорошевское ш., Москва, 123007, Россия; тел.: +7(499)195-15-73; http://www.imbp.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.16-18.37-50

Заключение совета рецензентов: 10.06.19 Заключение совета экспертов: 14.06.19 Принято к публикации: 18.06.19

При разработке систем жизнеобеспечения для длительных космических полетов важнейшими задачами являются поглощение диоксида углерода из воздуха, получение диоксида углерода с концентрацией выше 98 % и получение из диоксида углерода кислорода с помощью процесса Боша – Сабатье. Для решения этих задач необходим регенерируемый поглотитель диоксида углерода, адаптированный к условиям космического полета. Предложен новый способ получения хемосорбентов на основе гидратированного оксида циркония с использованием полиакрилатов в качестве связующего и полимерной матрицы. Разрабатываемый регенерируемый поглотитель диоксида углерода (РПДУ) для применения его в условиях космических полетов должен соответствовать нормативным требованиям санитарно-химической и токсикологической безопасности материалов, предназначенных для оборудования обитаемых герметичных помещений, быть устойчивым к радиационному излучению и к воздействию плесневых грибов. При изучении процессов сорбции/десорбции диоксида углерода установлена взаимосвязь между технологическими параметрами синтеза хемосорбентов и кинетическими параметрами процессов массопереноса сорбата в циклах «сорбция – регенерация». Установлено, что оптимальным с точки зрения эксплуатационных характеристик разработанных поглотителей является весовое соотношение «адсорбент – наполнитель/полимерная матрица» 89÷94/11÷6. Экспериментально показано, что основные эксплуатационные характеристики разработанных материалов не меняются в условиях экспериментов на протяжении 2 000 циклов «сорбция – регенерация». Полученные хемосорбенты были исследованы методами физико-химического анализа. С помощью методов газовой хроматографии и хроматомасс-спектрометрии проведены санитарно-химические исследования и токсикологическая оценка количественного и качественного состава компонентов газовой смеси РПДУ и газовой смеси, образующейся при регенерации РПДУ. Кроме того, проведены микробиологические испытания образцов РПДУ на предмет стойкости материала к воздействию плесневых грибов. Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанных материалов в системах жизнеобеспечения пилотируемых космических кораблей для освоения дальнего космоса.

\* Постернак Н.В., Ферантонов Ю.А., Ерохин С.Н., Донских В.В., Алехина М.Б., Мухамедиева Л.Н., Пахомова А.А., Царьков Д.С. Разработка регенерируемого поглотителя диоксида углерода для систем жизнеобеспечения человека при длительных космических полетах // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;16-18:37-50.



Ключевые слова: хемосорбция; системы жизнеобеспечения; гидратированный оксид циркония; диоксид углерода; полиакрилаты; связующее; водостойкость; циклы «сорбция – регенерация»; регенерация; динамическая активность; санитарно-химические исследования; токсикологическая оценка; микробиологические испытания.

## DEVELOPMENT OF A REGENERATED CARBON DIOXIDE ABSORBER FOR HUMAN LIFE SUPPORT SYSTEMS DURING LONG SPACE FLIGHTS

*N.V. Posternak<sup>1</sup>, Yu.A. Ferapontov<sup>1</sup>, S.N. Erokhin<sup>1</sup>, V.V. Donskikh<sup>1</sup>, M.B. Alehina<sup>2</sup>, L.N. Muhamedieva<sup>3</sup>, A.A. Pakhomova<sup>3</sup>, D.S. Tsarkov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Corporation “Roshimzaschita” Ltd.

19 Morshanskoe Drive, Tambov, 392680, Russia

tel.: +7 (4752) 56 06 80; e-mails: mail@roshimzaschita.ru, ferapontova2005@yandex.ru

<sup>2</sup>FSBEI of HE “DI Russian University of Chemical Technology Mendeleev”

9/2 Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russian; tel.: +7 499 978 86 60

<sup>3</sup>SSC RF – “Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences”

76A Khoroshevskoe Drive., Moscow, 123007, Russian; tel.: +7 499 195 15 73, http://www.imbp.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.16-18.37-50

Referred 10 June 2018 Received in revised form 14 June 2018 Accepted 18 June 2019

In the development of life support systems for long-term space missions, the most important tasks are the absorption of carbon dioxide from the air, the production of carbon dioxide with a concentration above 98 %, and the production of oxygen from carbon dioxide by the Bosch – Sabatier process. To solve these problems, a regenerative carbon dioxide absorber adapted to space flight conditions is required. The article proposes a new method for the production of chemisorbents based on hydrated zirconium oxide using polyacrylates as a binder and polymer matrix. The regenerated absorber of carbon dioxide for its application in space flights must meet the regulatory requirements of sanitary-chemical and toxicological safety of materials intended for the equipment of inhabited sealed rooms, be resistant to radiation and to the effects of mold. In the study of the processes of “sorption – desorption” of carbon dioxide, we have established the relationship between the technological parameters of the synthesis of chemisorbents and the kinetic parameters of the processes of mass-sorption of sorbate in the “sorption – regeneration” cycles. It is found that the optimal weight ratio of the “adsorbent – filler/polymer matrix” 89÷94/11÷6 is optimal in terms of the performance characteristics of the developed absorbers. It is shown experimentally that the main operational characteristics of the developed materials do not change under experimental conditions during 2000 “sorption – regeneration” cycles. The resulting chemisorbents are investigated by physicochemical analysis. Employing methods of gas chromatography and chromatomass spectrometry, we have conducted sanitary and chemical studies and toxicological assessment of the quantitative and qualitative composition of the components of gas release of the developed regenerated carbon dioxide absorber and air-gas mixture formed during the regeneration of the regenerated carbon dioxide absorber. Also we have carried out microbiological tests of samples of the regenerated absorber of carbon dioxide for resistance of material to influence of mold mushrooms. The results obtained confirm the possibility of using the developed materials in life support systems of manned spacecraft for deep space exploration.

Keywords: chemisorption; life support systems; hydrated zirconium oxide; carbon dioxide; polyacrylates; binder; water resistance; sorption – regeneration cycles; regeneration; dynamic activity; sanitary and chemical studies; toxicological assessment; microbiological tests.



*Николай Владимирович Постернак  
Nikolay Posternak*

**Сведения об авторе:** начальник лаб. №1 Отдела химии и новых химических технологий АО «Корпорация “Росхимзащита”».

**Образование:** Тамбовский государственный технический университет (2000 г.).

**Область научных интересов:** адсорбция; очистка и разделение газов; технология неорганических веществ.

**Публикации:** 9.

**h-index:** 1

**Information about the author** Head of Laboratory no. 1 of the Department of Chemistry and New Chemical Technologies, Corporation “Roshimzaschita” Ltd.

**Education:** TSTU, 2000.

**Research interests:** adsorption; gas cleaning and separation; technology of inorganic substances.

**Publications:** 9.



Юрий Анатольевич Ферапонтов  
Yuri Ferapontov

**Сведения об авторе:** канд. технических наук, начальник Отдела химии и новых химических технологий АО «Корпорация «Росхимзащита»».

**Образование:** химфак МГУ им. М. В. Ломоносова (1990 г.).

**Область научных интересов:** адсорбция; гетерогенные процессы, химия поверхности.

**Публикации:** 72.

*h*-index: 6

**Information about the author:** Ph.D. in Engineering, Head of Laboratory no. 1 of Department of Chemistry and New Chemical Technologies, Corporation "Roshimzaschita" Ltd.

**Education:** Lomonosov Moscow State University, 1990.

**Research interests:** adsorption; surface chemistry.

**Publications:** 72.



Сергей Николаевич Ерохин  
Sergey Erokhin

**Сведения об авторе:** начальник сектора лаборатории №1 отдела ОХиНХТ АО «Корпорация «Росхимзащита»».

**Образование:** ТГТУ (1994 г.).

**Область научных интересов:** адсорбция; технология неорганических веществ.

**Публикации:** 6.

*h*-index: 1

**Information about the author:** Head of the Sector of the Laboratory no. 1 OHiNHT Corporation "Roshimzaschita" Ltd.

**Education:** TSTU, 1994.

**Research interests:** adsorption; technology of inorganic substances.

**Publications:** 6.



Валентина Владимировна  
Донских  
Valentina Donskikh

**Сведения об авторе:** научный сотрудник лаборатории №1 отдела ОХиНХТ АО «Корпорация «Росхимзащита»».

**Образование:** Воронежский технический институт (1974г.).

**Область научных интересов:** адсорбция; технология неорганических веществ.

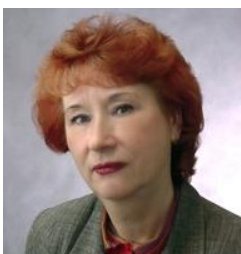
**Публикации:** 28.

**Information about the author:** Researcher of the Laboratory no. 1 OHiNHT Corporation "Roshimzaschita" Ltd.

**Education:** Voronezh Technical Institute, 1974.

**Research interests:** adsorption; technology of inorganic substances.

**Publications:** 28.



Марина Борисовна Алехина  
Marina Alekhina

**Сведения об авторе:** д-р хим. наук, профессор Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева.

**Образование:** Московский химико-технологический институт имени Д.И. Менделеева (1974 г.).

**Область научных интересов:** адсорбция; адсорбенты; очистка и разделение газов; технология неорганических веществ.

**Публикации:** 173.

*h*-index: 6

**Information about the author:** D.Sc. in Chemistry, Professor of D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia.

**Education:** Moscow Institute of Chemical Technology named after D.I. Mendeleev, 1974.

**Research interests:** adsorption; adsorbents; gas purification and separation; technology of inorganic substances.

**Publications:** 173.



Лана Низамовна Мухамедиева  
Lana Mukhamedieva

**Сведения об авторе:** д-р мед. наук, заведующий лабораторией 0-121 «Санитарно-химическая безопасность и токсикология воздуха герметичных помещений» ГНЦ РФ – ИМБП РАН

**Образование:** Таджикский государственный медицинский институт (1964 г.).

**Область научных интересов:** космическая токсикология; воздушная среда пилотируемых космических аппаратов.

**Публикации:** 63.

*h*-index: 6

**Information about the author:** D.Sc. in Medicine, Head of Laboratory 0-121 "Sanitary-Chemical Safety and Toxicology of Hermetically Sealed Compartment's Air" Institute of Biomedical Problems.

**Education:** Avicenna Tajik State Medical University, 1964.

**Research interests:** space toxicology; air environment of spacecraft.

**Publications:** 63.





Анна Андреевна Пахомова  
Anna Pakhomoval

**Сведения об авторе:** старший научный сотрудник лаборатории 0-121 «Санитарно-химическая безопасность и токсикология воздуха герметичных помещений» ГНЦ РФ – ИМБП РАН

**Образование:** Московский авиационный институт (2005 г.).

**Область научных интересов:** химико-аналитический мониторинг качества воздушной среды.

**Публикации:** 18.  
*h*-index: 2

**Information about the author:** Senior Researcher at Laboratory 0-121 “Sanitary-Chemical Safety and Toxicology of Hermetically Sealed Compartment’s Air” Institute of Biomedical Problems.

**Education:** Moscow Aviation Institute, 2005.

**Research interests:** chemical analytical monitoring of spacecraft air.

**Publications:** 18.



Дмитрий Сергеевич Царков  
Dmitriy Tsarkov

**Сведения об авторе:** старший научный сотрудник лаборатории 0-121 «Санитарно-химическая безопасность и токсикология воздуха герметичных помещений» ГНЦ РФ – ИМБП РАН.

**Образование:** Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (2008 г.).

**Область научных интересов:** химико-аналитический мониторинг качества воздушной среды.

**Публикации:** 18.  
*h*-index: 3

**Information about the author:** Senior Researcher at Laboratory 0-121 “Sanitary-Chemical Safety and Toxicology of Hermetically Sealed Compartment’s Air” Institute of Biomedical Problems.

**Education:** Lomonosov Moscow State University, 2008.

**Research interests:** chemical analytical monitoring of spacecraft air.

**Publications:** 18.

## 1. Введение

Анализ многолетней эксплуатации пилотируемых орбитальных комплексов «Мир» и «МКС» показал, что это уникальные гермообъекты с режимом полной изоляции от земной атмосферы, позволяющие обеспечивать не только пребывание и нормальную жизнедеятельность, но и поддерживать высокую работоспособность экипажа в течение длительного времени [1]. Системы жизнеобеспечения (СЖО) экипажей орбитальных космических объектов в условиях освоения дальнего космоса будут существенно отличаться от СЖО при орбитальных околоземных полетах. Основное отличие заключается в отсутствии возможности возобновления расходуемых материалов [1–5].

Необходимость в более полном круговороте веществ и экзобиологический запрет на удаление продуктов жизнедеятельности космонавтов в вакуум космического пространства могут внести большие коррективы в создание СЖО для длительных экспедиций (в настоящий момент на «МКС» все отходы собираются в кораблях «Прогресс» и во время спуска сгорают в плотных слоях земной атмосферы [1]). Для обеспечения эффективной и физиологически благоприятной жизнедеятельности человека при длительных космических полетах важно применять регенерируемые поглотители выделения  $\text{CO}_2$  с концентрацией не ниже 95–98 % с целью дальнейшей

его переработки [1, 6]. Использование поглотителей  $\text{CO}_2$  при создании локальных дыхательных атмосфер в системах пилотируемых космических кораблей (ПКК) накладывает на них довольно много ограничений:

- высокая динамическая активность по поглощаемому компоненту газовой фазы на единицу массы;
- высокая кинетика массопереноса сорбата в многочисленных циклах «сорбция – регенерация», позволяющая значительно уменьшить массогабаритные параметры изделий;
- стойкость к воздействию механических и гидравлических нагрузок и агрессивных сред;
- жесткое соответствие компонентов газовой выделения нормативным требованиям санитарно-химической и токсикологической безопасности материалов, предназначенных для оборудования обитаемых герметичных помещений;
- устойчивость к радиационному излучению;
- устойчивость материала к воздействию плесневых грибов.

Более всего этим условиям соответствует хемосорбент на основе гидратированного оксида циркония ( $\text{ZrO}(\text{OH})_2$ ).

Для систем СЖО ПКК авторами данной статьи разработана технология получения хемосорбентов на основе гидратированного оксида циркония, импрегнированного в органическую матрицу, и изучены их физико-химические свойства.

### Список обозначений

*Буквы латинского алфавита*

<i>a</i>	Динамическая активность поглотителя по диоксиду углерода [ $\text{дм}^3/\text{дм}^3$ ]
<i>M</i>	Масса, кг



Продолжение списка обозначений

<i>m</i>	Масса, г
<i>V</i>	Объем, дм <sup>3</sup>
<i>W</i>	Водостойкость хемосорбентов, %
<i>Индексы нижние</i>	
вх	Входная
вых	Выходная
гвс	Газовоздушная смесь
пог	Поглотитель
<i>Аббревиатуры</i>	
ДВ-VRX	Капиллярная колонка
ГВС	Газовоздушная смесь
ДВ-624	Разделительная колонка
МКС	Международная космическая станция
МПОГ	Масса поглотителя после испытания, кг
МСДПИД	Масс-селективный детектор / пламенно-ионизационный детектор
ПДКПКА	Предельно допустимая концентрация пилотируемого космического аппарата
ПКК	Пилотируемые космические корабли
РПДУ	Регенерируемый поглотитель диоксида углерода
СЖО	Система жизнеобеспечения

## 2. Теоретический анализ

На протяжении последних лет проводились исследования очистки воздуха от диоксида углерода и получения его в концентрированном виде с помощью сорбентов на основе гидратированных оксидов переходных металлов [7–9]. Было установлено, что наибольший интерес представляет хемосорбент на основе гидратированного оксида циркония (ZrO(OH)<sub>2</sub>). Данный материал позволяет очищать воздух от CO<sub>2</sub> с последующим его выделением в концентрированном виде при регенерации водяным паром. Однако на сегодня не удалось устранить основной недостаток регенерируемого поглотителя – низкие механические прочность и водостойкость при длительной эксплуатации. Вследствие этого при длительной эксплуатации в циклической работе (как минимум 1 000 циклов) происходит разрушение гранул поглотителя с образованием значительного количества пыли (фракция менее 1 мм), что в свою очередь приводит к снижению сорбционной активности поглотителя и негативно влияет на коммуникации и запорную арматуру установок для очистки атмосферы ПКК от CO<sub>2</sub>. Низкая водостойкость в условиях паровой регенерации приводит к вымыванию активных центров из хемосорбента, что также приводит к снижению сорбционной активности поглотителя в процессе эксплуатации.

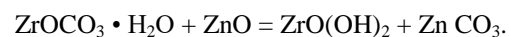
Существенно увеличить прочность и водостойкость хемосорбента можно с помощью органических полимеров (в качестве связующего), которые способны нивелировать деформационные напряжения, вызванные перепадом температур, аэродинамическими и гидравлическими нагрузками на материал. Данная тенденция отчетливо наблюдается в мировой технологии сорбентов на протяжении последних 10 лет [10–15]: в качестве адсорбента используют цеолиты [16, 17], силикагели, оксид алюминия и др., в качестве связующего – полиамиды [18], фторопласты

[19–26], полисульфоны [27], полиолефины, полиэтилентерефталат и др. или их смеси.

## 3. Экспериментальная часть

### 3.1. Получение образцов регенерируемого поглотителя диоксида углерода

Для обеспечения максимальной сорбционной активности получаемого материала использовался свежеприготовленный ZrO(OH)<sub>2</sub>. В качестве исходных компонентов для синтеза гидратированного оксида циркония были выбраны основной карбонат циркония (ZrCO<sub>3</sub> · H<sub>2</sub>O) и оксид цинка (ZnO) [9, 27]. Данный процесс схематично может быть описан уравнением реакции:

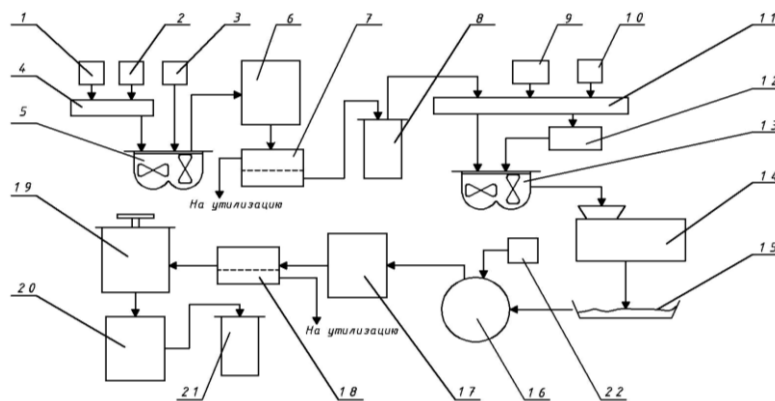


При этом гидратированный оксид циркония является основным продуктом реакции, а нерастворимый в воде карбонат цинка выступает в качестве структурообразующей добавки, улучшающей условия диффузии диоксида углерода в циклах «сорбция – регенерация».

В качестве органического связующего применялся акриловый латекс «Лентекс АКФ М2». Выбор в качестве органического связующего акрилового латекса обусловлен тем, что он обладает высокой водо- и щелочестойкостью и имеет температуру термической деструкции выше 140 °С [28]. Это позволит проводить глубокую регенерацию полученных хемосорбентов перегретым водяным паром на стадии десорбции. Кроме того, полиакрилаты имеют максимальную устойчивость к ионизирующему излучению и воздействию плесневых грибов и бактерий, что принципиально важно при длительной эксплуатации хемосорбентов в кабинах космических кораблей и станций.

Принципиальная схема получения регенерируемого поглотителя диоксида углерода (РПДУ) представлена на рис. 1.





**Рис. 1** – Технологическая схема получения регенируемого поглотителя диоксида углерода: 1, 2 – дозаторы для подачи основного карбоната циркония и оксида цинка соответственно; 3 – мерник для подачи пероксида водорода; 4, 11 – весы; 5, 13 – смеситель; 6, 17, 20 – сушильный шкаф; 7, 18 – сито; 8 – тара с порошком хемосорбента; 9 – мерник для подачи полимерного связующего; 10 – тара с дистиллированной водой; 12 – тара со связующим; 14 – гранулятор; 15 – поддон; 16 – барабан для обкатки; 19 – автоклав; 21 – контейнер с готовым хемосорбентом

**Fig. 1** – Technological scheme of obtaining a regenerable carbon dioxide absorbent; 1, 2 – dispensers for the production of basic zirconium carbonate and zinc oxide, respectively; 3 – hydrogen peroxide meter; 4, 11 – libra; 5, 13 – mixer; 6, 17, 20 – drying cabinet; 7, 18 – sieve; 8 – container with chemisorbent powder; 9 – polymer binder; 10 – container with distilled water; 12 – container with a binder; 14 – granulator; 15 – pallet; 16 – run-in drum; 19 – autoclave; 21 – container with ready chemisorbent

Процесс получения РПДУ осуществляли следующим образом [27]. Готовили исходную композицию: к навеске основного карбоната циркония добавляли оксид цинка, перемешивали в смесителе 5 в течение 40÷60 мин., затем, не прекращая перемешивания, вводили пероксид водорода и перемешивали ещё в течение 10÷15 мин. Подачу основного карбоната циркония и оксида цинка осуществляли с помощью дозаторов 1 и 2 соответственно. Пероксид водорода добавляли из мерника 3 в количестве, необходимом для получения однородной суспензии. Полученную массу сушили в сушильном шкафу 6 с принудительной циркуляцией воздуха при температуре (80 ± 5)°C. Высушенный порошок рассеивали на ситах для отделения нужной фракции и загружали в технологическую тару 8. Затем навеску порошка поглотителя засыпали в смеситель 13, куда при перемешивании в течение 5÷7 мин. из мерника 9 приливали расчётное количество полимерного связующего. Перемешивание суспензии про-

водилось в течение 45÷60 мин, после чего на грануляторе 14 с фильерой необходимого диаметра происходило формование. Полученные гранулы подсушивали на воздухе в течение 2÷3 ч на поддоне 15, затем окатывали в барабане обкатки 16 для придания окончательной формы. В сушильном шкафу 17 при температуре (65 ± 5) °C происходила сушка хемосорбента до влажности гранул (24 ± 2) % вес. Гранулы пропускали через комплект сит 18, обеспыливали воздухом и проводили гидротермальную обработку в автоклаве 19 при температуре (130 ± 5)°C в течение 3 ч. После гидротермальной обработки готовый поглотитель сушили в сушильном шкафу 20 при температуре (65 ± 5) °C до влажности гранул (24 ± 2) % вес. Готовый формованный хемосорбент собирали в контейнер 21.

Технологические параметры получения РПДУ и состав конечного продукта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры получения РПДУ

Table 1

Technological parameters of obtaining the regenerated carbon dioxide absorbent

№ образца	Соотношение исходных компонентов, % вес		Количество H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> на 1 кг смеси исходных компонентов, мл	Температура сушки исходной суспензии, °C	Соотношение исходных компонентов к связующему в пересчете на сухое вещество, % вес.	Время смешения, мин.	Температура сушки гранул, °C	Влажность конечного продукта, % вес.
	ZrOCO <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	ZnO						
1	90	10	63	80	9	45÷60	65	25±2
2	93	7	55	80	7	45÷60	65	25±2
3	93	7	55	75	5	45÷60	65	25±2
4	93	7	63	80	9	45÷60	65	25±2
5	93	7	63	80	9	45÷60	65	25±2
6	93	7	55	80	11	45÷60	65	25±2
7	93	7	63	80	13	45÷60	65	25±2
8	93	7	60	85	9	45÷60	65	25±2
9	95	5	50	80	9	45÷60	65	25±2

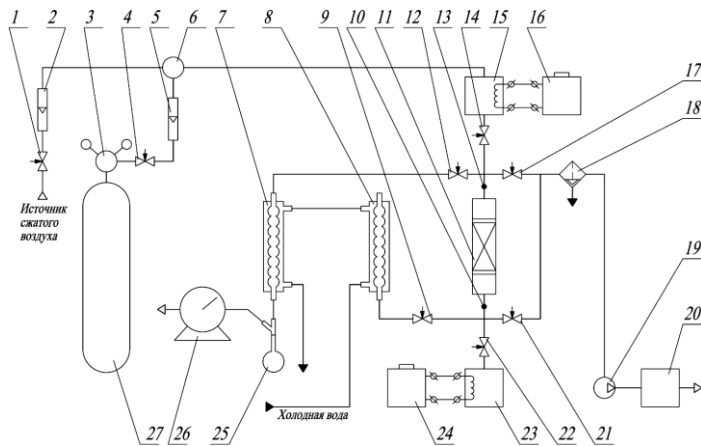
### 3.2. Исследование хемосорбционных характеристик поглотителя

Второй этап исследования был посвящен изучению хемосорбционных характеристик полученных материалов в циклических процессах при условиях, приближенных к параметрам атмосферы пилотируемых орбитальных комплексов и проведению санитарно-химических испытаний, токсикологической оценки материала и его микробиологических исследований.

Динамическая активность по диоксиду углерода определялась при пропускании газовой смеси (ГВС) через динамическую трубку, заполненную изучаемыми образцами, при следующих условиях:

- объёмный расход ГВС ( $16 \pm 1$ ) дм<sup>3</sup>/мин.;
- температура подаваемой ГВС ( $60 \pm 3$ ) °С;
- объёмная доля диоксида углерода в ГВС ( $0,40 \pm 0,06$ ) %;
- объём поглотителя ( $150 \pm 2$ ) см<sup>3</sup>;
- время сорбции 60 мин.;
- время десорбции 25 мин.;
- температура пара ( $105 \pm 3$ ) °С;
- скорость подачи пара при десорбции ( $1,45 \pm 0,10$ ) г/мин.

Испытания проводились на установке, схема которой представлена на рис. 2.



**Рис. 2** – Схема установки для определения динамической активности хемосорбента:

- 1, 4, 9, 12, 14, 17, 21, 22 – вентиль; 2, 5 – ротаметр; 3 – редуктор; 6 – смеситель; 7, 8 – холодильник; 10, 13 – термопара; 11 – динамическая трубка; 15 – нагреватель; 16, 24 – латр; 18 – колба с осушителем; 19 – побудитель потоков; 20 – газоанализатор; 23 – парогенератор; 25 – колба; 26 – газовый счетчик ГСБ-400; 27 – баллон с диоксидом углерода

**Fig. 2** – Installation scheme for determining the dynamic activity of a chemisorbent:

- 1, 4, 9, 12, 14, 17, 21, 22 – valve; 2, 5 – rotameter; 3 – gearbox; 6 – mixer; 7, 8 – fridge; 10, 13 – thermocouple; 11 – dynamic tube; 15 – heater; 16, 24 – latr; 18 – desiccant flask; 19 – flow booster; 20 – gas analyzer; 23 – steam generator; 25 – flask; 26 – flask gas meter GSB-400; 27 – carbon dioxide bottle

Испытания состояли из непрерывной серии 2 000 последовательных циклов (сорбция – регенерация) и проводились следующим образом. Для начала стадии сорбции включали источник сжатого воздуха, с помощью вентилей 1 устанавливали необходимый расход ГВС по показаниям ротаметра 2 и газового счетчика 26. Открывали баллон с диоксидом углерода 27 и с помощью редуктора 3 устанавливали заданный расход CO<sub>2</sub> по показаниям ротаметра 5 с проверкой концентрации CO<sub>2</sub> в ГВС по показаниям газоанализатора 20. Открывали вентиль 14 для подачи ГВС в динамическую трубку 11. Включали побудитель потоков 19 и секундомер. Этот момент считали началом сорбции. Каждые 5 мин. фиксировались: время от начала опыта; объёмная доля диоксида углерода на входе и выходе в динамическую трубку; расход ГВС; показания газового счетчика 26 в начале и в конце опыта; температура ГВС на входе в динамическую трубку и на выходе из нее. Время сорбции составляло 60 мин. По окончании стадии сорбции начиналась стадия десорбции – закрывали вентили 14, 17 и открывали вентиль 12. Вентилем 22 соединяли парогенератор 23 с динамической трубкой 11, вентиль 9 закрывали. Этот момент считался началом десорбции. Фиксировались: время от начала опыта; показания счетчика 26; напряжение и сила тока, подаваемого на парогенератор; температура на выходе из слоя поглотителя. Время десорбции составляло 25 мин. Регистрация параметров проводилась каждые 2 мин. Че-

рез 25 мин. из колбы 18 сливали конденсат, измеряли его объем. Вентилем 22 отсекали парогенератор 23 от динамической трубки 11, вентиль 9 открывали. Динамическую трубку переключали на сорбцию. После проведения 2 000 циклов определяли массу и химический состав конденсата.

Динамическую активность поглотителя по диоксиду углерода [дм<sup>3</sup>/дм<sup>3</sup>] определяли по формуле (1):

$$a = \frac{V_{\text{ГВС}} * (V_{\text{ВХ}} - V_{\text{ВЫХ}}) * 10}{M_{\text{пог}}} \quad (1)$$

где  $V_{\text{ГВС}}$  – объём ГВС прошедшей за время сорбции, дм<sup>3</sup>;  $V_{\text{ВХ}}$  – среднее значение входной концентрации CO<sub>2</sub> в ГВС, %;  $V_{\text{ВЫХ}}$  – среднее значение выходной концентрации CO<sub>2</sub> в ГВС, %;  $M_{\text{пог}}$  – масса поглотителя до испытания, кг.

При проведении экспериментов применялись поглотители одинакового гранулометрического состава (диаметр гранул  $1,2 \pm 0,1$  мм).

Кроме того, была определена водостойкость полученных поглотителей. Для этого образцы массой ( $10 \pm 1$ ) г помещали в стеклянную колбу с обратным холодильником, заливали ~100 мл дистиллированной воды и кипятили в течение 2 ч. Затем гранулы сушили при 60 °С в течение 3 ч.

Водостойкость хемосорбентов  $W$ , %, рассчитывали по формуле (2):

$$W = \frac{m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $m_1$  – масса хемосорбента до испытания, г;  $m_2$  – масса хемосорбента после сушки, г.

Результаты эксперимента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Эксплуатационные параметры полученных поглотителей

Table 2

Operational parameters of the absorbers obtained

№ образца из табл. 1	Насыпная плотность, кг/дм <sup>3</sup>	Параметры исходного поглотителя				Параметры поглотителя после 2 000 циклов «сорбция – регенерация»			
		Динамическая активность, дм <sup>3</sup> /кг	Водостойкость W, %	Прочность на раздавливание, кг/гр	Масса, г	Динамическая активность, дм <sup>3</sup> /кг	Водостойкость W, %	Масса, г	Прочность на раздавливание, кг/гр
1	1,12	8,28	99,95	4,8	193,8	8,24	99,95	193,70	4,7
2	1,15	8,2	99,93	3,6	194,1	8,09	99,85	193,72	3,6
3	1,08	8,34	98,56	2,5	195,5	8,20	98,54	194,02	2,4
4	1,08	7,50	99,95	4,8	198,1	7,55	99,93	197,96	4,8
5	1,14	8,34	99,95	4,8	193,18	8,33	99,95	193,08	4,8
6	1,12	8,05	99,96	5,0	194,2	8,09	99,96	194,12	5,0
7	1,08	8,01	99,97	5,1	193,7	7,99	99,99	193,68	5,1
8	1,14	8,12	99,96	4,8	195,6	8,11	99,99	195,58	4,8
9	1,14	8,03	99,96	4,8	194,3	7,97	99,96	194,22	4,8

### 3.3. Санитарно-гигиеническая экспертиза образцов РПДУ

Для того чтобы определить соответствие компонентов газовой выделенной нормативным требованиям безопасности, указанным в [29], была проведена санитарно-гигиеническая экспертиза образцов РПДУ. Испытания проводились в соответствии с требованиями «Методических указаний по санитарно-химическому и токсикологическому исследованию неметаллических материалов, предназначенных для оборудования обитаемых герметичных помещений», утв. Минздравом СССР 03.09.1982. и ГОСТами [29–30]. Испытания проводились в герметичных камерах объемом 3,5 л и 100 л, предварительно механически очищенных от возможных загрязнений. В процессе подготовки к эксперименту камеры термостатировали в открытом виде при температуре +80 °С в течение 4 часов с целью дегазации и после охлаждения до +40 °С герметизировали. Пробы воздуха, взятые из камер, анализировали на состав и концентрации химических примесей сочетанием методов газовой хроматографии и хроматомасс-спектрометрии. После получения положительных результатов и продувки камер азотом особой чистоты [31], камеры загружали исследуемыми материалами и герметизировали. Анализ органических химических примесей проводился методами газовой хроматографии и хроматомасс-спектрометрии с последующим использованием компьютерной техники для идентификации органических веществ и количественной оценки их в анализируемых пробах. При газовой хроматографии пробы воздуха из гермокамеры вводились газовым шприцем в капиллярную разделительную колонку DB-624, установленную в хроматографе «Agilent Technologies 6890N». Идентификация ве-

ществ и их количественная оценка проводилась на выходе из капиллярной разделительной колонки пламенно-ионизационным детектором с помощью компьютерной техники для обработки экспериментальных данных. Калибровка хроматографа для последующей количественной оценки летучих химических примесей проводилась с помощью стандартных образцов чистых веществ и аттестованных растворов. При хроматомасс-спектрометрии анализ проб воздуха проводили по методике, рекомендованной [32]. Пробы воздуха отбирали на адсорбционные трубки «Gerstel» со слоем сорбента, подвергали термической десорбции при плюс 280 °С с одновременным криогенным улавливанием летучих компонентов при минус 30 °С и последующим хроматографическим разделением на капиллярной колонке DB-VRX с детектированием квадрупольным масс-анализатором ионов электронного удара (энергия ионизации 70 эВ) в диапазоне m/z 30-350. Калибровку прибора «Agilent Technologies 7890B/5977B» с интегрированными системами десорбции и напуска «Gerstel» TDS3 и CIS4 проводили в растворе целевых соединений производства «Sigma-Aldrich» (Швейцария). При отборе 0,5 л пробы предел обнаружения идентифицированных соединений составлял 5 нг.

Анализ аммиака, оксида азота II, оксида азота IV, оксида серы IV и сероводорода проводился хемилюминесцентным газоанализатором аммиака (модель H320, поставщик «ОПТЕК»), хемилюминесцентным газоанализатором окислов азота (модель 310A, поставщик «ОПТЕК»), хемилюминесцентным газоанализатором диоксида серы и сероводорода (модель СВ-320А-1, поставщик «ОПТЕК»).

Санитарно-химические испытания полученных образцов РПДУ проводили по следующей схеме,





обусловленной режимами эксплуатации поглотителя в ПКК: термостатирование образцов при температуре +40 °С в течение 1 ч с последующим нагревом до +107 °С в течение 1 ч; термостатирование при температуре +107 °С в течение 1 ч. Отбор проб воздуха из камер проводили до эксперимента (фон) и через 1 ч испытаний. Результаты санитарно-химических испы-

таний РПДУ представлены в табл. 3 и 4. Поскольку в ходе проведения экспериментов было установлено, что количественно и качественно компоненты газовой выделения всех образцов полученных поглотителей практически аналогичны, в табл. 3 и 4 в качестве примера приводятся только результаты исследования образцов РПДУ № 1 и 4 из табл. 1.

Таблица 3  
Концентрации химических веществ (мг/м<sup>3</sup>) в пробах воздуха из гермокамеры при исследовании образца РПДУ №1 из табл. 1

Table 3  
Concentration of chemicals (mg/m<sup>3</sup>) in air samples from the thermocamera when examining the sample of the regenerated carbon dioxide absorber no.1 of Table1

Химические вещества	Фон	Экспозиция материала в течение 1 ч при T = 40 °С	Экспозиция материала в течение 1 ч при T = 107 °С
Этилацетат	н/о*	0,0055	0,0774
Бензол	н/о	0,0075	0,0768
1,3,5-триоксан	н/о	0,0054	0,0072
Ксилол	н/о	0,0042	0,0049
Уксусная кислота	н/о	н/о	0,1568
Гексан	н/о	н/о	0,1588
Бутанол-1	н/о	н/о	0,2737
Аммиак	0,045	0,044	0,043
Оксид азота VI	н/о	н/о	н/о
Оксид азота II	0,028	0,031	0,028
Оксид серы VI	н/о	н/о	н/о
Сероводород	0,0006	0,0006	0,0006
н/о – ниже чувствительности методов анализа			

Таблица 4  
Концентрации химических веществ (мг/м<sup>3</sup>) в пробах воздуха из гермокамеры при исследовании образца РПДУ № 4 из табл. 1

Table 4  
Concentration of chemicals (mg/m<sup>3</sup>) in air samples from the thermocamera when examining the sample of the regenerated carbon dioxide absorber no. 4 of Table1

Химические вещества	Фон	Экспозиция материала в течение 1 ч при T = 107 °С
Этилацетат	н/о	0,1129
Бензол	н/о	0,0477
1,3,5-триоксан	н/о	0,0095
Ксилол	н/о	0,0039
Уксусная кислота	н/о	0,1184
Гексан	н/о	0,1493
Бутанол-1	н/о	0,1434
Этанол	н/о	0,030
Аммиак	0,042	0,039
Оксид азота VI	н/о	н/о
Оксид азота II	0,027	0,026
Оксид серы VI	н/о	н/о
Сероводород	0,0005	0,0005

Кроме того, газовой хроматографией с масс-спектрометрией и химико-аналитическими методами проведены санитарно-химические исследования и токсикологическая оценка количественного и качественного состава ГВС, образующейся при регенерации РПДУ, для анализа аммиака, первичных аминов, сернистого ангидрида, сероводорода в заданных режимах эксплуатации на соответствие требованиям [29].

Санитарно-химические испытания ГВС, образующейся при регенерации РПДУ, проводили для образца № 5 из табл. 1 после первой регенерации и после 200 циклов «сорбция-регенерация», осуществленных в описанных ранее режимах. Результаты анализа проб ГВС, образующейся на стадии регенерации, представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Анализ проб ГВС после стадии регенерации №1

Table 5

Analysis of gas-air mixture samples after the regeneration stage no.1

Вещества	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>									
	Время от начала процесса десорбции									
	Фон	3 мин.	6,5 мин.	10 мин.	15 мин.	20 мин.	25 мин.	30 мин.	35 мин.	40 мин.
Аммиак	0,083	0,084	0,084	0,044	0,044	0,033	0,040	0,048	0,014	н.о
Оксид серы IV	0,003	0,003	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Сероводород	0,0011	0,0008	0,0006	н.о	н.о	0,0004	н.о	0,0004	0,0006	0,0003
Оксид азота IV	0,010	0,008	0,007	н.о	н.о	н.о	н.о	0,001	0,003	н.о
Оксид азота II	н.о	н.о	0,005	н.о	н.о	0,003	0,001	0,004	0,003	0,001

Таблица 6

Анализ проб газовой смеси после стадии регенерации № 200

Table 6

Analysis of gas-air mixture samples after the regeneration stage no. 200

Вещества	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>									
	Время от начала процесса десорбции									
	Фон	3 мин.	6,5 мин.	10 мин.	15 мин.	20 мин.	25 мин.	30 мин.	35 мин.	40 мин.
Аммиак	0,018	0,015	0,014	0,012	0,012	0,011	0,010	0,008	0,005	н.о
Оксид серы IV	0,003	0,002	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002	0,004	0,003
Сероводород	0,0012	0,0009	0,0007	0,0008	н.о	0,0003	0,0003	0,0004	0,0002	0,0001
Оксид азота IV	0,011	0,009	0,007	0,0004	н.о	н.о	н.о	н.о	н.о	н.о
Оксид азота II	0,002	0,004	0,002	н.о	н.о	н.о	н.о	0,003	0,002	0,002

### 3.4. Микробиологические испытания образцов РПДУ

Поскольку достаточно хорошо известно, что на пилотируемых орбитальных станциях [1] существует серьезная проблема – наличие большого количества плесневых грибов, – были проведены микробиологические испытания образцов РПДУ на предмет стойкости материала к воздействию плесневых грибов. Исследования грибостойкости материала проводили по [33] (материалы полимерные и их компоненты – методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов). Сущность испытаний заключается в выдерживании образцов материалов, зараженных спорами грибов, в условиях, оптимальных для их развития, с последующей оценкой грибостойкости по степени развития плесневых грибов. Этот метод позволяет оценить стойкость материалов и их компонентов в условиях, исключающих дополнительный источник питания для грибов, то есть при отсутствии минеральных и органических загрязнений. Согласно методике испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов, были взяты 5 партий образцов по 2÷3 см<sup>3</sup>, которые очищали от внешних загрязнений путем промывания нагретой водой, а затем высушивали в антисептических условиях. Для испытаний применяли следующие виды грибов всероссийской коллекции микроорганизмов (ВКМ): *Aspergillus niger* van Tieghem, ВКМ F-1119; *Aspergillus terreus* Thom, ВКМ F-1025; *Aspergillus oryzae* (Ahlburg) Cohn, ВКМ F-55; *Chaetomium globosum* Kunze, ВКМ F-109; *Paecilomyces varioti* Bainier, ВКМ F-378; *Penicillium funiculosum* Thom, ВКМ F-1115; *Penicillium chrysogenum* Thom, ВКМ

F-245; *Penicillium cyclopium* Westling, ВКМ F-265; *Trichoderma viride* Pers. ex S. F. Gray., ВКМ F-1117.

Для приготовления суспензии спор грибов для заражения образцов материала использовали тест-культуры грибов, выращенные на среде Чапека при 28 °С в возрасте от 14 до 28 сут., считая с момента посева. Суспензию спор в концентрации 1 млн/мл готовили отдельно для каждого вида тест-культур грибов. Для этого в колбу (пробирку), содержащую 15 ± 5 мл стерильного физиологического раствора, переносили споры грибов из пробирки с чистой культурой. Перенос спор из пробирки в колбу осуществляли путем захвата спор бактериологической петлей. При взятии спор из пробирки не касались петлей питательной среды. Количество спор в суспензии определяли методом подсчета с помощью счетной камеры Горяева. Приготовленные суспензии спор каждого вида грибов подвергали контролю для оценки их жизнеспособности. С этой целью, с соблюдением требований асептики, на поверхность среды Чапека, разлитой в чашки Петри, наносили отдельной пипеткой каплю суспензии каждого вида гриба, после этого чашку Петри закрывали. По истечении 5÷7 сут. производили осмотр посевов. Жизнеспособность всех культур микромицетов была подтверждена. Приготовленные суспензии спор каждого вида грибов смешивали в равных частях. Заражение образцов, помещенных в стерильные чашки Петри, осуществляли путем равномерного опрыскивания, не допуская слияния капель. Зараженные образцы выдерживали в боксе при комнатной температуре до высыхания капель, но не более 60 мин. Чашки Петри с зараженными образцами материалов помещали в



вакуумный эксикатор. Для создания в эксикаторе заданного уровня влажности на дно его наливали стерильную водопроводную воду. Испытания проводили при температуре  $29 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха более 90 %. В эксикаторе не допускалась конденсация влаги и воздействие освещения (как естественного, так и искусственного). Продолжительность испытаний составляла 28 сут. с промежуточным осмотром через 14 сут. Через каждые 7 сут. крышку эксикатора приоткрывали на  $2 \div 3$  мин. для притока воздуха. По окончании испытаний образцы материала извлекали из эксикатора и осматривали невооруженным глазом в рассеянном свете и при увеличении с помощью стереомикроскопа Stemi 2000 (фирмы Zeiss). Оценивали грибостойкость образцов по интенсивности развития на них грибов по 6-балльной шкале [33].

#### 4. Результаты и их обсуждение

Из представленных в табл. 2 данных следует, что основные эксплуатационные характеристики полученных РПДУ остаются неизменными на протяжении 2 000 циклов «сорбция – регенерация»

Содержание полимерного связующего менее 5 % приводит к уменьшению прочности и водостойкости получаемого поглотителя (при многократных циклах «сорбция – регенерация» наблюдается снижение массы образца вследствие вымывания активных частиц из связующего, образец № 3). Увеличение содержания связующего больше 11 % нецелесообразно, так как дальнейшее увеличение связующего не приводит к существенному росту прочности и водостойкости хемосорбента, однако снижает его сорбционную емкость на единицу массы.

В составе газовой фазы из полученных образцов РПДУ количественно идентифицировано 8 химических веществ, относящихся к классам предельных и ароматических углеводородов, спиртов, альдегидов, эфиров, кетонов, органических кислот. Токсикологическая оценка компонентов газовой фазы из исследуемых материалов была проведена по наиболее токсикологически значимым химическим веществам. Токсикологическая значимость химического вещества определялась по классу опасности, степени летучести, специфичности токсического воздействия (канцерогенный эффект, мутагенный эффект), наличию рефлекторного (раздражающего) воздействия и концентрации идентифицированных веществ. Концентрации бензола, бутанола-1 и уксусной кислоты не превышали 0,3 ПДКПКА, остальные вещества были детектированы на уровне  $10^{-2}$  ПДКПКА. Концентрации аммиака, первичных аминов, сернистого ангидрида, сероводорода также находились в пределах нормативных значений.

Количественный и качественный состав газовой фазы из всех образцов РПДУ в режимах эксплуа-

тации соответствует нормативным требованиям безопасности, указанным в [29].

Результат анализа проб газо-воздушной смеси после стадии регенерации химико-аналитическими методами и методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии показал, что концентрации аммиака, окислов азота, сернистого ангидрида, сероводорода соответствуют требованиям нормативных документов [29]. РПДУ обладают сорбционными свойствами по отношению к аммиаку.

На основании результатов исследований был определен показатель грибостойкости разработанных материалов. При осмотре под микроскопом поверхности гранул не выявлен рост мицелия грибов, что оценивается в 0 баллов. По результатам проведенных микробиологических испытаний, РПДУ относятся к категории грибостойких материалов.

Таким образом, применение разработанных регенерируемых поглотителей диоксида углерода допускается в обитаемых герметичных помещениях и пилотируемых космических объектах.

#### 5. Заключение

Предложенный способ получения регенерируемого поглотителя диоксида углерода для систем жизнеобеспечения человека на основе гидратированного оксида циркония с использованием в качестве связующего полиакрилатов позволяет получить поглотитель с заданными эксплуатационными свойствами.

В динамических условиях исследованы процессы «сорбции – регенерации» диоксида углерода полученными поглотителями и их водостойкость. Установлена взаимосвязь между технологическими параметрами синтеза и основными эксплуатационными параметрами получаемого материала.

Оптимальным с точки зрения эксплуатационных характеристик разработанных поглотителей является весовое соотношение «адсорбент – наполнитель/полимерная матрица»  $89 \div 94 / 11 \div 6$ .

Основные эксплуатационные характеристики разработанных материалов не меняются в условиях экспериментов на протяжении 2 000 циклов «сорбция – регенерация».

Разработанный поглотитель не является источником выделения аммиака, первичных аминов, сероводорода и сернистого ангидрида, поэтому в заданных режимах эксплуатации по составу газовой фазы и грибостойкости соответствует нормативным требованиям безопасности и может применяться в системах жизнеобеспечения пилотируемых космических кораблей.

#### Список литературы

[1] Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева в первом десятилетии XXI века. – М.: РКК «Энергия», 2011. – 832 с.



- [2] Иванов, Д.И. Системы жизнеобеспечения человека при высотных и космических полетах / Д.И. Иванов, А.И. Хромушкин. – М.: Машиностроение, 1968. – С. 61.
- [3] Воронин, Г.И. Жизнеобеспечение экипажей космических кораблей / Г.И. Воронин, А.И. Поливода. – М.: Машиностроение. – 1967. – 236 с.
- [4] Presti, J. Superoxide life support system for submersibles / J. Presti, H. Wallman, A. Petroctlli // Undersea Technol. – 1967. – Vol. 8. – P. 20.
- [5] Petroctlli, A. Some notes on the use of superoxides in regenerative air system / A. Petroctlli, A. Capolesto // Aerospace Med. – 1964. – Vol. 31. – P. 440.
- [6] Аврущенко А.Е., А.Ф. Новиков, В.И. Френкель. Системы электрохимической регенерации воздуха атомных подводных лодок. – Издательство «Русская история», Москва. 2002. – 431 с.
- [7] Патент 2316391 РФ, МПК D01J 20/06. Шубина В.Н., Путин С.Б. и др. Способ получения регенерируемого поглотителя диоксида углерода // 2008. Заявлена 05.09.2006; опубликована 10.02.2008. Бюл. № 4–7 с.
- [8] Гранкина, Ю.А. Синтез регенерируемого поглотителя диоксида углерода на основе гидратированного оксида циркония для концентрирования и удаления CO<sub>2</sub> в обитаемых замкнутых объектах / Ю.А. Гранкина, В.Н. Шубина [и др.] // ЖПХ. – 2016. – Т. 89. – № 1. – С 44–49.
- [9] Постернак, Н.В. Методы концентрирования диоксида углерода в системе регенерации воздуха в условиях длительных пилотируемых космических полетов / Н.В. Постернак [и др.] // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18. – № 1. – С. 173–181.
- [10] Yang, R.T. Adsorbents: fundamentals and applications / R.T. Yang. – N.Y.: 2003. Wiley – Interscience. – 410 p.
- [11] Aristov, Yu.I. Novel materials for adsorptive heat pumping and storage: screening and nanotailoring of sorption properties / Yu.I. Aristov // J. Chem. Eng. Jpn. – 2007. – Vol. 40. – No. 13. – P. 1241–1251.
- [12] Патент 6451095 US. МПК B01D 53/06. Keefer B.G., Doman D.G., McLean R. Modular pressure swing adsorption apparatus // 2002.
- [13] Патент 1323468 EPB. МПК B01J 20/18. Fritz H., Hoefler H., Hammer J. Adsorbing material comprised of porous functional solid incorporated in a polymer matrix // Патент 1323468 EPB. МПК B01J 20/18. 2001.
- [14] Патент 2939330 Fr. МПК B01J 20/18. Serge N., Alice M., Patrick A. Adsorbant zeolitique a liant organique // Патент 2939330 Fr. МПК B01J 20/18. 2008.
- [15] Патент 1323468 EPB. МПК B01J 20/18. Fritz H., Hoefler H., Hammer J. Adsorbing material comprised of porous functional solid incorporated in a polymer matrix // Патент 1323468 EPB. МПК B01J 20/18. 2001.
- [16] Патент 2939330 Fr. МПК B01J 20/18. Serge N., Alice M., Patrick A. Adsorbant zeolitique a liant organique // Патент 2939330 Fr. МПК B01J 20/18. 2008.
- [17] Патент 7655300 US. МПК B32B5/16. Metz H., Devaux A., Suarez S., Kunzmann A. Transparent zeolite – polymer hybrid material with tunable properties // Патент 7655300 US. МПК B32B5/16. 2010.
- [18] Патент 2390378 РФ. МПК B01J 20/32. Джаннаноэнио Р., Вескови К., Каттанео Л., Лонгони Д. Поглощающие системы, содержащие активную фазу, внедренную в пористый материал, распределенный в средстве с низкой проницаемостью // Патент 2390378 РФ. МПК B01J 20/32. 2010.
- [19] Ферапонтова, Л.Л. Адсорбент на основе цеолита с использованием в качестве связующего полимеров фторпроизводных этилена / Л.Л. Ферапонтова, Н.Ф. Гладышев, С.Б. Путин // Химическая технология. – 2011. – Т. 12. – № 4. – С. 215–222.
- [20] Ферапонтова, Л. Л. Выбор оптимальных условий получения композиционных сорбционно-активных материалов на основе цеолита и фторпроизводных этилена / Л.Л. Ферапонтова, Н.Ф. Гладышев, С.Б. Путин // Химическая технология. – 2012. – Т. 13. – № 1. – С. 11–17.
- [21] Ферапонтова, Л.Л. Изучение физико-химических свойств композиционных сорбционно-активных материалов на основе цеолита и полимеров фторпроизводных этилена / Л.Л. Ферапонтова [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85. – Вып. 3. – С. 470–476.
- [22] Пат. 2446876 РФ № 2010136355/05. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Ферапонтов Ю.А., Ферапонтова Л.Л. Способ получения формованного сорбента // Пат. 2446876 РФ № 2010136355/05; заявл. 30.08.2010, опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. 14 с.
- [23] Патент 2481154 РФ № 2011139686/05 Н.Ф., Гладышева Т.В., Ферапонтов Ю.А., Ферапонтова Л.Л. Способ получения гибких композиционных сорбционно-активных материалов // Патент 2481154 РФ № 2011139686/; заявл. 29.09.2011; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13. 14 с.
- [24] Патент 2543167 РФ № 2013102823/05 Ферапонтова Л.Л., Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., и др. Способ получения гибких композиционных сорбционно-активных материалов // Патент 2543167 РФ № 2013102823/05; заявл. 22.01.2013, опубл. 27.07.2014. Бюл. № 21. 14 с.
- [25] Posternak, N.V. Composite sorption-active materials based on zeolite and ethylene fluorine derivatives part I. Raw materials, production technology and research methodology for prototypes / N.V. Posternak [et al.] // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – № 4. – С. 29–40.
- [26] Posternak, N.V. Composite sorption-active materials based on zeolite and ethylene fluorine derivatives part II. Preparation of composite sorption-active materials, investigation of their physicochemical properties and selection of optimal synthesis conditions / N.V. Posternak [et al.] // Advanced Materials and Technologies. – 2018. – № 1. – С. 58–68.
- [27] Патент 2656490 РФ. № 2017121491/05. Яркина Л.А. Булаев Н.А. Ферапонтов Ю.А., Постернак Н.В. Способ получения регенерируемого поглотителя диок-



сида углерода // Патент 2656490 РФ. № 2017121491/05; заявл. 19.06.2017, опубл. 05.06.2018. Бюл. № 16. 14 с.

[28] Физико-химические основы синтеза и переработки полимеров: Межвузовский сборник / Под ред. проф. Ю.Д. Семчикова. – Горький: ГГУ, 1980. – 128 с.

[29] ГОСТ Р 50804-95 Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. – ГОССТАНДАРТ РОССИИ. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1995.

[30] ГОСТ Р ИСО 14624-3-2010 Системы космические. Безопасность и совместимость материалов. Часть 3. Определение отходящих газов из материалов и смонтированных изделий. – Москва: Стандартинформ, 2011.

[31] ГОСТ 9293-74 Азот газообразный и жидкий. Технические условия. – Издательство стандартов 1974, Стандартинформ, 2007.

[32] ГОСТ Р ИСО 16000 Воздух замкнутых помещений. Часть 6. Определение летучих органических соединений в воздухе замкнутых помещений и испытательной камеры путем активного отбора проб на сорбент Терах ТА с последующей термической десорбцией и газохроматографическим анализом с использованием МСД/ПИД. – 2007.

[33] ГОСТ 9.049-91 Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. – Принимающий орган: Госстандарт СССР, 1976.

## References

[1] S.P. Korolev rocket and space Corporation Energia in the first decade of the XXI century (Raketno-kosmicheskaja korporacija "Energija" imeni S.P. Koroleva v pervom desiatiletii KHKH1 veka). Moscow: RKK "Energija" Publ., 2011, 832 p. (in Russ.).

[2] Ivanov D.I., Khromushkin A.I. Human life support systems for high-altitude and space flights (Sistemy zhizneobespechenija cheloveka pri vy'sotny'kh i kosmicheskikh poletakh). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968, p. 61. (in Russ.).

[3] Voronin G.I., Polivoda A.I. life Support of spacecraft crews (Zhizneobespechenie e'kipazhei' kosmicheskikh korablei'). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 236 p. (in Russ.).

[4] Presti J., Wallman H., Petroctlli A. Superoxide life support system for submersibles. *Undersea Technol.*, 1967;8:20.

[5] Petroctlli A., Capolesto A. Some notes on the use of superoxides in regenerative air system. *Aerospace Med.*, 1964;31;442. A.E.

[6] Avrushchenko A.E., Novikov A.F., Frenkel' V.I. Systems of electrochemical air regeneration of nuclear submarines (Sistemy e'lektrohimicheskoi' regeneracii vozduha atomny'kh podvodny'kh lodok). Moscow: Izdatel'stvo "Russkaia istoriia", 2002, 431 p. (in Russ.).

[7] Patent 2316391 RF, MPK D01J 20/06. Shubina V.N., Putin S.B. et al. A method of obtaining a regene-

rated absorber of carbon dioxide (Sposob polucheniia regeneriruemogo poglotitelja dioksida ugleroda) / 2008, 7 p. (in Russ.).

[8] Grankina Iu.A., Shubina V.N. et al. Synthesis of a regenerated absorber of carbon dioxide on the basis of hydrated zirconium oxide for the concentration and removal of CO<sub>2</sub> in manned confined objects (Sintez regeneriruemogo poglotitelja dioksida ugleroda na osnove gidratirovannogo oksida tseirkoniia dlia koncentrirvaniia i udaleniia SO<sub>2</sub> v obitaemy'kh zamknuty'kh ob'ektakh) / *ZHPKH*, 2016;89(1):44–49 (in Russ.).

[9] Posternak N.V., Putin S.B., Simanenkov S.I., Gataпова N.Tc. Methods of concentration of carbon dioxide in the air regeneration system in the conditions of long manned space flights (Metody koncentrirvaniia dioksida ugleroda v sisteme regeneracii vozduha v usloviiakh dlitel'ny'kh pilotiruemy'kh kosmicheskikh poletoy). *Vestnyk TGTU*, 2012;18(1):173–181 (in Russ.).

[10] Yang R.T. Adsorbents: fundamentals and applications. N.Y.: 2003. Wiley – Interscience, 410 p.

[11] Aristov Yu. I. Novel materials for adsorptive heat pumping and storage: screening and nanotailoring of sorption properties. *J. Chem. Eng. Jpn.*, 2007;40(13):1241–1251.

[12] Patent 6451095 US. MPK V01D 53/06. Keefer B.G., Doman D.G., McLean R. Modular pressure swing adsorption apparatus / 2002.

[13] Patent 1323468 ERV. MPK B01J 20/18. Fritz H., Hoefler H., Hammer J. Adsorbing material comprised of porous functional solid incorporated in a polymer matrix / 2001.

[14] Patent 2939330 Fr. Serge N., Alice M., Patrick A. MPK V01J 20/18. Adsorbant zeolitique a liant organique / 2008.

[15] Patent 1323468 ERV. MPK B01J 20/18. Fritz H., Hoefler H., Hammer J. Adsorbing material comprised of porous functional solid incorporated in a polymer matrix / 2001.

[16] Patent 2939330 Fr. MPK V01J 20/18. Serge N., Alice M., Patrick A. Adsorbant zeolitique a liant organique / 2008.

[17] Patent 7655300 US. MPK V32B5/16. Metz H., Devaux A., Suarez S., Kunzmann A. Transparent zeolite – polymer hybrid material with tunable properties / 2010.

[18] Patent 2390378 RF. IPC B01J 20/32. Dzhanna-neonio R., Veskovi K., Kattaneo L., Longoni D. Absorbing systems containing an active phase embedded in a porous material distributed in a medium with low permeability (Pogloshchaisushchie sistemy, soderzhashchie aktivnuu fazu, vnedrennuu v poristy'i' material, raspredelenny'i' v sredstve s nizko'i' pronitcaemost'iu) / 2010.

[19] Ferapontova L.L., Glad'y'shev N.F., Putin S.B. Adsorbent based on zeolite using ethylene fluoride derivatives as a binder (Adsorbent na osnove tceolita s is-





pol'zovaniem v kachestve svyazuiushchego polimerov ftorproizvodny`kh e`tilena). *Himicheskaiia tekhnologiia*, 2011;12(4):215–222.

[20] Ferapontova L.L., Gladyshev N.F., Putin S.B. Choice of optimal conditions for the preparation of composite sorption-active materials based on zeolite and ethylene fluoride (Vy`bor optimal`ny`kh uslovii` polucheniia kompozitcionny`kh sorbtcionno-aktivny`kh materialov na osnove tceolita i ftorproizvodny`kh e`tilena). *Himicheskaiia tekhnologiia*, 2012;13(1):11–17.

[21] Ferapontova L.L., Ferapontov Yu.A., Putin S.B., Rodaev V.V., Golovin Yu.I. Study of physical-chemical properties of composite sorption-active materials based on zeolite, and polymers of ethylene porpoising (Izuchenie fiziko-himicheskikh svoi`stv kompozitcionny`kh sorbtcionno-aktivny`kh materialov na osnove tceolita i polimerov ftorproizvodny`kh e`tilena). *Zhurnal prikladnoi` himii*, 2012;85(3):470–476.

[22] Patent 2446876 RF no. 2010136355/05. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Ferapontov Yu.A., Ferapontova L.L. Method for producing molded sorbent (Sposob polucheniia formovannogo sorbenta); application 30.08.2010, publ. 10.04.2012, bul. no. 10, 14 p.

[23] Patent 2481154 RF no. 2011139686/05. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Ferapontov Yu.A., Ferapontova L.L. Method for producing flexible composite sorption-active materials (Sposob polucheniia gibkikh kompozitcionny`kh sorbtcionno-aktivny`kh materialov); application 29.09.2011; publ. 10.05.2013, bul. no. 13, 14 p.

[24] Patent 2543167 RF no. 2013102823/05. Ferapontova L.L., Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., et al. Method for producing flexible composite sorption-active materials (Sposob polucheniia gibkikh kompozitcionny`kh sorbtcionno-aktivny`kh materialov); application 22.01.2013, publ. 27.07.2014, bul. no. 21, 14 p.

[25] Posternak N.V., Ferapontov Yu.A., Ferapontova L.L., Akulinin E.I. Composite sorption-active materials based on zeolite and ethylene fluorine derivatives part I. Raw materials, production technology and research methodology for prototypes. *Advanced Materials and Technologies*, 2017;4:29–40.

[26] Posternak N.V., Ferapontov Yu.A., Ferapontova L.L., Akulinin E.I. Composite sorption-active materials based on zeolite and ethylene fluorine derivatives part ii. Preparation of composite sorption-active materials, in-

vestigation of their physicochemical properties and selection of optimal synthesis conditions. *Advanced Materials and Technologies*, 2018;1:58–68.

[27] Patent 2656490 RF no. 2017121491/05. Yarkina L.A., Bulaev N.A., Ferapontov Yu.A., Posternak N.V. A method of obtaining a regenerated absorber of carbon dioxide (Sposob polucheniia regeneriruemogo poglotitel'ia dioksida ugleroda); application 19.06.2017, opubl. 05.06.2018, bul. no. 16, 14 p.

[28] Physico-chemical bases of synthesis and polymer processing (Fiziko-himicheskie osnovy` sinteza i pererabotki polimerov: Mezhevuzovskii` sbornik) / Ed. prof. Yu.D. Semchikov. – Gor`kii`, GGU, 1980, 128 p.

[29] GOST R 50804-95 Habitat of an astronaut in a manned spacecraft (Sreda obitaniya kosmonavta v pilotiruемом kosmicheskom apparate). State Standart of Russia Moscow: IPK Publishing house of standards Publ., 1995.

[30] GOST R ISO 14624-3-2010 Space systems. Safety and compatibility of materials. Part 3. Dermination of waste gases from materials and assembled products (Kosmicheskie sistemy. Bezopasnost' i sovместimost' materialov. Chast' 3. Opredelenie othodyashchih gazov iz materialov i sobrannyh izdelii). Moscow: Standartinform Publ., 2011.

[31] GOST 9293-74 Nitrogen gas and liquid. Technical conditions (Azotgazoobrsznyi i zhidkii. Tekhnicheskie usloviya). Standards publishing house 1974, Moscow: Standartinform Publ., 2007.

[32] GOST R ISO 16000 Indoor air. Part 6. Determonation of volatile organic compounds in the air of closed premises and the test chamber by active-sampling on the sorbent Tepah TA wit subsequent thermal desorpyion and gas chromatographic analysis using MSD/FID (Vozduh zamknutyh pomeshchenii. Chast' 6. Opredelenie letuchih organicheskikh soedinenii v vozduhe zamknutyh pomeshshenii i ispytatel'noi kamery putem aktivnogo otbora prob na sorbent Tepah TA s posleduyushchei termicheskoi desorbciiei i gazohromatograficheskim analizom s ispol'zovaniem MSD/PID).

[33] GOST 9.049-91 Polymer materials and their components. Methods of laboratory tests for resistance to molds (Materialy polimernye i ih komponenty. Metody laboratornyh ispytaniia na stoikost' k vozdeistviyu plesnevnyh gribkov) Accepting authority: State standart USSR, 1976.

Транслитерация по BSI

