

УДК 628.87

## Особенности проектирования энергоэффективных систем регенерации воздуха для герметично изолированных объектов

Д-р техн. наук В. А. ПРОНИН<sup>1</sup>, Е. А. МИНИКАЕВА<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук О. В. ДОЛГОВСКАЯ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>2</sup>kalashnikova.elena.96@mail.ru, <sup>3</sup>ovdolgovskaia@itmo.ru

Университет ИТМО

*В данной статье рассматривается проблема создания энергоэффективной системы регенерации воздуха. Для достижения поставленной цели необходимо решить две основные задачи: получение кислорода с минимальными энергозатратами и поглощение углекислого газа при наименьшем сопротивлении и энергопотреблении технологического модуля, поглощающего углекислый газ. Анализ известных способов получения кислорода показывает, что для решения данной задачи наиболее приемлемым является способ, основанный на химических реакциях. При оценке методов поглощения углекислого газа был выбран абсорбционный метод, т. к. абсорбционные колонны обладают незначительным сопротивлением, следовательно этот метод позволяет минимизировать энергозатраты. Для проверки правильности выбранных концепций и проведения серии натурных испытаний спроектирована принципиальная схема стенда и изготовлен экспериментальный образец. При проектировании стенда было рассчитано и подобрано необходимое оборудование, а также рассмотрены технологические процессы, обеспечивающие заданные параметры. Энергопотребление модуля определяется интегрированием всех компонентов системы регенерации воздуха.*

**Ключевые слова:** регенерация воздуха, генератор кислорода, поглощение диоксида углерода, энергоэффективность, герметичный отсек.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 01.03.2024, одобрена после рецензирования 22.07.2024, принята к печати 30.07.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-11-17

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Пронин В. А., Миникаева Е. А., Долговская О. В. Особенности проектирования энергоэффективных систем регенерации воздуха для герметично изолированных объектов. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 3. С. 11–17. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-11-17

## Designing energy-efficient air regeneration systems for hermetically sealed objects

D. Sc. V. A. PRONIN<sup>1</sup>, E. A. MINIKAEVA<sup>2</sup>, Ph. D. O. V. DOLGOVSKAIA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>maior.pronin@mail.ru, <sup>2</sup>kalashnikova.elena.96@mail.ru, <sup>3</sup>ovdolgovskaia@itmo.ru

ITMO University

*This article discusses the problem of designing an energy-efficient air regeneration system. To achieve this goal, it is necessary to solve two main tasks: obtaining oxygen with minimal energy consumption and absorbing carbon dioxide with the least resistance and energy consumption for the technological module absorbing carbon dioxide. An analysis of known methods for producing oxygen shows that a method based on chemical reactions is the most acceptable for solving this problem. When evaluating the methods of carbon dioxide absorption, the absorption method was chosen due to absorption columns' having low resistance, therefore, this method minimizes energy consumption. To verify the correctness of the selected concepts, it is necessary to design and manufacture an experimental stand and conduct a series of field tests. The schematic diagram of the stand is shown. When designing the stand, the necessary equipment was calculated and selected, as well as technological processes providing the specified parameters were considered. The energy consumption of the module is determined by the integration of all components of the air regeneration system.*

**Keywords:** air regeneration, oxygen generator, carbon dioxide absorption, energy efficiency, sealed compartment.

### Article info:

Received 01/03/2024, approved after reviewing 22/07/2024, accepted 30/07/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-11-17

Article in Russian

**For citation:**

Pronin V. A., Minikaeva E. A., Dolgovskaia O. V. Designing energy-efficient air regeneration systems for hermetically sealed objects. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 3. p. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-11-17

**Введение**

Обеспечение пригодной для дыхания человека атмосферы в замкнутом пространстве безопасным и экономичным способом с высокой надежностью в течение длительного времени является актуальной задачей. Согласно исследованиям [1, 2], один человек потребляет 0,3–1 м<sup>3</sup> кислорода и выделяет около 0,83 м<sup>3</sup> углекислого газа в сутки. С точки зрения логистики не всегда возможно пополнять запас кислорода, а удаление избытка углекислого газа явно требует использования дополнительного оборудования и энергопотребления.

Существуют системы получения кислорода и утилизации углекислого газа, которые не ограничены в запасах энергии [3]–[5], но в целом ряде случаев приходится решать задачу минимизации энергопотребления.

Целью настоящей работы является создание системы регенерации воздуха для замкнутых изолированных объектов при минимальном энергопотреблении. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- сравнительный анализ способов получения кислорода и утилизации углекислого газа в системах регенерации воздуха;
- оценка возможности их применения в условиях герметичного объекта;
- разработка экспериментального стенда;
- проведение натуральных экспериментов;
- определение энергозатрат установки.

**Способы получения O<sub>2</sub> в системах регенерации воздуха**

Количество кислорода, потребляемого человеком, может меняться в зависимости от различных факторов, поэтому необходимо, чтобы система регенерации воздуха обеспечивала подачу кислорода не менее одного кубометра в сутки на человека.

Самым простым источником является чистый кислород, который хранится в специальных баллонах под давлением. Однако, как описано в работах [6, 7], такой способ хранения кислорода является пожароопасным, а также связан с целым рядом технологических сложностей. Довольно распространенным способом получения кислорода является электролиз. Но данный способ требует значительных энергозатрат, около 9 кВт на производство одного куба кислорода, а также значительную площадь для размещения электролизной установки [8]. Самым экологичным является биологический способ получения кислорода [9], однако он требует наличия больших площадей, освещения, воды и постоянного ухода за растениями, что предполагает введения дополнительного обслуживающего персонала [10]. Одним из перспективных способов получения кислорода является извлечение его из химических веществ.

При этом способе протекают различные реакции и физические процессы, которые подробно описаны в статье [11]. Исследованиями установлено, что надпероксиды

натрия и калия могут быть использованы для получения кислорода, однако они являются самыми дорогостоящими веществами. Использование перхлоратов и хлоратов для получения кислорода возможно при высокой температуре процесса и может привести к образованию хлора, который опасен для организма человека. Согласно источнику [12], пероксиды натрия и калия относятся к 3-му классу опасности, а пероксид кальция — к 4-му классу опасности, таким образом последний более предпочтительным для применения в системах регенерации воздуха. Поэтому для дальнейших исследований выбран пероксид кальция.

Пероксид кальция представляет собой порошкообразный материал с высокой термической устойчивостью. Он не вступает в реакцию с сухим углекислым газом, однако начинает разлагаться при взаимодействии с водой. Сохранение пероксида кальция в стеклянных или металлических емкостях с минимальной влажностью необходимо для поддержания его качества [13]. Правильный способ хранения позволяет сохранить это вещество до 7–17 лет с потерей основного вещества менее 0,1% [14].

**Способы поглощения CO<sub>2</sub> в системах регенерации воздуха**

Существует несколько методов очистки воздуха от углекислого газа [15], основные из которых можно разделить на «газ — твердое тело» и «газ — жидкость». Первый метод относится к адсорбционным методам поглощения, второй — к абсорбционным. Адсорбционный метод применяют преимущественно для газообразных сред с небольшим содержанием вредных парообразных или газообразных примесей. У адсорбционных установок есть несколько недостатков: высокое гидравлическое сопротивление, а следовательно, и энергозатраты; малая интенсивность реакторов и высокие затраты на регенерацию адсорбентов. Эти недостатки частично можно устранить путем применения непрерывных методов очистки. Но для их реализации требуются высокопрочные сорбенты промышленного назначения [16]. Метод абсорбционной очистки является избирательным и обратимым, что позволяет использовать его для разделения газовых смесей и получения растворов газов в жидкостях. По данным [17] можно заключить, что наибольшей эффективностью в поглощении диоксида углерода обладает гидроксид лития, а на втором месте — гидроксид натрия. В табл. 1 показаны необходимое количество и затраты на удаление одного кубометра углекислого газа.

Таблица 1

**Материалы для поглощения углекислого газа**

Table 1

**Materials for carbon dioxide absorption**

Материал	руб/кг (на 2023 г.)	Электроэнергия, кВт·ч	Количество материала, кг
Гидроксид лития	1500	5,18	4,6
Гидроксид натрия	100	1,92	7

### Проектирование экспериментального стенда системы регенерации воздуха

Назначение экспериментального стенда состоит в апробации предлагаемых технических и технологических решений при разработке энергоэффективной системы регенерации воздуха.

Проектирование стенда производится из расчета обслуживающего персонала, состоящего из трех человек. Исходные данные для проектирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### Исходные данные для проектирования стенда

Table 2

##### Initial data for designing the stand

Показатель	Обозначение	Значение
Объем помещения, м <sup>3</sup>	$V_n$	35
Температура в помещении, °С	$t_0$	20
Давление воздуха в помещении, кПа	$p_0$	101,3
Относительная влажность в помещении, %	$\varphi_0$	50

Принятые условия и допущения:

- режим работы системы: стационарный, установившийся;
- корпус, блоки и магистрали теплоизолированные;
- изменения парциальных давлений компонентов воздуха не учитываются;
- воздух на выходе из абсорбера и генератора кислорода насыщенный влажный;
- коэффициенты теплопередачи теплообменников не зависят от расходов насосов.

Количество потребляемого кислорода  $m_{O_2}$  на трех человек при средней интенсивности работы определяем согласно табл. 3 [18].

$$m_{O_2} = 0,14 - 0,21 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таблица 3

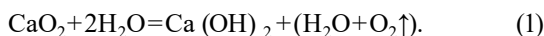
#### Потребление кислорода одного среднестатистического человека в зависимости от различной физической нагрузки

Table 3

##### Oxygen consumption by an average person depending on their physical activity

Вид физической нагрузки	Потребление кислорода, м <sup>3</sup> /ч
Без нагрузки	0,012–0,024
Легкая нагрузка	0,024–0,048
Средняя нагрузка	0,048–0,072
Тяжелый вид нагрузки	0,072–0,174
Максимальный вид нагрузки	Более 0,18

Данное количества кислорода необходимо получить из пероксида кальция. При взаимодействии пероксида кальция и воды происходит образование перекиси водорода, которая является неустойчивой и быстро разлагается на воду и кислород.



Оптимальные условия для прохождения реакции получения кислорода является использование теплой воды (55 °С). Для экономии энергии для нагрева воды будем использовать специальный катализатор. Например, оксид марганца  $MnO_2$  ускоряет реакцию разложения пероксида водорода ( $H_2O_2$ ), но сам при этом не расходуется, его можно использовать многократно [19].

Для расчета количества катализатора используем формулу:

$$G_k = G_{CaO_2} c_k / (M_{CaO_2} A_k), \quad (2)$$

где  $c_k$  — концентрация катализатора,  $M_{CaO_2}$  — молярная масса пероксида кальция,  $A_k$  — коэффициент активности катализатора.

Удельный расход пероксида кальция на килограмм кислорода определим исходя из теоретических расчетов [20].

$$G_{CaO_2} = 4,5 \text{ кг CaO}_2/\text{кг O}_2.$$

Также определяем количество углекислого газа, выделяемое персоналом из трех человек. Внутреннее выделение углекислого газа  $m_{CO_2}$  принимается согласно табл. 4 [21]:

$$m_{CO_2} = 0,59 \text{ кг/ч}.$$

Таблица 4

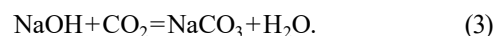
#### Количество углекислого газа, выделяемое одним человеком

Table 4

##### Carbon dioxide released by a person

Уровень нагрузки	Выделение диоксида углерода, м <sup>3</sup> /ч	Выделение диоксида углерода, кг/ч
Без нагрузки	0,013	0,026
Легкая нагрузка	0,02	0,039
Средняя нагрузка	0,1	0,198
Тяжелый вид нагрузки	0,35	0,689
Максимальный вид нагрузки	0,5	0,984

Для поглощения углекислого газа используется щелочной раствор. Реакция связывания диоксида углерода проходит следующим образом:



Удельный расход щелочи составляет:

$$G_{NaOH} = 10,35 \text{ кг NaOH/кг CO}_2.$$

Далее определяем зависимость интенсивности выделения кислорода от расхода смеси реагентов.

Контролируемые параметры:

- объемная концентрация кислорода в газовой смеси (ГВС) до и после прохождения генератора кислорода;
- пропорциональный расход двух реагентов;
- температура смеси реагентов;

Таблица 5

Зависимость объема выделившегося кислорода от объема смеси реагентов

Table 5

Dependency for the volume of the released oxygen on the volume of reagents mixture

№	Объем смеси реагентов, л						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1,49	3,62	5,06	6,58	6,76	9,62	12,41
2	2,01	3,32	4,88	6,47	7,12	9,98	12,59
3	1,89	3,01	5,24	7,03	7,03	10,24	12,87
4	1,74	3,45	4,95	7,42	7,01	10,21	11,98
5	1,88	3,11	5,01	7,54	7,14	10,02	11,98
Среднее	1,8	3,3	5,0	7,0	9,0	9,9	12,3

- концентрация пероксида кальция 5 % [22];
- расход ГВС — 5 л/с.

Результаты испытаний показаны в табл. 5 и на рис. 1.

Способность разбавленной щелочи NaOH поглощать углекислый газ определялась экспериментально, при этом применялись следующие вещества и комплектующие:

- 5 %, 10 %, 15 %, 20 % растворы NaOH;
- вода водопроводная;
- мерные цилиндры объемом 1 л;
- углекислый газ в баллонах;

Таблица 6

Изменение массы щелочи после пропускания CO<sub>2</sub>

Table 6

Changes of alkali mass after CO<sub>2</sub> transmission

Время	NaOH 5 %	NaOH 10 %	NaOH 15 %	NaOH 20 %
0:00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
0:30	4,6%	13,8%	8,5%	2,9%
1:00	5,0%	14,1%	9,0%	4,2%
2:00	5,8%	14,4%	9,3%	5,5%
2:50	5,8%	14,5%	9,3%	10,6%
3:20	5,7%	14,4%	9,3%	11,6%
3:50	5,6%	14,3%	9,3%	11,7%

- шланги и распылители.

Установка для испытаний представляет собой 4 мерных цилиндра объемом один литр каждый. Цилиндры взвешивались, затем в них заливался испытуемый раствор в количестве 0,5 л и производилось повторное взвешивание. Углекислый газ подавался из баллона по шлангам в раствор. На конце шлангов установлены распылители газа для образования мелких пузырьков. Через определенное время пропускания углекислого газа растворы цилиндра снова взвешивались. Опыт продолжал-

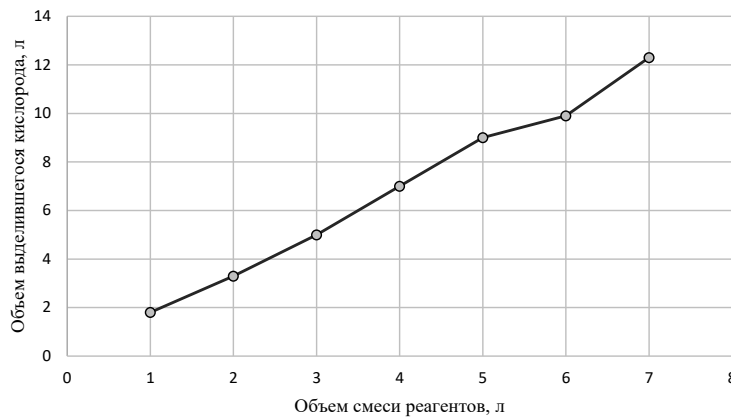


Рис. 1. График зависимости объема выделившегося кислорода от объема смеси реагентов

Fig. 1. Dependency for the volume of the released oxygen on the volume of reagents mixture

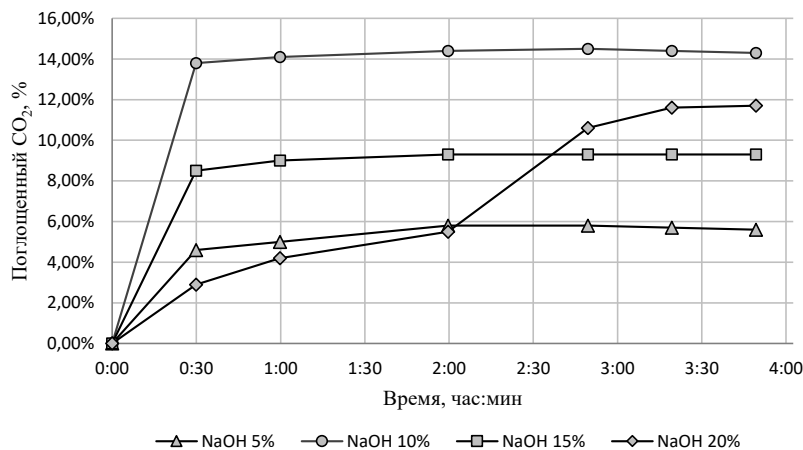


Рис. 2. Графики изменения массы растворов

Fig. 2. Changes of the solutions' mass

ся до установления постоянной массы цилиндров с раствором, т. е. до момента прекращения реагирования углекислого газа с гидроксидом натрия. Результаты эксперимента представлены в табл. 6 и на рис. 2.

Выявлена линейная зависимость объема выделившегося кислорода за период максимальной скорости его выделения от объема смеси реагентов. Удельное выделение кислорода составляет 1,8 л на 1 л 5 %-го раствора пероксида кальция в смеси реагентов. Способность NaOH поглощать CO<sub>2</sub> увеличивается с концентрацией раствора, но скорость поглощения падает. Наиболее быстрое поглощение происходит на концентрациях до 10–15%.

**Принцип работы системы регенерации воздуха**

На основании предварительных экспериментов представленных ранее была окончательно разработана принципиальная схема экспериментальной установки регенерации воздуха, показанная на рис. 3. Обозначения, представленные на схеме: E1 — емкость хранения воды; E2 — емкость хранения пероксида кальция и катализатора; E3 — емкость хранения гидроксида натрия (поглотителя); НЦ1, НЦ2, НЦ3, НЦ4, НЦ5, НЦ6 — центробежный насос; НШ — шнековый насос; НД1 — дозаторный насос; В1 — вентилятор; РР1, РР2 — реактор; РОР1 — резервуар отработанного раствора; Т1 — теплообменник; НК1 — насадочная колонна (абсорбер); ОС1 — осушитель воздуха.

Система регенерации воздуха работает следующим образом: пероксид кальция из емкости (E2) поступает в резервуар (РР1) при помощи шнекового насоса (НШ1). Вода, поступающая из емкости (E1) с помощью центробежного насоса (НЦ1), также поступает в РР1, где реагирует с пероксидом кальция. В РР1 происходит химическая реакция. Полученные продукты реакции попадают в накопительную емкость (РОР1), а затем утилизируются. В генератор кислорода при помощи вентилятора (В1) попадает ГВС. Перед этим из ГВС удаляется избыток

углекислого газа с помощью абсорбера (НК1). Для работы НК1 из E3 концентрированный раствор гидроксида натрия дозаторным насосом (НД1) подается в РР2. Туда же из E1 подается вода. Данный раствор орошается на специальных тарелках насадочного абсорбера НК1. В абсорбере происходит поглощение углекислого газа. Выделяемая воздушно-кислородная смесь из РР1 охлаждается с помощью теплообменника (Т1) для утилизации излишнего тепла. Т1 состоит из двух контуров: воздушно-кислородная смесь — вода, вода — холодная вода. Потоки воды в Т1 подаются с помощью НЦ2 и НЦ3. Далее воздушно-кислородная смесь в случае высокой влажности проходит через осушитель (ОС1). При допустимой влажности этап с осушителем пропускается.

Суммарные энергозатраты электрооборудования стенда регенерации воздуха за время одного цикла в 10 мин рассчитываются по формуле:

$$E = (W_1t + 6W_2t + W_3t + W_4t + 2W_5t + W_6t + W_7t + W_8t + W_9t) / 3600, \tag{4}$$

где E — суммарные энергозатраты электрооборудования генератора, кВт·час; W<sub>1</sub> — мощность вентилятора подачи воздуха в корпус генератора, кВт; W<sub>2</sub> — мощность центробежного насоса подачи жидкости, кВт; W<sub>3</sub> — мощность дозаторного насоса подачи гидроксида натрия, кВт; W<sub>4</sub> — мощность шнекового насоса, кВт; W<sub>5</sub> — мощность мешалки реактора, кВт; W<sub>6</sub> — мощность теплообменника охлаждения воздушно-кислородной смеси, кВт; W<sub>7</sub> — мощность абсорбера, кВт; W<sub>8</sub> — мощность осушителя воздушно-кислородной смеси; W<sub>9</sub> — мощность систем управления устройствами, кВт; t — время работы электрооборудования, с.

Согласно формуле (4) и табл. 7, суммарная мощность электрооборудования на время цикла составляет:

$$E = 0,43 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

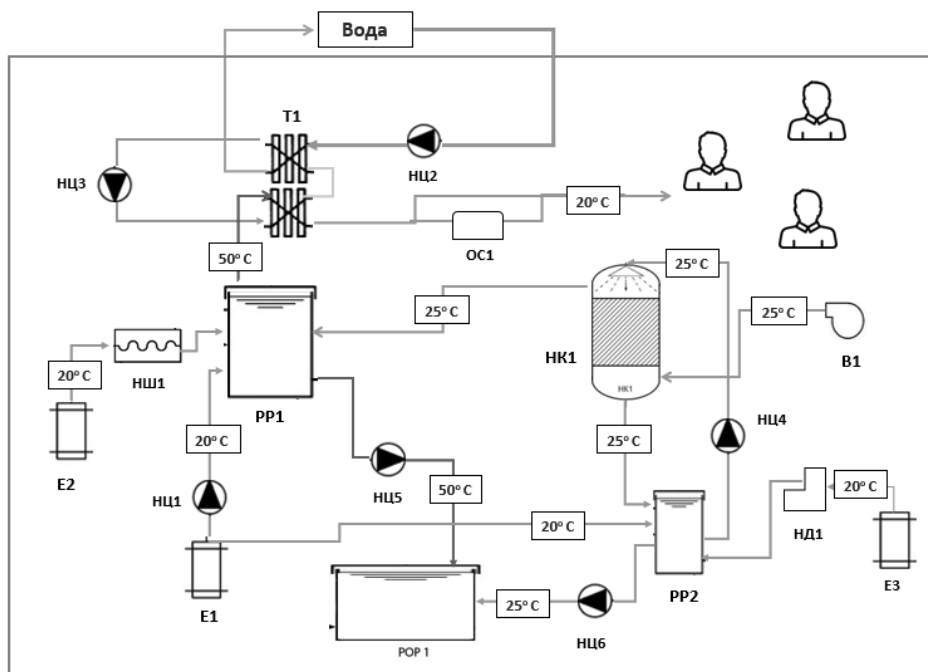


Рис. 3. Схема экспериментальной установки регенерации воздуха  
Fig. 3. Experimental stand for air regeneration

Таблица 7

## Мощность оборудования макета и время его работы

Table 7

## Power of the stand equipment and its operation time

Наименование показателя	Оборудование								
	Вентилятор	Насосы			Т1	ОС	НК1	PP	Система управления
		НЦ	НД	НШ					
Мощность, кВт	0,05	0,06	0,1	0,1	0,6	0,5	0,25	0,25	0,1
Количество	1	6	1	1	1	1	1	2	1

## Заключение

В данной работе был проведен анализ различных методов получения кислорода и поглощения диоксида углерода, а также оценены их преимущества и недостатки. С учетом экологических и экономических аспектов, наиболее предпочтительным способом получения кислорода было выбрано использование пероксида кальция. Для поглощения углекислого газа целесообразно использовать гидроксид натрия или лития.

Выявлена линейная зависимость объема выделившегося кислорода за период максимальной скорости его выделения от объема смеси реагентов. Удельное выделение

кислорода составляет 1,8 л на 1 л 5 %-го раствора пероксида кальция в смеси реагентов. Способность NaOH поглощать CO<sub>2</sub> увеличивается с концентрацией раствора, но скорость поглощения падает. Наиболее быстрое поглощение происходит на концентрациях до 10–15%.

Составлена и описана схема экспериментальной установки системы регенерации воздуха. Было рассчитано необходимое количество исходных веществ для работы экспериментального стенда регенерации воздуха при минимальных энергетических затратах в 0,43 кВт·ч. В дальнейшем будет разработана математическая модель для процессов рассматриваемой системы.

## Литература

1. Гладышев Н. Ф., Гладышева Т. В., Дворецкий С. И. Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов. М.: Спектр, 2016. 204 с.
2. Crockett A. J., Schermer T. R., Eston R. G. Kinanthrometry and exercise physiology. Routledge, 2018. pp. 225–250.
3. Sabatino F., etc. Evaluation of a Direct Air Capture Process Combining Wet Scrubbing and Bipolar Membrane Electrodialysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020.
4. Jelle R., Siegfried D. Development of a novel type activated carbon fiber filter for indoor air purification. // *Chemical Engineering Journal*, 2021. pp. 1–8.
5. Fahrion J., etc. Use of Photobioreactors in Regenerative Life Support Systems for Human Space Exploration // *Front Microbiol*, 2021.
6. Depetro A., Gamble G., Moinuddin K. Fire Safety Risk Analysis of Conventional Submarines // *Applied sciences*, 2021.
7. Anderson M. S., Ewert M. K., Keener J. F. Life Support Baseline Values and Assumptions Document. Report Number NASA/TP-2015–218570/REV1, 2018. p. 219.
8. Ключенкова М. И., Назаров В. И., Попов А. П. Техника и технология поддержания жизни в замкнутом пространстве // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*, 2018. № 6 (52). С. 1255–1263.
9. Fu Y. et al. How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the moon or mars. // *Astrobiology*. 2016. Vol. 16. pp. 925–936.
10. Niederwieser T., Kociolek P., Klaus D. A review of algal research in space // *Acta Astronautica*, 2018. pp. 359–367.
11. Пронин В. А., Калашникова Е. А., Цветков В. А., Кованов А. В., Долговская О. В. Анализ способов получения кислорода для обеспечения жизнедеятельности герметично изолированных объектов // *Вестник Международной академии холода*. 2022. № 3. С. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-13-20
12. Hefei W., Yongsheng Z., Tianyi L., Zhen C., Yinan W., Chuanyu Q. Properties of calcium peroxide for release of hydrogen peroxide

## References

1. Gladyshev N. F., Gladysheva T. V., Dvoretzky S. I. Systems and means of regeneration and air purification of inhabited hermetic objects. Moscow, Spectr, 2016. 204 p. (in Russian)
2. Crockett A. J., Schermer T. R., Eston R. G. Kinanthrometry and exercise physiology. Routledge, 2018. pp. 225–250.
3. Sabatino F., etc. Evaluation of a Direct Air Capture Process Combining Wet Scrubbing and Bipolar Membrane Electrodialysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020.
4. Jelle R., Siegfried D. Development of a novel type activated carbon fiber filter for indoor air purification. *Chemical Engineering Journal*, 2021. pp. 1–8.
5. Fahrion J., etc. Use of Photobioreactors in Regenerative Life Support Systems for Human Space Exploration. *Front Microbiol*, 2021.
6. Depetro A., Gamble G., Moinuddin K. Fire Safety Risk Analysis of Conventional Submarines. *Applied sciences*, 2021.
7. Anderson M. S., Ewert M. K., Keener J. F. Life Support Baseline Values and Assumptions Document. Report Number NASA/TP-2015–218570/REV1, 2018. p. 219.
8. Klyushenkova M. I., Nazarov V. I., Popov A. P. Technique and technology of maintaining life in a confined space. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*, 2018. No. 6 (52). p. 1255–1263. (in Russian)
9. Fu, Y. et al. How to establish a bioregenerative life support system for long-term crewed missions to the moon or mars. *Astrobiology*. 2016. Vol. 16. pp. 925–936.
10. Niederwieser T., Kociolek P., Klaus D. A review of algal research in space. *Acta Astronautica*, 2018. pp. 359–367.
11. Pronin V. A., Kalashnikova E. A., Tsvetkov V. A., Kovanov A. V., Dolgovskaia O. V. Methods for obtaining oxygen for life support in hermetically isolated objects. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 3. p. 13–20. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-13-20 (in Russian)
12. Hefei W., Yongsheng Z., Tianyi L., Zhen C., Yinan W., Chuanyu Q. Properties of calcium peroxide for release of

- and oxygen: A kinetics study // *Chemical Engineering Journal*, 2016.
13. Гладышев Н. Ф., Гладышева Т. В., Лемешева Д. Г. Пероксидные соединения кальция. Синтез. Свойства. Применение. М.: Спектр, 2013. 216 с.
  14. Пероксид кальция [Электронный ресурс] URL: <https://supl.biz/peroksid-kaltsiya-p148819/> (дата обращения 20.12.2023)
  15. Пронин В. А., Прилуцкий А. А., Долговская О. В., Подболотова Т. Е. Исследование эффективности работы скруббера при поглощении углекислого газа // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств»*. 2015. № 4. С. 132–140
  16. Ахметова В. Р., Смирнов О. В. Улавливание и хранение диоксида углерода — проблемы и перспективы // *Башкирский химический журнал*. 2020. Том 27. № 3. С. 103–115
  17. Пронин В. А., Цыганков А. В., Долговская О. В. Математическое моделирование работы абсорбера при поглощении CO<sub>2</sub> в системах регенерации воздуха // *Холодильная техника*. 2020. № 3. С. 44–48.
  18. ГОСТ 24389–89. Системы кондиционирования воздуха, вентиляции и отопления судов. Расчетные параметры воздуха и расчетная температура заборной воды.
  19. Мирошниченко Ю. В., Еникеева Р. А., Кассу Е. М. Характеристика способов получения кислорода медицинского и перспективы их применения в военном здравоохранении // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2016. № 2 (54), С. 157–163.
  20. Дворецкий С. И., Гладышев Н. Ф., Гладышева Т. В., Суворова Ю. А., Плотников М. Ю. Новый подход к регенерации воздуха в герметичных обитаемых объектах // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. 2012. Специальный выпуск (39). С. 159–165.
  21. Пронин В. А., Долговская О. В. К вопросу проектирования макетного образца системы регенерации воздуха для герметично изолированных объектов // *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке (Университет ИТМО, 13–15 ноября 2019 г.)*. СПб., 2019. Т. 1. С. 254–257.
  22. Калашникова Е. А., Пронин В. А. Экспериментальное исследование процесса получения кислорода из пероксида кальция в системах регенерации воздуха // *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды (Волгоградский государственный медицинский университет, 27–30 сентября 2023)*. Волгоград, 2023. С. 244–248.
  - hydrogen peroxide and oxygen: A kinetics study. *Chemical Engineering Journal*, 2016.
  13. Gladyshev N. F., Gladysheva T. V., Lemesheva D. G. Calcium peroxide compounds. Synthesis. Features. Application. Moscow, Spectr, 2013. 216 p. (in Russian)
  14. Calcium peroxide [Electronic resource] URL: <https://supl.biz/peroksid-kaltsiya-p148819/> (accessed 12/20/2023) (in Russian)
  15. Pronin V. A., Prilutsky A. A., Dolgovskaya O. V., Podbolotova T. E. Investigation of scrubber efficiency in carbon dioxide absorption. *Scientific Journal of the National Research University of ITMO. The series «Processes and devices of food production»*. 2015. No. 4. pp. 132–140. (in Russian)
  16. Akhmetova V. R., Smirnov O. V. Carbon dioxide capture and storage — problems and prospects. *Bashkir Chemical Journal*. 2020. Volume 27. No. 3. pp. 103–115. (in Russian)
  17. Pronin V. A., Tsygankov A. V., Dolgovskaya O. V. Mathematical modeling of the absorber operation during CO<sub>2</sub> absorption in air regeneration systems. *Refrigerating equipment*. 2020. No. 3. pp. 44–48. (in Russian)
  18. State standard RF 24389–89. Air conditioning, ventilation and heating systems for ships. Design parameters of air and design temperature of seawater. (in Russian)
  19. Miroshnichenko Yu. V., Enikeeva R. A., Kassu E. M. Characteristics of methods for obtaining medical oxygen and prospects for their use in military healthcare. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2016. No. 2 (54), pp. 157–163. (in Russian)
  20. Dvoretzky S. I., Gladyshev N. F., Gladysheva T. V., Suvorova Yu. A., Plotnikov M. Yu. A new approach to air regeneration in hermetic inhabited objects. *Issues of modern science and practice V. I. Vernadsky University*. 2012. Special issue (39). pp. 159–165. (in Russian)
  21. Pronin V. A., Dolgovskaya O. V. On the issue of designing a mock — up sample of an air regeneration system for hermetically isolated objects. *Low — temperature and food technologies in the XXI century (ITMO University, November 13–15, 2019)* St. Petersburg, 2019. Vol. 1. pp. 254–257. (in Russian)
  22. Kalashnikova E. A., Pronin V. A. Experimental study of the process of obtaining oxygen from calcium peroxide in air regeneration systems. *Quality of indoor air and the environment*. (Volgograd State Medical University, September 27–30, 2023). Volgograd, 2023. pp. 244–248. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Пронин Владимир Александрович

Д. т. н., профессор, ординарный профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, [maior.pronin@mail.ru](mailto:maior.pronin@mail.ru)

#### Миникаева Елена Анатольевна

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, [kalashnikova.elena.96@mail.ru](mailto:kalashnikova.elena.96@mail.ru)

#### Долговская Ольга Владимировна

К. т. н., директор Центра научно-образовательных изданий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, [ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru](mailto:ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru), РИНЦ SPIN-код 9181–9946

### Information about authors

#### Pronin Vladimir A.

D. Sc., Professor, Professor of the Educational center «Energy Efficient engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, [maior.pronin@mail.ru](mailto:maior.pronin@mail.ru)

#### Minikaeva Elena A.

Graduate student of the Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, [kalashnikova.elena.96@mail.ru](mailto:kalashnikova.elena.96@mail.ru)

#### Dolgovskaia Olga V.

Ph. D., Director of the Center for Scientific and Educational Publications of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, [ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru](mailto:ovdolgovskaia@corp.ifmo.ru), РИНЦ SPIN-код 9181–9946

