

Научная статья  
УДК 661.183:546.311-39:697.941  
doi: 10.17223/24135542/39/8

## **Выбор оптимальных условий синтеза продуктов для химической регенерации воздуха в системах жизнеобеспечения человека**

**Иннокентий Викторович Захаров<sup>1</sup>, Владимир Николаевич Грунский<sup>2</sup>,  
Юрий Анатольевич Ферапонтов<sup>3</sup>, Людмила Леонидовна Ферапонтова<sup>4</sup>,  
Микаэл Давидович Гаспарян<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> АО «Технодинамика», Москва, Россия

<sup>2, 5</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва, Россия

<sup>3, 4</sup> АО «Росхимзащита», Тамбов, Россия

<sup>1</sup> inokentyz@yandex.ru

<sup>2</sup> grunskii.v.n@muctr.ru

<sup>3</sup> iuryferapontov@yandex.ru

<sup>4</sup> ferapontova2005@yandex.ru

<sup>5</sup> gasparian.m.d@muctr.ru

**Аннотация.** Для поглощения диоксида углерода и других газообразных продуктов жизнедеятельности человека и генерации необходимого для дыхания кислорода в системах жизнеобеспечения (СЖО) пилотируемых орбитальных комплексов и воздушных судов гражданской авиации применяют регенеративные продукты (РП) на основе перекисных соединений щелочных металлов, предпочтительно надпероксида калия ( $\text{KO}_2$ ). Предложена технология получения РП, заключающаяся в приготовлении щелочного раствора пероксида водорода (тройная система  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ ), его нанесении на матрицу из керамических высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) и последующей дегидратации. Для предотвращения разложения перекисных продуктов тройной системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  был осуществлен поиск веществ, способных выступать в качестве ингибиторов этого процесса, т.е. оказывать стабилизирующий эффект. В качестве стабилизаторов разложения перекисных продуктов предложено использовать сульфат магния, силикат калия и пиррофосфат натрия. Экспериментально показано, что лучшим стабилизатором тройной системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  при контакте с матрицей из ВПЯМ является сульфат магния, оптимальное мольное соотношение при синтезе регенеративного продукта определено в количестве  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{MgSO}_4 \geq 700/1$ . Установлено, что максимальное содержание целевого компонента в продукте синтеза достигается при мольном соотношении  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{KOH}$ , равном  $\sim 1,75$ . Осуществлена оценка влияния температуры на кинетику процесса разложения перекисных продуктов тройной системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  в присутствии матрицы из ВПЯМ. Показано, что при реализации производственного цикла целесообразно поддерживать температуру тройной системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  не выше  $25^\circ\text{C}$ . Разработан технологический процесс синтеза из пероксида водорода и гидроксида калия регенеративного продукта на матрице из ВПЯМ.

**Ключевые слова:** системы жизнеобеспечения, регенерация воздуха, пилотируемые летательные аппараты, керамические высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ), матрицы, надпероксид калия, пероксид водорода, гидроксид калия, стабилизаторы, сульфат магния, дегидратация, оптимальные условия синтеза

**Для цитирования:** Захаров И.В., Грунский В.Н., Ферапонтов Ю.А., Ферапонтова Л.Л., Гаспарян М.Д. Выбор оптимальных условий синтеза продуктов для химической регенерации воздуха в системах жизнеобеспечения человека // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 39. С. 114–125. doi: 10.17223/24135542/39/8

Original article

doi: 10.17223/24135542/39/8

## **Selection of optimal conditions for the synthesis of products for chemical regeneration of air in human life support systems**

**Innokenty V. Zakharov<sup>1</sup>, Vladimir N. Grunsky<sup>2</sup>, Yuri A. Ferapontov<sup>3</sup>,  
Lyudmila L. Ferapontova<sup>4</sup>, Mikael D. Gasparyan<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Corporation “Technodinamika”, Moscow, Russian Federation

<sup>2, 5</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

<sup>3, 4</sup> Corporation “Roshimzachita”, Tambov, Russian Federation

<sup>1</sup> inokentyz@yandex.ru

<sup>2</sup> grunskii.v.n@muctr.ru

<sup>3</sup> iuryferapontov@yandex.ru

<sup>4</sup> ferapontova2005@yandex.ru

<sup>5</sup> gasparian.m.d@muctr.ru

**Abstract.** To absorb carbon dioxide and other gaseous products of human vital activity and generate oxygen necessary for respiration in the life support systems of manned orbital complexes and civil aviation aircraft, regenerative products (RP) based on peroxide compounds of alkaline metals, preferably potassium peroxide ( $\text{KO}_2$ ), are used. A technology for the production of RP is proposed, which consists in the preparation of an alkaline solution of hydrogen peroxide (a triple system of  $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ), its application to a matrix of ceramic highly porous cellular materials (HPCM) and subsequent dehydration. In order to prevent the decomposition of peroxide products of the triple  $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  system, a search was carried out for substances capable of acting as inhibitors of this process, i.e., to have a stabilizing effect. Magnesium sulfate, potassium silicate and sodium pyrophosphate are proposed as stabilizers for the decomposition of peroxide products. It has been experimentally shown that the best stabilizer of the triple  $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  system in contact with the matrix from the HPCM is magnesium sulfate, the optimal molar ratio in the synthesis of the regenerative product is determined in the amount of  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{MgSO}_4 \geq 700/1$ . It is determined that the maximum content of the target component in the synthesis product is achieved with a molar ratio of  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{KOH}$  equal to  $\sim 1.75$ . The influence of temperature on the kinetics of the decomposition process of peroxide products of the triple  $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  system in the presence of a matrix of HPCM was evaluated. It is shown that during the implementation of the production cycle, it is advisable to maintain the temperature of the  $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  triple system no higher than  $25^\circ\text{C}$ . A technological process has been developed for the synthesis of a regenerative product from hydrogen peroxide and potassium hydroxide on a matrix from HPCM.

**Keywords:** life support systems, air regeneration, manned spacecraft, ceramic highly porous cellular materials (HPCM), matrices, potassium peroxide, hydrogen peroxide, potassium hydroxide, stabilizers, magnesium sulfate, de-hydration, optimal synthesis conditions

**For citation:** Zakharov, I.V., Grunsky, V.N., Ferapontov, Yu.A., Ferapontova, L.L., Gasparyan, M.D. Selection of optimal conditions for the synthesis of products for chemical regeneration of air in human life support systems. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 39, 114–125. doi: 10.17223/24135542/39/8

## Введение

При эксплуатации пилотируемых орбитальных комплексов и воздушных судов гражданской авиации за создание дыхательных атмосфер с фиксированным составом газов отвечают системы жизнеобеспечения (СЖО) экипажей и кислородные системы (КС) данных объектов. Для поглощения диоксида углерода и других газообразных продуктов жизнедеятельности человека и генерации необходимого для дыхания кислорода в этих системах применяют регенеративные продукты (РП) на основе перекисных соединений щелочных металлов (как правило, надпероксида калия  $\text{KO}_2$ ) [1–3].

Работа является продолжением исследований по синтезу и изучению свойств РП нового класса, в котором на химически стойкую матрицу из керамических высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) активный слой наносится пропиткой щелочным раствором пероксида водорода с последующей дегидратацией термовакuumной обработкой [4, 5]. Методика нанесения активного слоя состоит из трех стадий. Вначале смешением  $\text{H}_2\text{O}_2$  с твердым КОН готовят щелочной раствор пероксида водорода (тройная система  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ ), который наносят на матрицу и проводят дегидратацию. Из литературы известно, что тройные системы  $\text{Me}(\text{OH})-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  с течением времени изменяют химический состав из-за распада перекисных соединений, что не только приводит к снижению содержания основного вещества в продукте синтеза, но и может инициировать «кислородный пожар», потушить который практически невозможно [4–12]. Распад перекисных продуктов при концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  выше 12 моль/л и pH выше 11 можно разделить на две составляющие: гомогенное разложение, катализируемое присутствующими в системе ионами, и гетерогенное разложение на твердых фазах, контактирующих с системой [7–11]. Поскольку процесс имеет экзотермический характер и протекает по цепному механизму, необходимо или охлаждать систему, или использовать вещества, выступающие стабилизаторами системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  [6, 8, 12, 13]. Под стабильностью различных растворов перекисных соединений понимается их способность сохранять свой активный кислород (уменьшение абсолютного содержания активного  $\text{O}_2 < 0,5$  вес. %) в течение достаточно длительного времени. Известно, что для каждого стабилизатора имеется своя критическая концентрация, до которой он действует эффективно. Большее количество стабилизатора может способствовать разложению перекисных растворов [12] по гомогенному

механизму, а также снижает количество целевого компонента ( $\text{KO}_2$ ) в продукте синтеза [10, 14]. При использовании РП для систем СЖО к стабилизаторам предъявляется ряд достаточно жестких требований: ограничения по токсичности, высокая термическая стабильность, устойчивость к воздействию атомарного кислорода и др. По этой причине в качестве стабилизатора системы  $\text{Me}(\text{OH})\text{--H}_2\text{O}_2\text{--H}_2\text{O}$  лучше всего подходят сульфат магния, силикат калия и пиррофосфат натрия [6, 13], влияние которых на устойчивость системы рассмотрено в данной работе. Также были начаты эксперименты по оценке влияния температуры на скорость распада системы  $\text{KOH--H}_2\text{O}_2\text{--H}_2\text{O}$  при ее контакте с матрицей ВПЯМ с целью определения оптимальных условий технологического процесса.

### **Экспериментальная часть**

В 50%-ный раствор пероксида водорода при постоянном перемешивании до полного растворения добавляли определенное количество стабилизаторов. Полученный раствор помещали в емкость из стекла пирекс, охлаждаемую до постоянной температуры  $20^\circ\text{C}$  [4, 6], при перемешивании медленно добавляли твердый КОН. Для тождественности экспериментов все емкости имели одинаковую геометрическую форму (цилиндр радиусом  $r = 63$  мм). Отношение поверхности контакта жидкой фазы изучаемых систем к их объему на протяжении всех экспериментов было одинаковым. Перед проведением основных экспериментов все емкости пассивировались исследуемым раствором при температуре  $\sim 25^\circ\text{C}$  в течение 24 ч [10, 11]. Затем в изучаемую систему помещали матрицы из ВПЯМ с плотностью пор 30 ppi (количество пор на линейный дюйм) размерами  $50 \times 50 \times 10$  мм в виде вертикального пакета из 4 штук и через определенные промежутки времени методами химического анализа осуществляли контроль состава системы [15].

Матрицы перед началом эксперимента продувались воздухом и выдерживались в 50%-ном растворе пероксида водорода при температуре  $\sim 25^\circ\text{C}$  в течение 24 ч для удаления посторонних частиц и соединений, способных повлиять на корректность получаемых результатов. Для разрабатываемого способа получения РП стабильность системы  $\text{Me}(\text{OH})\text{--H}_2\text{O}_2\text{--H}_2\text{O}$  при контакте с матрицей должна быть не менее 6 ч, что обусловлено временем контакта системы с матрицей на стадиях пропитки и последующей дегидратации. Поэтому для выбора оптимальной концентрации стабилизатора были проведены эксперименты, направленные на изучение зависимости времени стабильности системы от его содержания. Полученные результаты представлены на рис. 1. Установлено, что тройная система  $\text{Me}(\text{OH})\text{--H}_2\text{O}_2\text{--H}_2\text{O}$  при контакте с матрицами находится в стабильном состоянии в течение требуемого времени, если мольное соотношение  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{MgSO}_4 \geq 700/1$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \geq 640/1$  и  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{K}_2\text{SiO}_3 \geq 590/1$ . При этом содержание активного кислорода в изучаемой системе, определенное химическими методами анализа [15], близко к теоретически возможному. Из полученных данных следует, что для стабилизации системы  $\text{KOH--H}_2\text{O}_2\text{--H}_2\text{O}$  в присутствии матрицы

из ВПЯМ  $\text{MgSO}_4$  требуется меньше, чем  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  и  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  на единицу объема исходного  $\text{H}_2\text{O}_2$  при прочих равных условиях. Поэтому использование  $\text{MgSO}_4$  как стабилизатора данного процесса более предпочтительно.

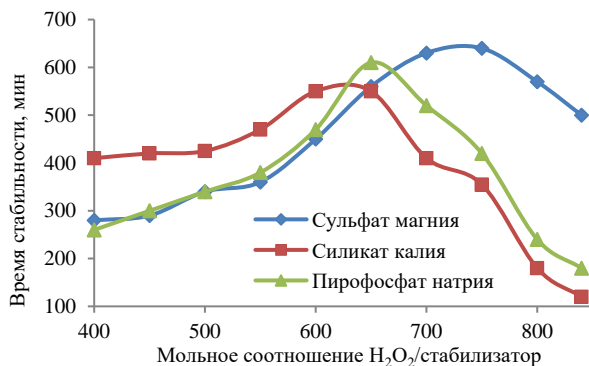
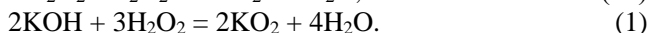
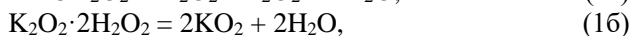
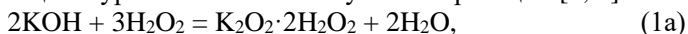


Рис 1. Зависимость времени стабильности тройной системы  $\text{Me(OH)}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  в присутствии различных стабилизаторов

Ранее было установлено [4, 5, 14], что  $\text{MgSO}_4$  в указанных количествах не оказывает влияния на эксплуатационные характеристики конечного РП. Стоит отметить, что присутствие в изучаемой тройной системе матриц из ВПЯМ за счет гетерогенной составляющей разложения перекисных продуктов снижают устойчивость системы примерно на 17% по сравнению с гомогенным распадом [7, 10].

Следующая серия экспериментов была направлена на определение оптимального для синтеза мольного соотношения исходных компонентов  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{KOH}$ . Предложенный способ получения РП на основе надпероксида калия основан на том, что пероксид водорода, являясь слабой кислотой, вступает в обменную реакцию с гидроксидом калия с образованием промежуточного аддукта  $\text{K}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$  (дипероксогидрат пероксида калия), который при нагревании диспропорционирует, образуя  $\text{KO}_2$ . Данный процесс описывается следующими уравнениями консективных реакций [2, 3]:



Следует отметить, что в данном случае имеет место не обычная вакуумная сушка (испарение растворителя и кристаллизация твердого вещества), а процесс, осложненный химической реакцией (диспропорционирование  $\text{K}_2\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}_2$ ) и взаимодействием конечного продукта с водяным паром [2, 4, 5, 16] по уравнению реакции



Для полноты протекания реакции  $\text{H}_2\text{O}_2$  вводится в избытке, так как в процессе взаимодействия с  $\text{KOH}$ , нанесения раствора на матрицу и дегидратации имеет место разложение  $\text{H}_2\text{O}_2$  и его производных. Кроме того, в работе [2] приводится различный состав промежуточных аддуктов (от  $\text{K}_2\text{O}_2 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$

до  $K_2O_2 \cdot 4H_2O_2$ ), т.е. возможны различные маршруты протекания химического процесса и различные стехиометрические коэффициенты основных реакций, описывающих данный процесс. Поэтому было необходимо установить оптимальное мольное соотношение  $H_2O_2/KOH$  для конкретных условий синтеза. Дегидратацию системы проводили при  $90^\circ C$  и остаточном давлении 0,95 атм. Подвод тепла осуществляли посредством ИК-излучения. Количество нанесенного на матрицу сухого целевого продукта определяли гравиметрически, а его состав – химическими методами анализа. Результаты экспериментов представлены на рис. 2. Из приведенных графических данных видно, что максимальное содержание  $KO_2$  в продукте синтеза достигается при мольном соотношении исходных компонентов  $H_2O_2/KOH \approx 1,75$ , а кривая зависимости имеет ярко выраженный экстремум. Это несколько выше, чем ранее полученные авторами [4, 16] результаты (требуется больший избыток  $H_2O_2$ ), что может быть объяснено увеличением гетерогенной составляющей распада перекисных продуктов системы  $KOH-H_2O_2-H_2O$  на матрице ВПЯМ.

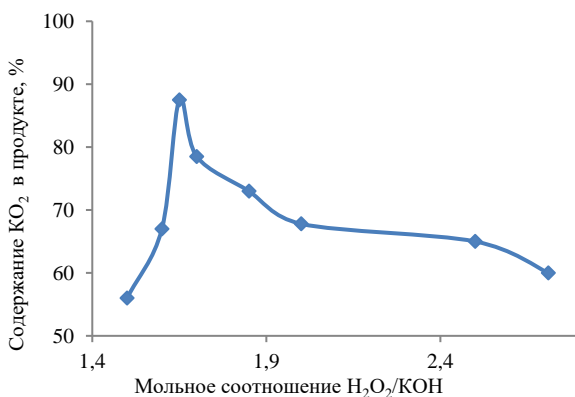


Рис. 2. Зависимость содержания надпероксида калия в продукте синтеза от мольного соотношения исходных компонентов

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в условиях эксперимента получение надпероксида калия из пероксида водорода и гидроксида калия может быть описано уравнениями (1) и (2), т.е. промежуточный продукт имеет состав  $K_2O_2 \cdot 2H_2O_2$ . Некоторый, по сравнению со стехиометрией, избыток пероксида водорода при протекании процесса дегидратации разлагается на воду и кислород. Дальнейшее увеличение содержания  $H_2O_2$  в исходном растворе приводит к снижению  $KO_2$  в конечном продукте, что объясняется увеличением количества воды, присутствующей в зоне реакции и, как следствие, разложением части образовавшегося надпероксида калия [2, 4, 5, 14, 16].

Оценку влияния температуры на скорость разложения перекисных продуктов системе  $KOH-H_2O_2-H_2O$  проводили следующим образом. По описанной выше методике готовили стабилизированный щелочной раствор пероксида

водорода при мольном соотношении  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{MgSO}_4 = 700$  и  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{KOH} = 1,75$ , в который помещали матрицы ВПЯМ. Затем емкости с исследуемым раствором помещали в термостат, обеспечивающий постоянство температуры с точностью до  $0,5^\circ\text{C}$ . Термостат в течение эксперимента находился в темном месте во избежание разложения перекисных продуктов под воздействием света [7, 10]. Через определенные временные интервалы химическими методами анализа фиксировался состав изучаемой системы. Исследования проводили в температурном интервале от  $-15$  до  $+51^\circ\text{C}$ . Кинетические кривые обрабатывали по уравнению мономолекулярной реакции

$$\ln C_0/C = k(\tau - \tau_0), \quad (3)$$

где  $C_0$  и  $C$  – содержание активного кислорода в исследуемом растворе в моменты времени  $\tau_0$  и  $\tau$  соответственно.

В условиях проводимых экспериментов температурная зависимость констант скоростей процесса разложения перекисных продуктов системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  подчиняется уравнению Аррениуса:

$$k = A \cdot e^{-E_{ak}/RT} \quad (4)$$

где  $k$  – константа скорости реакции,  $A$  – множитель Аррениуса для данной реакции, пропорциональный числу столкновения активных молекул,  $E_{ak}$  – кажущаяся энергия активации.

В аррениусовских координатах строили зависимость констант скорости разложения пероксида водорода жидкой фазы изучаемой системы от температуры и по тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс находили энергию активации [17]. Результаты, рассчитанные на основании пяти параллельных опытов, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Кинетические параметры разложения щелочных растворов  $\text{H}_2\text{O}_2$ 

Температура, $^\circ\text{C}$	Интервал измерения, мин	Константа скорости, $k_1 \cdot 10^{-3}$ , $\text{час}^{-1}$	Энергия активации, кДж/моль
-15	60	1,32	39,75
0	60	2,46	
13	45	3,76	
18,2	45	4,23	
32	30	7,67	
51	20	10,24	

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами авторов [10], изучавших кинетику и механизм распада перекисных соединений жидкой фазы системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  в емкостях из различных материалов. Это свидетельствует о гомогенном механизме разложения перекисных продуктов системы  $\text{KOH}-\text{H}_2\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$  под воздействием присутствующих в системе ионов.

На основании проведенных экспериментальных исследований разработан технологический процесс синтеза из пероксида водорода и гидроксида калия регенеративного продукта на матрице (принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 3).

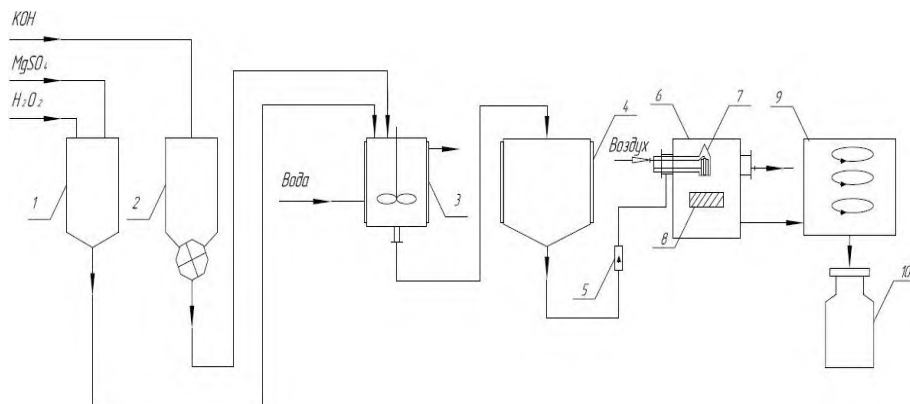


Рис. 3. Технологическая схема производства надпероксида калия:

- 1 – смеситель, 2 – бункер, 3 – реактор, 4 – промежуточная емкость, 5 – насос, 6 – камера для нанесения раствора, 7 – форсунка, 8 – матрица, 9 – вакуум-сушильный шкаф, 10 – контейнер для сбора готового продукта

В смеситель с мешалкой 1 подают водный 50%-ный раствор пероксида водорода. Одновременно туда же дозируют стабилизатор. После полного растворения стабилизатора полученный раствор поступает в реактор из нержавеющей стали 3, снабженный мешалкой, охлаждающей рубашкой и донной сеткой, в котором происходит его охлаждение проточной водой до температуры 10–12°C. Стабилизаторы брали в установленных выше оптимальных мольных соотношениях:  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{MgSO}_4 = 700/1$ ;  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 = 640/1$  и  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{K}_2\text{SiO}_3 = 590/1$ . Затем в реактор из бункера 2 добавляют твердый гидроксид калия в количестве, необходимом для выдерживания заданного мольного соотношения. Скорость подачи гидроксида калия подбирается таким образом, чтобы температура в зоне реакции, контролируемая с помощью термодпары, не превышала 20–25°C во избежание термического разложения перекисных продуктов. После добавления всего гидроксида калия определяется титр полученного раствора на содержание в нем активного кислорода [15]. Полученный таким образом щелочной раствор пероксида водорода сливают в охлаждаемую промежуточную емкость 4, где он хранится при температуре, не превышающей 25°C. Из емкости 4 полученный раствор перистальтическим насосом 5 подают в пневматическую форсунку 7 и наносят на матрицу из ВПЯМ с плотностью пор 30 ppi (количество пор на линейный дюйм). Далее матрица 8, пропитанная щелочным раствором пероксида водорода, помещается в вакуум – сушильный шкаф 9, где при 90°C и остаточном давлении 0,95 атм проводится дегидратация. Целевой продукт собирается в герметичном контейнере 10. Для дальнейших экспериментов по оценке перспективности использования регенеративных продуктов в системах СЖО и КС пилотируемых летательных аппаратов были при различных условиях синтезированы экспериментальные образцы. В табл. 2 приведены данные по основным параметрам синтеза и физико-химическим показателям полученных регенеративных продуктов для СЖО и КС.



Таблица 2

## Физико-химические показатели регенеративных продуктов

№ п/п	Матрица $\rho_{\text{каж}}, \text{г/см}^3$	Мольное соотношение $\text{H}_2\text{O}_2/\text{KOH}$	Стабилизатор	Масса пластины, г	Масса пластины с регенеративным продуктом, %	Содержание активного кислорода в РП, %
1	0,463	1,55	$\text{MgSO}_4$	68,04	106,12	16,5
2	0,378	1,60	$\text{MgSO}_4$	67,48	110,67	19,3
3	0,427	1,65	$\text{MgSO}_4$	66,34	109,45	20,2
4	0,437	1,75	$\text{MgSO}_4$	64,87	113,28	20,8
5	0,392	2,00	$\text{MgSO}_4$	65,25	110,62	17,2
6	0,437	1,75	$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$	65,12	107,73	17,1
7	0,428	1,75	$\text{K}_2\text{SiO}_3$	66,56	98,84	16,1

Как видно из представленных в табл. 2 данных, нам удалось повысить количество нанесенного РП на матрицу с 52 вес. % [4] до 67 вес. % при содержании активного кислорода в продукте до 20,8 вес. %. Обращает на себя внимание факт, что введение в тройную систему  $\text{KOH-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$  в качестве стабилизатора  $\text{K}_2\text{SiO}_3$  не только не дает преимуществ по времени стабильности системы, но и приводит к уменьшению нанесенного регенеративного продукта на матрицу по сравнению с использованием в качестве стабилизаторов  $\text{MgSO}_4$  и  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  при прочих равных условиях проведения эксперимента. Возможно, это обусловлено существенным изменением физико-химических свойств (вязкость и поверхностное натяжение), определяющих диаметр капель при форсуночном распыле жидкости, что играет доминирующую роль при формировании частиц  $\text{KO}_2$  предложенным способом и о чем мы сообщали ранее [3].

## Выводы

1. Проведенные эксперименты позволили оптимизировать технологию синтеза регенеративных продуктов на основе надпероксида калия, нанесенного на матрицу из керамических высокопористых ячеистых материалов. Анализ совокупности полученных результатов позволяет утверждать, что в качестве стабилизатора тройной системы  $\text{KOH-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$  при синтезе регенеративного продукта на керамической матрице целесообразно использовать сульфат магния при мольном соотношении  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{MgSO}_4 \geq 700/1$ .

2. Установлено оптимальное мольное соотношение при синтезе регенеративного продукта на керамической блочно-ячеистой матрице  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{KOH}$ , равное  $\sim 1,75$ .

3. Осуществлена оценка влияния температуры на кинетику процесса разложения перекисных продуктов тройной системы  $\text{KOH-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$  в присутствии матрицы из ВПЯМ. Показано, что в условиях проводимых экспериментов изучаемая система стабильна в течение 6 ч.

4. На основании экспериментальных исследований разработан технологический процесс синтеза из пероксида водорода и гидроксида калия регенеративного продукта на матрице из ВПЯМ.

**Список источников**

1. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева в первом десятилетии XXI века. М. : РКК «Энергия», 2011. 832 с.
2. Вольнов И.И. Перекисные соединения щелочных металлов. М. : Наука, 1980. 161 с.
3. Захаров И.В., Ферапонтова Л.Л., Ферапонтов Ю.А., Путин С.Б. Системы жизнеобеспечения пилотируемых космических кораблей и судов гражданской авиации, методика оценки дисперсного состава перекисных соединений щелочных металлов // Альтернативная энергетика и экология. 2021. № 25-27 (382-384). С. 147–159.
4. Грунский В.Н., Гаспарян М.Д., Захаров И.В., Ферапонтов Ю.А. и др. Продукты для химической регенерации воздуха в системах жизнеобеспечения человека на основе керамических высокопористых блочно-ячеистых материалов // Огнеупоры и техническая керамика. 2021. № 3-4. С. 14–19.
5. Пат. 2765943 РФ. МПК C04B 38/00. Способ получения керамических высокопористых блочно-ячеистых регенеративных материалов / Ферапонтов Ю.А., Захаров И.В., Грунский В.Н., Гаспарян М.Д. Заявл. 17.11.2021; опубл. 07.02.2022; бюл. № 4. 9 с.
6. Ферапонтов Ю.А., Жданов Д.В., Ульянова М.А. и др. К вопросу о выборе стабилизатора взаимодействия щелочи и пероксида водорода при синтезе супероксида калия // Журнал прикладной химии. 2003. Т. 76, вып. 11. С. 1909–1910.
7. Ферапонтов Ю.А., Ульянова М.А., Жданов Д.В. Влияние материала реактора на стабильность щелочного раствора пероксида водорода // Химическая технология. 2005. № 1. С. 15–18.
8. Химия и технология перекиси водорода / под ред. Г.А. Серышева. Л. : Химия, 1984. 200 с.
9. Макаров С.З., Добрынина Т.А. Изучение систем с концентрированной перекисью водорода. Сообщение 9. Тройная система  $\text{LiOH-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ . // Известия АН СССР. Отделение химических наук. 1955. № 3. С. 411–414.
10. Ферапонтов Ю.А., Ульянова М.А., Сажнева Т.В. Кинетика и механизм распада перекисных соединений жидкой фазы системы  $\text{KOH-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$  в емкостях из различных материалов // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82, вып. 5. С. 772–777.
11. Ferapontov Yu.A., Ulyanova M.A., Sazhneva T.V. Parameters of  $\text{Li}_2\text{O}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$  Crystallization from the  $\text{LiOH-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$  Ternary System // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2008. Vol. 53 (10). P. 1635–1640.
12. Шамб У., Сеттерфилд Ч., Вентворс Р. Перекись водорода. М. : Иностр. лит., 1958. 578 с.
13. Пат. 2500613 РФ. МПК C01B 15/37. Способ стабилизации щелочного раствора пероксида водорода / Ферапонтова Л.Л., Ферапонтов Ю.А., Путин С.Б. Заявл. 27.06.2013; опубл. 10.12.2013; бюл. № 34.
14. Пат. 2810279 РФ. МПК C01B 38/00. Способ получения продукта для химической регенерации воздуха в системах жизнеобеспечения пилотируемых летательных аппаратов / Ферапонтов Ю.А., Захаров И.В., Гаспарян М.Д., Грунский В.Н., Заявл. 15.02.2022; опубл. 25.12.2023; бюл. № 4. 9 с.
15. Seyb E., Kleinberg J. Determination of superoxid oxygen // J. Am. Chem. Soc. 1951. Vol. 73. Art. 2308.
16. Ферапонтов Ю.А., Ульянова М.А., Путин С.Б. и др. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратное оформление. М. : Машиностроение-1, 2007. 156 с.
17. Эммануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М. : Высш. школа, 1962. 414 с.

**References**

1. *Raketno-kosmicheskaya korporatsiya «Energiya» imeni S.P. Koroleva v pervom desyatiletii XXI veka* [Rocket and space corporation «Energiya» named after S.P. Korolev in the first decade of the 21st century]. M.: RKK «Energiya», 2011. 832 p.

2. Volnov I.I. *Perekisnye soedineniya shchelochnykh metallov* [Peroxide compounds of alkali metals]. M.: Nauka, 1980. 161 p.
3. Zakharov I.V., Ferapontova L.L., Ferapontov Yu.A., Putin S.B. Sistemy zhizneobespecheniya pilotiruemykh kosmicheskikh korablei i sudov grazhdanskoi aviatsii, metodika otsenki dispersnogo sostava perekisnykh soedinenii shchelochnykh metallov [Life support systems of manned spacecraft and civil aviation vessels, methodology for assessing the dispersed composition of alkali metal peroxide compounds]. *Alternative energetics and ecology*. 2021. No. 25–27 (382–384). P. 147–159.
4. Grunskii V.N., Gasparyan M.D., Zakharov I.V., Ferapontov Yu.A., et al. Produkty dlya khimicheskoi regeneratsii vozdukh v sistemakh zhizneobespecheniya cheloveka na osnove keramicheskikh vysokoporistykh blochno-yacheistyykh materialov [Products for chemical air regeneration in human life support systems based on ceramic highly porous block-cellular materials]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2021. No. 3–4. P. 14–19.
5. Ferapontov Yu.A., Zakharov I.V., Grunskii V.N., Gasparyan M.D. *Sposob polucheniya keramicheskikh vysokoporistykh blochno-yacheistyykh regenerativnykh materialov* [Method for producing ceramic highly porous block-cellular regenerative materials]. Patent RU 2765943, published 07.02.2022, Bulletin No. 4.
6. Ferapontov Yu.A., Zhdanov D.V., Ulyanova M.A., et al. K voprosu o vybere stabilizatora vzaimodeistviya shchelochi i peroksid a vodoroda pri sinteze superoksid a kaliya [On the choice of stabilizer for alkali-hydrogen peroxide interaction during potassium superoxide synthesis]. *ZhPKh*. 2003. Vol. 76, Issue 11. P. 1909–1910.
7. Ferapontov Yu.A., Ulyanova M.A., Zhdanov D.V. Vliyanie materiala reaktor a na stabilnost shchelochnogo rastvora peroksid a vodoroda [Influence of reactor material on stability of alkaline hydrogen peroxide solution]. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2005. No. 1. P. 15–18.
8. *Khimiya i tekhnologiya perekisi vodoroda* [Chemistry and technology of hydrogen peroxide] / Ed. by G.A. Seryshev. L.: Khimiya, 1984. 200 p.
9. Makarov S.Z., Dobrynina T.A. Izuchenie sistem s koncentrirovannoi perekisyu vodoroda. Soobshchenie 9. Troinaya sistema  $\text{LiOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  [Study of systems with concentrated hydrogen peroxide. Communication 9. Ternary system  $\text{LiOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ]. *Izv. AN SSSR. OKhN*. 1955. No. 3. P. 411.
10. Ferapontov Yu.A., Ulyanova M.A., Sazhneva T.V. Kinetika i mekhanizm raspada perekisnykh soedinenii zhidkoi fazy sistemy  $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  v emkostyakh iz razlichnykh materialov [Kinetics and mechanism of decomposition of peroxide compounds of liquid phase of  $\text{KOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  system in containers made of various materials]. *ZhPKh*. 2009. Vol. 82, Issue 5. P. 772–777.
11. Ferapontov Yu.A., Ulyanova M.A., Sazhneva T.V. Parameters of  $\text{Li}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  crystallization from the  $\text{LiOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$  ternary system [Параметры кристаллизации  $\text{Li}_2\text{O}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  из тройной системы  $\text{LiOH} - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ]. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2008. Vol. 53. No. 10. P. 1635–1640.
12. Shamb U., Setterfield Ch., Ventworth R. *Perekis vodoroda* [Hydrogen peroxide]. M.: IL, 1958. 578 p.
13. Patent 2500613 RF. MPK C01B 15/37. *Sposob stabilizatsii shchelochnogo rastvora peroksid a vodoroda* [Method for stabilizing alkaline hydrogen peroxide solution] / Ferapontova L.L., Ferapontov Yu.A., Putin S.B. Appl. 27.06.2013; Publ. 10.12.2013; Bull. No. 34.
14. Patent 2810279 RF. MPK C01B 38/00. *Sposob polucheniya produkta dlya khimicheskoi regeneratsii vozdukh v sistemakh zhizneobespecheniya pilotiruemykh letatelnykh apparatov* [Method for producing a product for chemical air regeneration in life support systems of manned aircraft]. / Ferapontov Yu.A., Zakharov I.V., Gasparyan M.D., Grunskii V.N. Appl. 15.02.2022; Publ. 25.12.2023; Bull. No. 4. 9 p. with ill.
15. Seyb E., Kleinberg J. Determination of superoxide oxygen [Определение супероксида кислорода]. *J. Am. Chem. Soc.* 1951. Vol. 73. P. 2308.

16. Ferapontov Yu.A., Ulyanova M.A., Putin S.B. et al. *Regenerativnye produkty novogo pokoleniya: tekhnologiya i apparaturnoe oformlenie* [Regenerative products of new generation: technology and equipment design]. M.: Mashinostroenie-1, 2007. 156 p.
17. Emmanuel N.M., Knorre D.G. *Kurs khimicheskoi kinetiki* [Course of chemical kinetics]. M.: Vysshaya shkola, 1962. 414 p.

**Сведения об авторах:**

**Захаров Иннокентий Викторович** – начальник отдела систем жизнеобеспечения АО «Технодинамика» (Москва, Россия). E-mail: inokentyz@yandex.ru

**Грунский Владимир Николаевич** – доктор технических наук, заведующий кафедрой общей химической технологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (Москва, Россия). E-mail: grunskii.v.n@muctr.ru

**Ферапонтов Юрий Анатольевич** – кандидат технических наук, начальник отдела химии и новых химических технологий АО «Росхимзащита» (Тамбов, Россия). E-mail: iuryferapontov@yandex.ru

**Ферапонтова Людмила Леонидовна** – кандидат технических наук, начальник сектора лаборатории новых химических продуктов и технологий химической регенерации воздуха (Лаборатория № 1) отдела химии и новых химических технологий АО «Росхимзащита» (Тамбов, Россия). E-mail: ferapontova2005@yandex.ru

**Гаспарян Микаэл Давидович** – доктор технических наук, профессор кафедры общей химической технологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (Москва, Россия). E-mail: grunskii.v.n@muctr.ru gasparian.m.d@muctr.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about the authors:**

**Zakharov Innokenty V.** – Head of the Life Support Systems Department of Technodinamika JSC (Moscow, Russian Federation). E-mail: inokentyz@yandex.ru

**Grunsky Vladimir N.** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of General Chemical Technology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Moscow, Russian Federation). E-mail: grunskii.v.n@muctr.ru

**Ferapontov Yuri A.** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Chemistry and New Chemical Technologies of JSC “Roshchimzashita” (Tambov, Russian Federation). E-mail: iuryferapontov@yandex.ru

**Ferapontova Lyudmila L.** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of New Chemical Products and Technologies of Chemical Air Regeneration (Laboratory No. 1) of the Department of Chemistry and New Chemical Technologies of JSC “Roshchimzashchita” (Tambov, Russian Federation). E-mail: ferapontova2005@yandex.ru

**Gasparyan Mikael D.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of General Chemical Technology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Moscow, Russian Federation). E-mail: gasparian.m.d@muctr.ru

**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

*Статья поступила в редакцию 30.04.2025; принята к публикации 07.11.2025*

*The article was submitted 30.04.2025; accepted for publication 07.11.2025*