

УДК 614.8.084

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНЫХ
ОБИТАЕМЫХ ОБЪЕКТАХ

С. И. Дворецкий¹, М. Ю. Плотников¹,
Н. Ф. Гладышев², Т. В. Гладышева²

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); Научно-образовательный центр ТГТУ –
ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (2); topt@topt.tstu.ru*

Ключевые слова и фразы: блок химической регенерации воздуха; газодыхательная смесь; герметичный обитаемый объект; диоксид углерода; кинетика; кислород; надпероксид калия; процесс регенерации воздуха; регенеративный продукт; хемосорбция.

Аннотация: Рассмотрены кинетика хемосорбции надпероксидом калия диоксида углерода и выделение химически связанного кислорода в присутствии паров воды. Экспериментальное исследование проведено при различных значениях температуры и влажности газодыхательной смеси, площади поверхности регенеративного продукта и нагрузки на хемосорбционный реактор в герметичном обитаемом объекте. Определено практическое значение максимальной сорбционной емкости регенеративного продукта по диоксиду углерода. Предложена конструкция устройства химической регенерации воздуха, предназначенного для создания благоприятной атмосферы в герметичном обитаемом объекте при создаваемой нагрузке на блок химической регенерации воздуха (четыре человека), соответствующей поглощению 100 дм³/ч диоксида углерода и выделению 112 дм³/ч кислорода в течение пяти часов.

Введение

Регенерация воздуха в герметичных обитаемых объектах представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий хемосорбцию надпероксидом калия диоксида углерода, выделяемого при дыхании людей, и поддержание концентрации кислорода в газодыхательной смеси (ГДС) на комфортном для дыхания человека уровне (не менее 19 об. % по кислороду и не более 1 % по диоксиду углерода). Регенерация воздуха осуществляется в системах жизнеобеспечения, представляющих собой единый компактный комплекс, в котором реализуются одновременно процессы удаления диоксида углерода и выделение кислорода в герметичных обитаемых объектах с саморегулированием химического состава регенерируемого воздуха без использования средств автоматизации [1].

Постановка задачи исследования

Целью проводимого экспериментального исследования процесса химической регенерации воздуха является исследование кинетики хемосорбции надпероксидом калия диоксида углерода и выделения кислорода в присутствии паров воды,

а также разработка конструкции устройства, предназначенного для создания благоприятной атмосферы в герметичном обитаемом объекте в течение пяти часов из расчета присутствия в объекте четырех человек и свободного объема 6 м^3 , приходящегося на одного человека. При этом создаваемая нагрузка на устройство – блок химической регенерации воздуха – соответствует поглощению $100 \text{ дм}^3/\text{ч}$ диоксида углерода и выделению $112 \text{ дм}^3/\text{ч}$ кислорода.

В ОАО «Корпорация «Росхимзащита» разработана технология получения регенеративного продукта различной геометрической формы (РПК-П ТУ 2123-232-05807954–2008) с максимально развитой поверхностью и регулируемым содержанием активного кислорода (рис. 1) [2]. Регенеративный продукт, получаемый по этой технологии, представляет собой нанокристаллический надпероксид калия, закрепленный на волокнах и поверхности пор волокнистой и инертной к щелочному раствору пероксида водорода матрицы. Новая технология обеспечивает возможность получения не только чистого надпероксида калия на матрице, но и различных модификаций составов на его основе. В состав регенеративного продукта РПК-П входят: KO_2 – 63 вес. %, KOH – 25,2 вес. %, K_2CO_3 – 1,8 вес. %, остальное – пористая стекловолокнистая матрица. Величина кажущейся плотности регенеративного продукта на пористой матрице равна $(565 \pm 77,8) \text{ кг}/\text{м}^3$.

Содержание активного кислорода в регенеративном продукте РПК-П в пересчете на чистый порошок надпероксида калия составляет ≈ 32 %. Содержание надпероксида калия в регенеративном продукте на стекловолокнистой матрице можно регулировать в широких пределах степенью пропитки пористой матрицы исходным щелочным раствором пероксида водорода, что дает возможность получать материал для регенерации воздуха с заданной сорбционной емкостью.

Методика и техника эксперимента

В целях исследования кинетики хемосорбции разработан хемосорбционный реактор специальной конструкции – блок химической регенерации воздуха (БХРВ) (рис. 2). Конструкция БХРВ представляет собой патрон, выполненный из фторопластовой пленки Ф-4МБ 1 и разделенный посредством сварного шва П-образной формы на два рукава. Внутри каждого рукава с помощью элементов крепления, соединенных с оболочкой патрона, установлены силовые ленты 2, которые выполнены из фторопластовой пленки Ф-4МБ и разделены поперечными сварными швами на ячейки, где установлены пластины регенеративного продукта (РПК-П) 3, предназначенные для регенерации поступающей в оболочку газодыхательной смеси (ГДС). В разрезе А-А показано расположение регенеративных пластин, – в данном случае применяется брикет из пластин по две штуки, кроме нижней ячейки, где располагается три пластины. Толщина каждой пластины в среднем равна 3 мм, таким образом брикеты имеют толщину 6 и 9 мм.

Блок химической регенерации воздуха работает в режиме принудительной вентиляции, в качестве побудителя расхода ГДС через патрон используется вентилятор с электроприводом, подключаемый к БХРВ с помощью стыковочного узла 4. Разработанная конструкция БХРВ предназначена для создания и поддержания объемной доли кислорода в пределах 19...23 % и объемной доли диоксида углерода не более 1 % в герметичных обитаемых объектах при температуре $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $(85 \pm 10) \%$.



Рис. 1. Пластина регенеративного продукта РПК-П

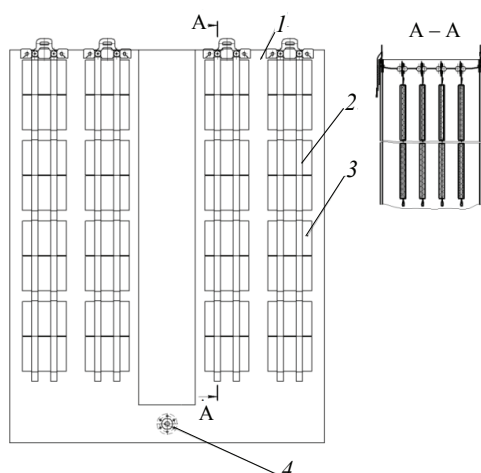


Рис. 2. Конструкция БХРВ с регенеративным продуктом РПК-П:
 1 – фторопластовая пленка Ф-4МБ; 2 – силовая лента; 3 – пластина регенеративная;
 4 – узел стыковочный

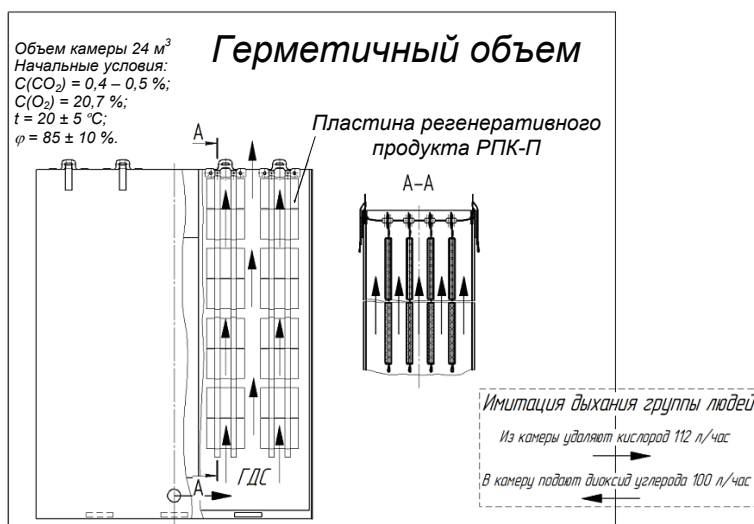


Рис. 3. Схема проведения экспериментальных исследований

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3.

Исследования кинетики хемосорбции надпероксидом калия диоксида водорода и выделения кислорода проводили на экспериментальном стенде «Рубин» при различных значениях температуры и влажности ГДС, площади поверхности регенеративного продукта в хемосорбционном реакторе, скорости подачи и отбора диоксида углерода и кислорода в объем и из объема герметичной камеры, имитирующей дыхание группы людей, находящихся в герметично замкнутом объеме. Расход ГДС через реактор устанавливался равным 20 м³/ч.

Массу регенеративного продукта в хемосорбционном реакторе рассчитывали исходя из потребности людей в обеспечении ГДС в течение пяти часов, при этом величина массы составляла 2,8...3,8 кг. Расчет проводился с учетом 100 % выделения химически связанного кислорода при полной отработке надпероксида калия в регенеративном продукте.

Экспериментальное исследование кинетики хемосорбции надпероксидом калия диоксида водорода и выделения кислорода проводили для двух конструкций реакторов, отличающихся числом регенеративных пластин в каждой гирлянде хемосорбционного реактора.

В первом варианте в каждой ячейке гирлянды размещалось по три пластины (опыты № 1 – 4), во втором варианте (опыты № 5 – 8) – по две. Общее число гирлянд для первого варианта составило 12, для второго – 16 шт.

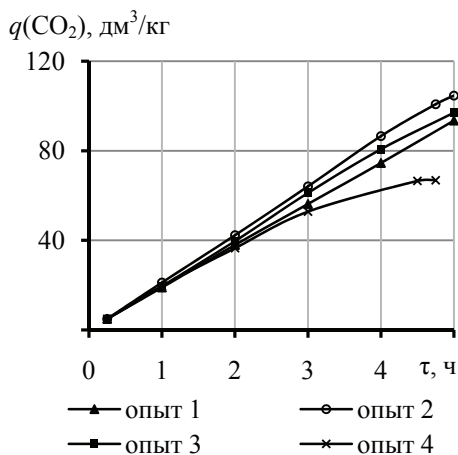
В таблице приведены условия, при которых проводили экспериментальные исследования кинетики хемосорбции.

Кинетические кривые поглощения диоксида углерода и выделения кислорода регенеративным продуктом от времени представлены на рис. 4 и 5.

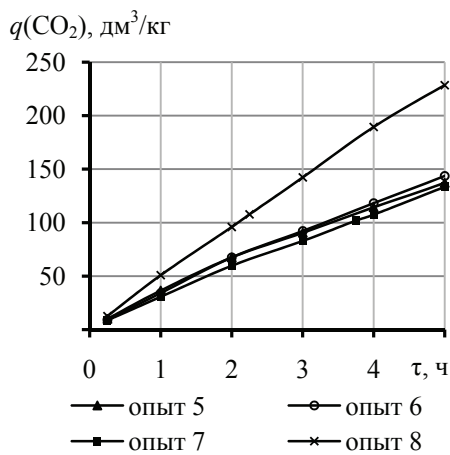
Опыты № 1 – 4 проводились в широком диапазоне изменения температуры и влажности ГДС в герметичной камере. Анализ кинетических кривых поглощения диоксида углерода и выделения кислорода показывает, что скорости поглощения и выделения практически не зависят от времени. Избыточное содержание влаги в ГДС в опыте № 4 отрицательно влияет на скорость процесса регенерации,

Условия проведения экспериментов

№ опыта	Средняя температура ГДС, °С	Среднее значение влажности ГДС, %	Расход CO ₂ , дм ³ /ч	Расход отбора O ₂ , дм ³ /ч	Площадь поверхности регенеративного продукта, м ²	Масса регенеративного продукта, кг
1	5,4	81,9	100	112	3	3,62
2	20,0	85,0				3,59
3	21,2	80,0				3,65
4	39,7	64,0				3,63
5	14,3	82,7	200	224	4	2,99
6	20,6	85,8				3,18
7	23,2	81,0				3,22
8	19,9	88,0				3,22



а)



б)

Рис. 4. Изменение удельного количества поглощенного CO₂ от времени для конструкций реакторов, состоящих из трех (а) и двух (б) пластин

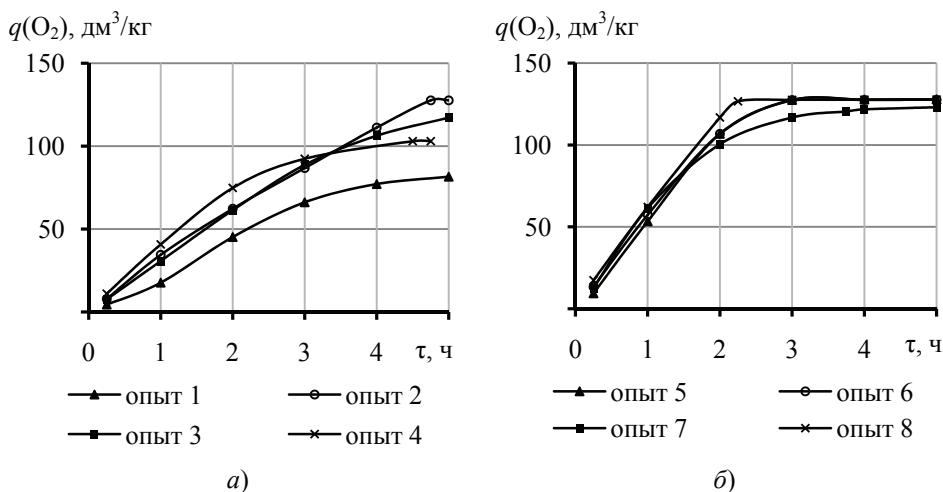


Рис. 5. Зависимость удельного количества выделившегося кислорода от времени для конструкций реакторов, состоящих из трех (а) и двух (б) пластин

чем при более низком ее значении в опыте № 1 (что отражает наклон кинетических кривых). Кинетическая зависимость удельного количества поглощенного диоксида углерода в опыте № 1 близка к зависимостям, полученным в опытах № 2 и 3 с более высокой температурой и влажностью. При этом следует констатировать увеличение скорости поглощения диоксида углерода при увеличении площади поверхности регенеративного продукта, непосредственно контактирующей с ГДС. Средняя величина сорбционной емкости для опытов № 1, 3 равна $90 \text{ dm}^3/\text{kg}$ (см. рис. 4, а), для опытов № 5 – 7 – $137 \text{ dm}^3/\text{kg}$ (см. рис. 4, б). В опыте № 8 при увеличении нагрузки в два раза значение сорбционной емкости регенеративного продукта составило $228 \text{ dm}^3/\text{kg}$.

Увеличение сорбционной емкости при повышении нагрузки свидетельствует о том, что процесс поглощения диоксида углерода лимитируется процессом внешнего массообмена.

На рисунке 5, а представлены зависимости удельного количества выделившегося кислорода для первого варианта конструкции хемосорбционного реактора (опыты № 1 – 4). Процесс выделения кислорода для первого варианта наблюдается в течение пяти часов проведения эксперимента. При этом среднее значение объема выделившегося кислорода для опытов № 1, 2 составило $122 \text{ dm}^3/\text{kg}$, что несколько ниже содержания химически связанного кислорода в регенеративном продукте ($127 \text{ dm}^3/\text{kg}$). Анализ кинетических кривых показывает, что на скорость процесса выделения кислорода в значительной мере влияет влажность и температура ГДС. В опыте № 1 с минимальным влагосодержанием ГДС общий объем выделенного кислорода несколько ниже, чем в опытах № 2 – 4.

Во втором варианте конструкции хемосорбционного реактора выделение кислорода прекращается после трех часов работы. Формы кинетических зависимостей, полученных в опытах № 5 – 8 (рис. 5, б), практически не отличаются. Можно выделить стадию с постоянной скоростью выделения кислорода (первые два часа). При этом объем выделенного кислорода равен содержанию химически связанного кислорода в исходном регенеративном продукте, что говорит о 100 % выделении химически связанного кислорода при полной отработке регенеративного продукта. Эксперимент № 8 проводился при увеличенной нагрузке (до восьми человек) на БХРВ.

Таким образом, оба варианта конструкций хемосорбционного реактора могут обеспечить практически полное использование ресурса регенеративного продукта (кинетические кривые на рис. 5 для опытов № 2, 3, 5 – 8).

Учитывая равномерность выделения кислорода в течение пяти часов, наиболее предпочтителен первый вариант конструкции БХРВ (кинетические кривые на рис. 5 для опытов № 2, 3). Однако при низких ≈ 5 °С и высоких ≈ 40 °С температурах сорбционная емкость регенеративного продукта в среднем на 13,5 % ниже по сравнению со вторым вариантом конструкции БХРВ.

Во втором варианте конструкции БХРВ для всех опытов наблюдается практически 100 % выделение химически связанного кислорода в первые два часа работы хемосорбционного реактора (кинетические кривые на рис. 5, б). При этом скорость выделения кислорода во втором варианте значительно превышает потребность в обеспечении кислородом укрываемых людей в герметичном объекте в первые два часа работы БХРВ. При этом избыточно выделенный кислород покрывает потребности укрываемых людей в обеспечении кислородом в последующие три часа, что также свидетельствует о возможности использования второго варианта конструкции БХРВ для практической реализации.

Второй вариант конструкции БХРВ характеризуется более интенсивным процессом поглощения диоксида углерода, что выражается в более высоких значениях сорбционной емкости регенеративного продукта в соответствующие периоды времени.

Список литературы

1. Новый подход к регенерации воздуха в герметичных обитаемых объектах / С. И. Дворецкий [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики*. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2012. – Спец. вып. (39). – С. 159 – 165.

2. Разработка нанокристаллического материала для регенерации воздуха и изделий на основе этого материала / Н. Ф. Гладышев [и др.] // *Журн. Рос. хим. о-ва им. Д. И. Менделеева*. – 2012. – Т. LVI, № 5-6. – С. 130 – 136.

Experimental Research into the Process of Air Regeneration in Pressure-Tight Inhabited Objects

S. I. Dvoretzkiy¹, M. Yu. Plotnikov¹, N. F. Gladyshev², T. V. Gladysheva²

Department "Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries", Tambov State Technical University (1); Scientific educational centre TSTU – JSC "Corporation "Roskhimzashchita" (2); topt@topt.tstu.ru

Key words and phrases: block of air chemical regeneration; carbon dioxide; chemisorptions; kinetics; oxygen; pressure-tight inhabited object; process of air regeneration; product; regenerative potassium superoxide; respiratory mix.

Abstract: The kinetics of chemisorption by potassium superoxide for carbon dioxide and chemically bound oxygen excretion in the presence of water vapor is investigated. The experimental research was made under various values of temperature and humidity of a respiratory mix, area of surface of the regenerative product and loading on reactor in pressure-tight inhabited object. The practical value of the maximum sorption capacity of the regenerative product on carbon dioxide is defined. A design of the device of chemical air regeneration designed to create a favorable atmosphere in the sealed inhabited object under load on the block of chemical regeneration of air (4 people), fitting the absorbance of 100 dm³/h of carbon dioxide and release of 112 dm³/h of oxygen for 5 hours, has been developed.

References

1. Dvoretzkii S.I., Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Suvorova Yu.A., Plotnikov M.Yu. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo*, 2012, Special issue (39), pp. 159-165.

2. Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Putin S.B., Dorokhov R.V., Simanenkov E.I., Plotnikov M.Yu., Rodaev V.V. *Zhurnal Rossiiskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*, 2012, vol. LVI, no. 5-6, pp. 130-136.

Experimentale Forschung des Prozesses der Regeneration der Luft in den dichten gewohnten Objekten

Zusammenfassung: Es ist die Kinetik der Chemiesorbtion vom Hyperoxid des Kaliums des Kohlenstoffdioxides und der Absonderung des chemisch verbundenen Sauerstoffes in der Anwesenheit der Wasserdämpfe untersucht. Die experimentale Forschungen wurden bei den verschiedenen Bedeutungen der Temperatur und der Feuchtigkeit der Gasatmungsmischung, der Fläche der Oberfläche des regenerativen Produktes und der Belastung auf den Chemiesorbtionsreaktor im dichten gewohnten Objekt durchgeführt. Es ist die praktische Bedeutung des maximalen Sorptionsvolumens des regenerativen Produktes nach dem Kohlenstoffdioxid bestimmt. Es ist die Konstruktion der Struktur der chemischen Regeneration der Luft angeboten, die für die Bildung der günstigen Atmosphäre im dichten gewohnten Objekt bei der geschaffenen Belastung auf den Block der chemischen Regeneration der Luft vorbestimmt ist (4 Menschen), die der Absorption vom 100 dm³/S des Kohlenstoffdioxides und der Absonderung von 112 dm³/S des Sauerstoffes im Laufe von 5 Stunden entspricht.

Etude expérimentale du processus de la régénération de l'air dans les objets habités étanches

Résumé: Est étudiée la cinétique de la chimisorption par superoxyde potassium de dioxyde l'hydrogène et du dégagement de l'oxygène lié chimiquement en présence des vapeurs de l'eau. L'étude expérimentale a été réalisée lors de différentes valeurs de la température et de l'humidité du mélange gaz-respiration, de la surface de la superficie du produit régénéré et de la charge sur le réacteur de la chimisorption dans un objet habité étanche. Est défini la valeur pratique de la capacité maximale de sorption du produit régénéré par le dioxyde l'hydrogène. Est proposée la construction de l'installation de la régénération chimique de l'air destinée à la création de l'atmosphère favorable dans un objet habité étanche.

Авторы: *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», и. о. ректора ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Плотников Михаил Юрьевич* – аспирант кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Гладышев Николай Федорович* – кандидат химических наук, заместитель начальника отдела химии и новых химических технологий; *Гладышева Тамара Викторовна* – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-образовательный центр ТГТУ – ОАО «Корпорация «Росхимзащита».

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и технологическая безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».