Технологии, методы и средства защиты

УДК 66.074.3; 519.633.2

DOI: 10.25514/CHS.2018.2.14117

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РЕАКТОРА ХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНО ОБИТАЕМОМ ОБЪЕКТЕ

Е. И. Акулинин¹*, М. Ю. Плотников², Д. С. Дворецкий¹, С. И. Дворецкий¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия, *e-mail: akulinin-2006@yandex.ru

²Открытое акционерное общество «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов, Россия

Поступила в редакцию 09.10.2018 г.

Аннотация – Разработана конструкция хемосорбционного реактора с регенеративным продуктом из нанокристаллического надпероксида калия, закрепленного на волокнах и поверхности пор волокнистой матрицы и предназначенного для создания благоприятной атмосферы в герметичном обитаемом объекте в течение заданного времени из расчета присутствия в объекте 4-х человек и свободного объема 6 м³, приходящегося на одного человека. При этом создаваемая нагрузка на реактор соответствует поглощению 100 дм³/ч диоксида углерода и выделению 112 дм³/ч кислорода. С использованием математической модели процесса химической регенерации воздуха разработан алгоритм расчета гарантированных значений конструктивных параметров хемосорбционного реактора и времени защитного действия хемосорбента, в течение которого при заданной нагрузке на реактор в герметичном обитаемом объекте обеспечивается содержание кислорода и диоксида углерода в газодыхательной смеси на комфортном для дыхания человека уровне независимо от нашего незнания (в определенных пределах) части исходных данных для расчета.

Ключевые слова: химическая регенерация воздуха, герметичный обитаемый объект, хемосорбционный реактор, регенеративный продукт, время защитного действия, методика технологического расчета.

ALGORITHM FOR COMPUTING AIR REGENERATION CHEMICAL REACTOR OPERATING IN AIRTIGHT HABITABLE FACILITIES

E. I. Akulinin¹*, M. Yu. Plotnikov², D. S. Dvoretsky¹, and S. I. Dvoretsky¹

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russia, *e-mail: akulinin-2006@yandex.ru ²OAO Korporatsiya Roskhimzashchita, Tambov, Russia

Received October 09, 2018

Abstract – A chemisorption air regeneration reactor design was developed for the reactor operating on the basis of nanocrystalline potassium superoxide fixed on the fibers and pore surface of a fibrous polymer matrix. The reactor was designed for providing favorable atmosphere in a sealed habitable volume within a specified time span calculated considering the presence of 4 people with an available free volume of 6 m³ per person. The resulting calculated load value for the reactor corresponded to the absorption of 100 dm³/h of carbon dioxide and the release of 112 dm³/h of oxygen. A mathematical model simulating the process of chemical air regeneration was used for creating an algorithm for calculate both the guaranteed values of the chemisorption reactor design parameters and the protective effect time. The algorithm allows to calculate the oxygen and carbon dioxide content in the gas-breathing mixture which provides a comfortable level for human breathing in a sealed habitable volume at a given reactor load value, regardless of our partial unawareness (within certain limits) of the input data for computations.

Keywords: chemical air regeneration, airtight habitable facilities, chemisorption reactor, regenerative product, protective effect time, technological computing procedure.

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) при температуре (20 ± 5)°С и относительной влажности воздуха (85 ± 10)%.

Регенерация воздуха осуществляется в системах жизнеобеспечения, представляющих собой единый компактный комплекс, в котором реализуются одновременно процессы удаления диоксида углерода и выделения кислорода в герметичных обитаемых объектах с саморегулированием химического состава регенерируемого воздуха без использования средств автоматизации.

Средства химической регенерации воздуха предназначены для восстановления состава воздуха по кислороду и диоксиду углерода в системах жизнеобеспечения герметичных замкнутых объектов.

Основной задачей при разработке системы химической регенерации воздуха для средств дыхания коллективного типа является поддержание в замкнутом помещении требуемых концентраций кислорода O₂ и углекислого газа CO₂. решается путем конструирования хемосорбционных реакторов Задача специальной конструкции оптимальных условий И создания работы регенеративного продукта, обеспечивающих его эффективное использование. При этом более полная отработка регенеративного продукта достигается за счет улучшения взаимодействия условий регенерируемого воздуха с регенеративным продуктом.

За последнее десятилетие в России была создана технология синтеза надпероксида калия путем нанесения щелочного раствора пероксида водорода на индиферентную пористую матрицу из стекловолокна с последующей сушкой пропитанного материала [1, 2]. Достигнутые результаты положили начало новому направлению в технологии создания регенеративных продуктов и систем регенерации воздуха: материал, содержащий в своих порах нанокристаллы KO₂, не пылит, легко поддается обработке в виде зерна, блоков, пластин и т.д. Регенеративный продукт, полученный таким способом, имеет максимально развернутую поверхность, легко доступную к взаимодействию с парами воды и CO₂. Такая структура продукта обеспечивает полное выделение активного кислорода из всего объема продукта и, благодаря высокой газопроницаемости, практически не наблюдается «оплывания» продуктов карбонизации.

Хемосорбционный реактор для регенерации воздуха в герметичных обитаемых объектах содержит патрон с регенеративным продуктом в виде пластин, которые изготовлены из высокопористой стекловолокнистой матрицы с осажденными нанокристаллами КО₂ [3]. Блок химической регенерации воздуха работает в режиме принудительной вентиляции, в качестве побудителя расхода газодыхательной смеси через патрон с регенеративным продуктом используется вентилятор с электроприводом, подключаемый к

хемосорбционному реактору с помощью стыковочного узла. При включении вентилятора полость газовоздушная смесь проходит В специально организованных рукавов с пластинами регенеративного продукта, где происходит поглощение СО₂ и выделение кислорода. Регенерированный воздух выходит из реактора в помещение. Степень отработки регенеративного продукта возможно контролировать визуально - по изменению окраски пластин (от желтого до белого цвета), либо с помощью газоанализатора. При снижении объемной доли кислорода в помещении или при превышении объемной доли СО₂ производят замену отработанных пластин хемосорбента на новые.

В наших работах [4, 5] приводятся результаты экспериментального исследования кинетики хемосорбции надпероксидом калия CO₂ в присутствии паров воды и математическая модель процесса химической регенерации воздуха, которая может быть использована для расчета гарантированных значений конструктивных параметров реактора и времени защитного действия (отработки) хемосорбента, в течение которого при заданной нагрузке на реактор в герметичном обитаемом объекте обеспечивается требуемое содержание кислорода и диоксида углерода в газодыхательной смеси.

Уравнения математической модели включают дифференциальные уравнения в частных производных покомпонентного материального баланса углекислого газа, кислорода, влаги и распространения тепла в газодыхательной смеси и хемосорбенте по высоте пластин, а также дифференциальные уравнения 3-х ячеечной модели гидродинамики для герметичного обитаемого объекта [5].

Целью настоящей работы является разработка методики расчета конструктивных параметров хемосорбционного реактора (объема реактора, размера и числа пластин регенеративного продукта), обеспечивающих регенерацию воздуха и жизнедеятельность 4 человек в герметичном обитаемом объекте в течение 5 часов, и практических рекомендаций по созданию новых конструкций хемосорбционных реакторов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При регенерации воздуха протекает несколько совмещенных процессов: *в* герметичном обитаемом объекте – выделение углекислого газа, тепла и потребление кислорода воздуха людьми в результате их жизнедеятельности; *в* хемосорбционном реакторе - 1) процессы диффузии молекул CO₂ и H₂O из потока газодыхательной смеси к кристаллам KO₂, осажденным на волокнах высокопористой матрицы; 2) химическое взаимодействие углекислого газа и воды с надпероксидом калия и выделение кислорода в соответствии с химическими реакциями [5]:

 $2KO_2 + H_2O = 2KOH + 3/2O_2 + h_1 = 39$ кДж/моль, (1)

2KOH + CO₂ = K₂CO₃ + H₂O + h_2 = 141 кДж/моль; (2)

3) диффузия молекул кислорода из рабочего слоя хемосорбента в поток газодыхательной смеси.

Взаимодействие диоксида углерода и воды с надпероксидом калия представляет собой топохимическую реакцию, которая осуществляется на

твердой поверхности хемосорбента с участием твердого вещества (кристаллов KO_2 , газов (CO_2 , O_2), и жидкости (H_2O , KOH). Специфика топохимических реакций в ряду других гетерогенных процессов обусловлена тем, что поверхность раздела фаз возникает в результате самой реакции и изменяется во времени. Кинетика химических реакций (1) и (2) с приемлемой для практики точностью описывается уравнениями второго порядка

$$W_{1} = k_{01} \exp(-E_{1} / RT_{x}) a_{\text{KO}_{2}} c_{\text{H}_{2}\text{O}},$$
$$W_{2} = k_{02} \exp(-E_{2} / RT_{x}) c_{\text{CO}_{2}} a_{\text{KOH}},$$

где $a_{\text{KO}_2}, c_{\text{H}_2\text{O}}, a_{\text{KOH}}, c_{\text{CO}_2}$ – концентрации KO₂, H₂O, CO₂, KOH, соответственно.

 k_{01}, k_{02}, E_1, E_2 коэффициенты Кинетические химических реакций определялись экспериментально-аналитическим методом с использованием математической модели кинетики по экспериментальным данным, полученным при исследовании кинетики хемосорбции надпероксидом калия диоксида углерода и выделения кислорода на экспериментальном стенде «Рубин». Эксперименты проводились при различных значениях температуры Т и влажности ϕ газодыхательной смеси (опыт 1: $T = 5,4^{\circ}$ C, $\phi = 81,9\%$; опыт 2: $T = 20,0^{\circ}$ C, $\phi = 85,0\%$; onmit 3: $T = 21,2^{\circ}$ C, $\phi = 80,0\%$; onmit 4: $T = 39,7^{\circ}$ C, $\phi = 64,0\%$), в герметичном замкнутом объеме. Кинетические кривые поглощения СО₂ и получения О₂ представлены на рис. 1.





Параметры уравнений кинетики процесса химической регенерации воздуха в герметичном обитаемом объекте определялись путем решения регуляризованной задачи параметрической идентификации с использованием экспериментальных кинетических кривых, полученных в проточном реакторе с хемосорбентом в виде прямоугольных пластин при различной скорости газовоздушного потока в реакторе [4].

Максимальное рассогласование экспериментальных и расчетных данных не превышает 15%, что позволяет с приемлемой для практики точностью использовать математическую модель для проектирования хемосорбционного

реактора с оптимальными ресурсами хемосорбента, обеспечивающими в герметичном объекте заданное время защитного действия.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РЕАКТОРА ХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА

Задача расчета конструктивных размеров реактора и гарантированного значения времени его защитного действия формулируется следующим образом. При заданных значениях нагрузки (количества укрываемых людей в герметичном объекте) и времени защитного действия $t_{\rm pr}^{\rm 3дн}$ требуется определить геометрические размеры рабочего слоя пластины хемосорбента (ширина *b*, высота *l*, толщина γ) и их количество *N*, при которых концентрации кислорода и диоксида углерода в герметичном объекте будут удовлетворять неравенствам $c_{\rm O_2}(t_{\rm pr}) \ge 19$ об. %, $c_{\rm CO_2}(t_{\rm pr}) \le 1$ об. %.

При расчете конструктивных параметров реактора и времени защитного необходимо лействия хемосорбента учитывать, что кинетические коэффициенты химических реакций (предэкспоненциальные множители k_{01}, k_{02} и энергии активации E_1, E_2), удельная теплоемкость и плотность хемосорбента, коэффициент теплоотдачи от хемосорбента к потоку газодыхательной смеси в реакторе могут быть известны с недостаточно высокой точностью и задаваться в лучшем случае интервалами, которым принадлежат истинные (точные) значения этих коэффициентов. Будем называть такие коэффициенты неопределенными параметрами и обозначать их $\Xi = [\xi_i : \xi_i^L \le \xi_i \le \xi_i^U] - oбласть$ неопределенных ξ∈Ξ, где вектор через параметров, задаваемых интервалами их возможных (включая истинные) значений. В этом случае возникает новая и более сложная задача определения гарантированного времени защитного действия t_{pr} , в течение которого концентрации кислорода и диоксида углерода в герметичном объекте будут удовлетворять неравенствам

$$19 - c_{0}(N, b, l, \gamma, \xi) \le 0, c_{0}(N, b, l, \gamma, \xi) - 1 \le 0$$
(3)

независимо от незнания истинных значений неопределенных параметров $\xi \in \Xi$, находящихся в области Ξ . Математическая постановка этой задачи имеет вид:

$$t_{\rm pr}(\hat{\xi}) = \min_{\xi \in \Xi} \min_{N, b, l, \gamma, t_{\rm pr}(\xi)} (t_{\rm pr} - t_{\rm pr}^{\rm _{3 \rm { AH}}})^2$$
(4)

при наличии уравнений математической модели [5] процесса химической регенерации воздуха и ограничениях (3).

При фиксированном значении $\xi \in \Xi$ задача (4) является задачей нелинейного программирования, для решения которой может быть использован высокоэффективный метод последовательного квадратичного программирования. Покажем алгоритм решения задачи (3), (4).

На первом шаге задаем начальные номера итераций, например, $\lambda = 0$, $\nu = 1$, начальное значение количества пластин $N^{(0)}$ хемосорбента и максимально возможное их число λ_{3ad} , совокупность так называемых «критических» точек

 $S^{0} = \{\xi^{j} : \xi^{j} \in \Xi, l \in J^{0}\}$ и начальные приближения конструктивных параметров $b^{(0)}, l^{(0)}, \gamma^{(0)}$.

На втором шаге находим решение вспомогательной задачи для критических точек из множества S^0 методом последовательного квадратичного программирования и определяем значения $t_{pr}^{(\nu)}(\hat{\xi}) = \min_{\xi^j \in S^0} \min_{N,b,l,\gamma,t_{pr}(\xi)} (t_{pr} - t_{pr}^{_{3dH}})^2$ и вектора конструктивных параметров $b^{(\nu)}, t^{(\nu)}, \gamma^{(\nu)}$.

Далее на третьем шаге решаем две экстремальные задачи: $\max_{\xi \in \Xi} (19 - c_{O_2}(N^{(\lambda)}, b^{(\nu)}, l^{(\nu)}, \gamma^{(\nu)}, \xi))$ и $\max_{\xi \in \Xi} (c_{CO_2}(N^{(\lambda)}, b^{(\nu)}, l^{(\nu)}, \gamma^{(\nu)}, \xi) - 1)$ и определяем вектор $\xi^{(\nu)}$, доставляющий максимум записанным в скобках функциям.

На четвертом шаге образуем новое множество критических точек: $R^{(v)} = \{\xi^{(v)}: 19 - c_{O_2}(N^{(\lambda)}, b^{(v)}, l^{(v)}, \gamma^{(v)}, \xi^{(v)}) > 0, c_{CO_2}(N^{(\lambda)}, b^{(v)}, l^{(v)}, \gamma^{(v)}, \xi^{(v)}) - 1 > 0\}.$ Если это множество пустое, то решение задачи получено, т.е. $N^* = N^{(\lambda)}, b^* = b^{(v)}, l^* = l^{(v)}, \gamma^* = \gamma^{(v)},$ и в случае исчерпания заданного количества пластин ($\lambda \ge \lambda_{3ad}$) алгоритм заканчивает свою работу, иначе переходим к следующему шагу.

На пятом шаге формируем новое множество критических точек $S^{(v)} = S^{(v-1)} \bigcup R^{(v)}$ и, полагая $v \coloneqq v + 1$, переходим к шагу 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Целью технологического расчета является определение для выбранных типов аппаратурного оформления хемосорбционного реактора и хемосорбента значений конструктивных параметров (размеров пластины хемосорбента, количества пластин) и расхода исходной газовоздушной смеси на входе в реактор, при которых достигается заданное время защитного действия $t_{\rm pr}^{33H}$.

Вначале формулируются исходные данные и разрабатывается техническое задание на проектирование хемосорбционного реактора регенерации воздуха (блок 1 на рис. 2). Задаются структура хемосорбционного реактора, размеры пластин хемосорбента, расстояние между пластинами и их количество, расход исходной газовоздушной смеси на входе в реактор.

В блоке 2 осуществляется выбор структуры хемосорбционного реактора и аппаратурно-технологического оформления процесса химической регенерации воздуха множества U. Множество U вариантов аппаратурно-ИЗ технологического оформления включает следующие возможные варианты оформления установок: 1) с естественной конвекцией; 2) с принудительными режимами вентиляции; 3) с последовательным, параллельным, комбинированным размещением регенеративных патронов; 4) с автономным неавтономным энергоснабжением; 5) модульного или монолитного или исполнения [6, 7].

204

Порядок технологического расчета хемосорбционного реактора регенерации воздуха в герметичном обитаемом объекте представлен на рис. 2.



Рис. 2. Схема алгоритма технологического расчета хемосорбционного реактора регенерации воздуха.

В блоке 1 формулируются исходные данные и разрабатывается техническое задание на проектирование хемосорбционного реактора регенерации воздуха. При задании величины дыхательной нагрузки человека *g* в блоке 1 целесообразно ориентироваться на режим дыхания при волнении или легкой нагрузке [8].

В блоке 2 осуществляется выбор структуры хемосорбционного реактора и аппаратурно-технологического оформления процесса химической регенерации U. Множество воздуха ИЗ множества U вариантов аппаратурнооформления следующие технологического включает возможные типы

аппаратурно – технологического оформления установок: 1) с естественной принудительными режимами вентиляции; конвекцией; с 3) 2) с параллельным, комбинированным размещением последовательным, регенеративных патронов; 4) автономным с или неавтономным энергоснабжением; 5) модульного или монолитного исполнения [8, 9].

В блоке 3 осуществляется выбор типа хемосорбента *r* из множества *R*. Множество *R* включает следующие типы: надпероксид калия, надпероксид натрия и формы хемосорбентов на основе: дисков с перфорацией, пластин и листовых материалов, гранул и таблеток; пористых блоков [6, 7].

В блоке 4 решается задача оптимизации (3), (4) для выбранных типов аппаратурно-технологического оформления $s^{(\nu)} \in S$ и адсорбента $r \in R$. В результате решения задачи оптимизации определяются оптимальные значения $(N^{(\nu)}, b^{(\nu)}, l^{(\nu)}, \gamma^{(\nu)})$ хемосорбционного реактора.

В блоке 5 осуществляется проверка выполнения требований технического задания для выбранного типа аппаратурно-технологического оформления $u^{(v)}$. В случае, если требования технического задания выполняются, осуществляется переход к блоку 7, в противном случае – к блоку 6.

В блоке 7 проверяется выполнение условия: «Рассматривается начальный вариант АО, т.е. v = 0?». Если «Да», то переходим к блоку 9, в противном случае – к блоку 8.

В блоке 8 выбирается новый вариант аппаратурного оформления $u^{(v+1)}$ и вновь решается задача оптимизации (3), (4) в блоке 4.

В блоке 6 осуществляется проверка выполнения условия: «Множество типов адсорбентов *R* исчерпано?». Если «Да», то переходим к блоку 10, в противном случае – к блоку 3.

В блоке 9 осуществляется сравнение альтернативных вариантов аппаратурного оформления **u** по величинам расхода исходной газовоздушной смеси G и расстоянию между пластинами d. В качестве оптимального варианта u^* хемосорбционного реактора выбирается тот, где сочетание G и d минимально.

В блоке 10 осуществляется проверка выполнения условия: «Множество *R* альтернативных вариантов исчерпано?». Если «Да», то переходим к блоку 11, в противном случае – к блоку 8.

В блоке 11 осуществляется проверка выполнения условия: «Хотя бы один вариант аппаратурного оформления удовлетворяет требованиям ТЗ, т.е. $(v \ge 1)$?». Если «Да», то переходим к блоку 15, в противном случае – к блоку 12.

Поскольку не было получено ни одного варианта аппаратурнотехнологического оформления, удовлетворяющего требованиям ТЗ, то в блоке 12 осуществляется проверка выполнения условия: «Коррекция ТЗ возможна?». Если «Да», то в блоке 13 осуществляется изменение ТЗ и осуществляется переход к блоку 2, в противном случае – к блоку 14.

В блоке 15 осуществляется конструктивная разработка аппаратурного оформления хемосорбционного реактора.

В блоке 16 конструктивная разработка оптимального варианта хемосорбционного реактора рекомендуется к опытно-промышленной реализации и разрабатывается проектная документация на его изготовление.

Следует отметить, что на рис. 1 приведен общий алгоритм проектирования хемосорбционных реакторов. При использовании данного алгоритма требуется разработка математических моделей, описывающих различные формы адсорбентов и регенеративных патронов и соответствующие им варианты технологического оформления. Часто, основе аппаратурно на предварительных исследований или по условиям технического задания известен тип используемого хемосорбционного реактора, а также тип и форма хемосорбента. В таком случае технологический расчет существенно упрощается за счет исключения блоков 6, 12, 13 (рис. 2).

Проиллюстрируем приведенный на рис. 2 алгоритм на примере технологического расчета хемосорбционного реактора регенерации воздуха, предназначенного для защиты людей, находящихся в герметичном обитаемом объекте. Исходные данные на проектирование представлены в табл. 1 (в соответствие с блоком 1).

Таблица 1. Исходные данные и техническое задание на проектирование
хемосорбционного реактора регенерации воздуха

Параметр	Значение						
Техническое задание							
Время защитного действия хемосорбционного реактора $t_{\rm pr}^{_{3ДH}}$, мин	300						
Количество людей, находящихся в помещении <i>n</i> , чел	4						
Режим дыхания людей, g, л/час	40						
Энергозатраты установки Е, не более Вт	50						
Масса установки М, не более кг	80						
Исходные данные (Характеристики герметичного обитаемого объекта)							
Концентрация в помещении в начальный момент времени:							
углекислого газа $c_{CO_2}(0)$, % об.	0,4						
кислорода _{с₀₂} (0), % об.	20,8						
Объем помещения V , м ³	24						
Температура воздуха в начальный момент времени $T_{g}\left(0 ight)$, К	296,15						
Суммарная мощность источников тепла Q_{\sum} , Вт	43						

В рассматриваемом примере на основании данных по эффективности функционирования реакторов различного типа [7] выбираем хемосорбционный реактор с принудительной вентиляцией (согласно блоку 2, рис. 2). В качестве хемосорбента выбираем надпероксид калия, как наиболее распространенный и удовлетворительный по стоимости материал (согласно блоку 3, рис. 2) [2].

Решается задача оптимизации (3), (4) (блок 4). В результате решения и сравнения альтернативных вариантов аппаратурного оформления определены оптимальные значения конструктивных параметров ($N^{(\nu)}$, $b^{(\nu)}$, $l^{(\nu)}$, $\gamma^{(\nu)}$), также значения $G_s^{(\nu)}$ и *d*. (Блоки 5-11). Рассчитанные в ходе реализации алгоритма значения оптимальных параметров представлены в табл. 2.

Из анализа данных табл. 2 видно, что вариант v = 3 обеспечивает наименьшее сочетание *G* и *d* при обеспечении заданного времени защитного действия $t_{\rm pr}^{_{3\rm dH}}$, поэтому в ходе сравнения он был выбран в качестве оптимального (блок 15).

ν	$N^{(v)}$	<i>b</i> ^(v) , м	<i>l</i> ^(v) , м	γ ^(ν) , M	<i>d</i> ^(v) , м	$G_S^{(u)}$, л/мин	$t_{\rm pr}^{(\nu)}$, МИН
1	48	0,10	0,20	0,004	0,03	63	300
2	52	0,12	0,21	0,006	0,04	56	300
3*	56	0,14	0,22	0,008	0,04	50	300
4	58	0,14	0,21	0,006	0,04	47	300

Таблица 2. Результаты решения задачи оптимизации

После нахождения оптимальных параметров хемосорбционного реактора осуществляется конструктивная разработка аппаратурного оформления хемосорбционного реактора (блок 15).

Конструкция хемосорбционного реактора представлена на рис. 3 [9].

Хемосорбционный реактор содержит основание 1, к которому примыкает блок из поглотительных патронов 2, скрепленных между собой и основанием 1 винтами 3 (условно не показаны), к входным штуцерам которых примыкают патрубки 4, соединенные через электромагнитные клапаны 5, управляемые блоком контроля и индикации 6, канал подачи исходной газовоздушной смеси 7 с коленами 8, фильтр воздушный 9, соединительный канал 10 с электровентилятором 11, питание которого осуществляется от стандартной электрической сети 220 В переменного тока блоком питания 12 или блоком аккумуляторных батарей 13, а к выходным штуцерам примыкают патрубки 4, соединенные через канал отвода очищенного потока 14, глушитель 15 с герметичным обитаемым объектом.

газовоздушная Исходная смесь из герметичного обитаемого объекта электровентилятором 11 подается через фильтр воздушный 9 в канал подачи исходной газовоздушной смеси 7, откуда она поступает в соответствующие поглотительные патроны 2, где в результате химических превращений воздух избавляется от углекислого газа и обогащается кислородом. Очищенный поток отводится в герметичный обитаемый объект через глушитель 15. При этом поток воздуха подается постоянно (кроме запуска установки, когда весь поток поступает в первый поглотительный патрон) в два соседних поглотительных осуществляется патрона 2, в одном ИЗ которых основная стадия хемосорбционного процесса, в другом - стадия использования остаточной стехиометрической хемосорбента. Переключение емкости между осуществляется, поглотительными патронами 2 когда концентрации углекислого газа или кислорода в герметичном обитаемом объекте, измеренные датчиками, находящимися в блоке контроля и индикации, выходят за пределы установленных уровней. Подача исходной смеси одновременно в два поглотительных патрона позволяет: с одной стороны, обеспечить высокую эффективность очистки газовоздушной смеси за счет полного использования стехиометрической емкости химического поглотителя по углекислому газу и кислороду в одном из поглотительных патронов, с другой стороны, обеспечить приемлемые концентрации кислорода и углекислого газа в герметичном обитаемом объекте за счет реализации основной очистки в другом поглотительном патроне.



Рис. 3. Конструкция хемосорбционного реактора регенерации воздуха.

Каждый поглотительный патрон 2 [10] содержит (рис. 4): корпус 1, к которому через прокладку 2 примыкает держатель 3, установленный неподвижно в углубление корпуса 1, через круглую прокладку 4 примыкает подвижный держатель 5, установленный в углубление корпуса 1 с возможностью перемещения с помощью регулировочного винта 6, расположенного в резьбовом отверстии 7 подвижного держателя 5, при этом на резьбовые оси 8, расположенные в резьбовых отверстиях 9 держателей, установлены блоки пластин 10, с зажатыми между ними листами хемосорбента 11, закрепленными неподвижно на резьбовых осях 8 с помощью шайб 12, контргаек 13, гаек 14, с одной стороны соединенный входным штуцером 15, расположенным в резьбовом отверстии 16, со входом загрязненного потока, с другой стороны соединенный выходным штуцером 17, расположенным в резьбовом отверстии 18 с выходом продукционного газа, и примыкающим через уплотнительный канал 19 с прокладкой 20 к крышке 21 посредством винтов 22, вкручиваемых в отверстия 23 корпуса 1.

Подаваемый воздух поступает через входной штуцер 15 в поглотительный патрон. Далее через отверстия, создаваемые пластинами 10, проходит между листами хемосорбента 11, где в результате химических превращений воздух

избавляется от углекислого газа и обогащается кислородом. Далее проходя через отверстия, создаваемые пластинами 10, очищенный воздух подается потребителю через выходной штуцер 17. Работа поглотительного патрона осуществляется до исчерпывания стехиометрической емкости хемосорбента 11.



Рис. 4. Конструкция поглотительных патронов хемосорбционного реактора регенерации воздуха.

Разработанный вариант (блок 16) хемосорбционного реактора рекомендуется к опытно-промышленной реализации и подготовке проектной документации на его изготовление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

расчета Разработана технологического хемосорбционного методика реактора, позволяющая для выбранных типов аппаратурного оформления реактора и регенеративного продукта определить оптимальные значения конструктивных параметров И режимных переменных, при которых обеспечивается защитного заданное время действия. Выполнен технологический расчет хемосорбционного реактора регенерации воздуха, предназначенного для защиты 4-х человек, находящихся в герметичном обитаемом объекте. Определены размеры пластин хемосорбента и их количество, необходимое для обеспечения регенерации воздуха в герметичном обитаемом объекте в течение 300 минут. На основе результатов расчетов разработаны конструкции хемосорбционного реактора и поглотительных патронов, обеспечивающих требуемую степень очистки газового потока от газообразных примесей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части (ГЗ № 10.3533.2017/ПЧ).

ACKNOWLEDGEMENT

The work was supported by the Russian Ministry of Education in the framework of the project part (Government Task No. 10.3533.2017/PP).

Список литературы:

- 1. Гладышева Т.В., Гладышев Н.Ф., Дворецкий С.И. Нанокристаллический регенеративный продукт. М.: Изд. дом «Спектр», 2014. 120 с.
- 2. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И. и др. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратурное оформление. М.: Машиностроение-1, 2007. 156 с.
- 3. Пат. 2568578 РФ, 2015.
- 4. Дворецкий С.И., Плотников М.Ю., Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 2. С. 292.
- 5. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Акулинин Е.И., Толстых С.Г. // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 7. С. 61.
- 6. *Радоуцкий В.Ю. и др.* Радиационная, химическая и биологическая защита. Учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ, 2007. 185 с.
- 7. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И. Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов. М.: Изд. дом «Спектр», 2016. 204 с.
- 8. Дворецкий Д.С., Акулинин Е.И., Толстых С.Г., Плотников М.Ю., Дворецкий С.И. // Химическая безопасность. 2017. Т. 1. № 1. С. 133.
- 9. Пат. 176066 РФ, 2017.
- 10. Пат. 166146 РФ, 2016.

References:

- 1. *Gladysheva T.V., Gladyshev N.F., Dvoretsky S.I.* Nanocrystalline regenerative product. M.: Izd. dom "Spektr", 2014. 120 p. [in Russian].
- 2. *Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoretsky S.I. et al.* Regenerative Products of New Generation: Technology and Instrumentation. M.: Mashinostroenie-1, 2007. 156 p. [in Russian].
- 3. Pat. 2568578, Russian Federation, 2015.
- 4. *Dvoretsky S.I., Plotnikov M.Yu., Gladyshev N.F., Gladysheva T.V. //* Vestnik TGTU [Bulletin of the Tambov State Technical University]. 2014. V. 20. No. 2. P. 292 [in Russian].
- 5. Dvoretsky D.S., Dvoretsky S.I., Akulinin E.I., Tolstykh S.G // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2017. V. 11. No. 4. P. 594.
- 6. *Radoutsky V.Yu. et al.* Radiation, Chemical and Biological Protection:. Manual. Belgorod: Izd. BGTU, 2007. 185 p. [in Russian].
- 7. *Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Dvoretsky S.I.* Systems and Means of Air Regeneration and Purification in Airtight Habitable Facilities. M.: Izd. dom "Spektr", 2016. 204 p. [in Russian].
- 8. *Dvoretsky D.S., Akulinin E.I., Tolstykh S.G. et al.* // Him. bezop. [Electronic Journal of Chemical Safety]. 2017. V. 1. No. 1. P. 133. doi: 10.25514/CHS.2017.1.11439 [in Russian].
- 9. Pat. 176066, Russian Federation, 2017.
- 10. Pat. 166146, Russian Federation, 2016.