

УДК 517.935

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ПРОДУКТА
НА МАТРИЦЕ С ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА**

**Н.Ф. Гладышев¹, Т.В. Гладышева¹, С.И. Дворецкий²,
В.П. Таров³, Н.Ю. Холодилин¹**

*ОАО «Корпорация «Росхимзащита», г. Тамбов (1); кафедры: «Технологическое
оборудование и пищевые технологии» (2), «Техника и технологии
машиностроительных производств» (3), ГОУ ВПО «ТГТУ»*

Ключевые слова и фразы: диоксид углерода; изолирующий дыхательный аппарат; кинетика адсорбции; надпероксид калия; регенеративный продукт.

Аннотация: Исследована кинетика процесса взаимодействия регенеративного продукта на матрице с диоксидом углерода в процессе испытаний изолирующего дыхательного аппарата на установке «Искусственные легкие». Предложена математическая модель работы регенеративного продукта в аппарате. Показано, что кинетика сорбции диоксида углерода описывается уравнением

$$a_0 = \left(\frac{\omega_{\text{адс}}}{U} - 1 \right) c_0.$$

Расхождение полученных в результате расчета и экспериментально определенных величин поглощения диоксида углерода регенеративным продуктом составляет не более 10 %.

Исследуемый в данной работе регенеративный продукт в виде пластин получали на установке для сушки высоковлажных материалов [1] по способу [2]. В качестве исходных веществ для синтеза надпероксида калия были использованы следующие реагенты: пероксид водорода ГОСТ 177–88; гидроксид калия ГОСТ 24363–80 квалификации ч.д.а. Раствор пероксосольвата калия готовили известным способом получения координационных соединений пероксида водорода [3, 4]. Полученный регенеративный продукт имел состав KO_2 – 63 % масс., KOH – 25,2 % масс., K_2CO_3 – 1,8 % масс., остальное – матрица. Толщина пластин не более 1 мм.

Исследования кинетики процесса взаимодействия регенеративного продукта на матрице с диоксидом углерода проводили в составе изолирующих средств защиты органов дыхания (ИДА) на установке «Искусственные легкие» (ИЛ), имитирующей потребление человеком кислорода и выделение им углекислого газа.

Регенеративный патрон ИДА изготавливали в виде оболочки из вспененного полипропилена с газораспределительным устройством. Оболочка представляет собой обечайку, снабженную крышкой с центральным отверстием для присоеди-

нительного патрубка и ребрами жесткости, выполненными в виде угловых сварных швов. Газораспределительное устройство изготавливали из полипропилена в виде крышки, снабженной штуцером, со встроенной внутри нее опорной решеткой. Под опорной решеткой установлен фильтр-теплообменник в виде пористой металлической пластины из вспененного никеля. Пластины регенеративного продукта снабжены рифлями, образующими выступы, расположенные под углом к продольной оси пластины. При сборке в пакет соседние пластины развернуты относительно друг друга на 180° , таким образом, между выступами образуются газораспределительные каналы.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Установка состоит из имитатора легких *1* с регулируемой частотой и амплитудой и узла присоединения к испытываемому ИДА, размещенного в климатической камере (на рисунке не показана). Потребление кислорода моделируется с помощью вспомогательного имитатора *2*, регулятора массового потока для диоксида углерода *7* и клапанов *5* и *6*. Во время вдоха вспомогательный имитатор *2* отбирает из дыхательного контура объем газовой смеси (ГВС), соответствующий объему кислорода, который должен быть потреблен, через клапан *5*. При выдохе поглощенный объем кислорода замещается диоксидом углерода через регулятор массового расхода *7*. Перед поступлением в дыхательный аппарат воздух увлажняется в увлажнителе *8* до 95...100 %.

Отбираемый из дыхательного аппарата воздух перед поступлением в имитатор *1* охлаждается посредством охладителя *9* до температуры 36...37 °С. Линии вдоха и выдоха снабжены обратными клапанами *3* и *4* во избежание смешения вдыхаемой и выдыхаемой ГВС. Концентрации диоксида углерода и кислорода во вдыхаемой ГВС из исследуемого ИДА, а также концентрация диоксида углерода на выдохе из ИЛ измеряются с помощью газоанализаторов *10*, *11*, соответственно. Температура ГВС, поступающей из ИДА в ИЛ, регистрируется прибором *13*.

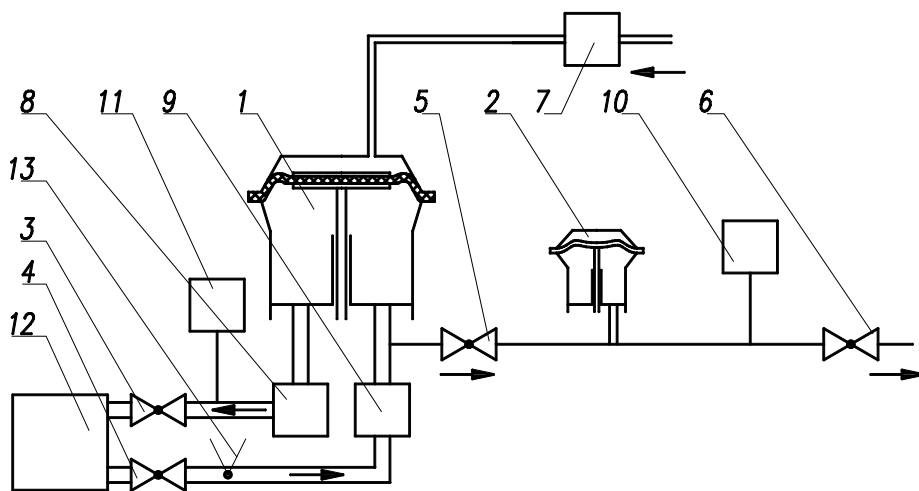


Рис. 1. Схема установки ИЛ:

- 1* – имитатор легких человека; *2* – вспомогательный имитатор; *3* – клапан линии выдоха;
4 – клапан линии вдоха; *5* – клапан отсоса CO_2 ; *6* – обратный клапан; *7* – регулятор
 подачи CO_2 ; *8* – увлажнитель дыхательной смеси; *9* – охлаждающее устройство;
10 – анализатор CO_2 и O_2 во вдыхаемом газе; *11* – анализатор CO_2
 в выдыхаемом газе; *12* – соединительный элемент
 исследуемого аппарата; *13* – датчик температуры

Исследования регенеративного продукта в составе ИДА на установке ИЛ проводили при пяти режимах, соответствующих различным уровням физической нагрузки на пользователя: 1 – относительный покой соответствует дыхательной нагрузке человека, сидящего в ожидании помощи; 2 и 3 – режимы средней тяжести, соответствующие дыхательной нагрузке человека при быстрой ходьбе или выполнении не интенсивной физической работы; 4 и 5 – тяжелая нагрузка, соответствующая дыхательной нагрузке человека при длительном беге или выполнении тяжелой физической работы. Параметры режимов приведены в табл. 1.

В процессе исследования на установке ИЛ контролировали следующие параметры, характеризующие защитные свойства ИДА: содержание диоксида углерода во вдыхаемой и выдыхаемой ГВС; концентрация кислорода во вдыхаемой ГВС; сопротивление дыханию; температура вдыхаемой ГВС, допустимые значения которых приведены в табл. 2.

ИДА проверялись на герметичность при избыточном давлении $p = 1,18$ кПа (120 мм вод. ст.) осушенного воздуха. Допустимое падение избыточного давления в аппарате не должно превышать 0,147 кПа/мин (14,7 мм вод. ст./мин). Экспериментальная установка настраивалась для обеспечения одного из режимов, указанных в табл. 1. К присоединительному элементу 12 экспериментальной установки подключался исследуемый ИДА. Температура в климатической камере устанавли-

Таблица 1

Режимы работы установки ИЛ

Наименование параметра	Номер режима испытаний				
	1	2	3	4	5
Легочная вентиляция, дм ³ /мин	10	30	35	60	70
Частота дыхания, мин ⁻¹	10	20	20	25	30
Выделение углекислого газа, дм ³ /мин	0,4	1,2	1,6	2,4	3,5
Потребление кислорода, дм ³ /мин	0,46	1,36	1,6	2,6	3,6

Таблица 2

Допустимые величины рабочих параметров ИДА

Наименование параметра	Величина
Время защитного действия, мин, не менее:	
– при средней нагрузке	15
– в покое	45
– при тяжелой нагрузке	7,5
Содержание диоксида углерода во вдыхаемой ГВС, % об.	≤ 3
Содержание кислорода во вдыхаемой из аппарата ГВС, % об.	≥ 18
Температура ГВС на вдохе, °С	$\leq +50$
Сопротивление дыханию, Па (мм вод. ст.)	≤ 980 (≤ 100)

ливалась равной: -5; 0; +23; +40 и +60 °С, соответственно. Показания с газоанализаторов 10, 11 и прибора для измерения температуры 13 регистрировались с интервалом в 1 минуту. Эксперимент продолжался до тех пор, пока какой-либо из рабочих параметров ИДА не выходил за рамки допустимых пределов, указанных в табл. 2.

На рис. 2 представлена средняя из серии десяти экспериментов зависимость концентрации диоксида углерода $\tilde{N}_{\tilde{N}i_2}$, % об. на линиях вдоха и выдоха установки ИЛ для наиболее жесткого режима 3 (см. табл. 1).

Для режимов 2, 4, 5 величины поглощения диоксида углерода регенеративным продуктом представлены в табл. 3.

На рис. 3 изображен снимок отработавшей неполный ресурс пластины регенеративного продукта, извлеченной из патрона. Стрелками показано направление вдоха и выдоха. На данном рисунке отчетливо видна зона (линия) раздела отработанного и не отработанного продукта, по виду которой выдвигаем гипотезу о том, что при маятниковой схеме дыхания сорбция диоксида углерода идет обрывным фронтом [5]. Это означает, что при выдохе рабочий слой регенеративного продукта полностью поглощает весь диоксид углерода из ГВС и выделяет кислород, а далее поток ГВС, не содержащий диоксид углерода, реагируя с последующими

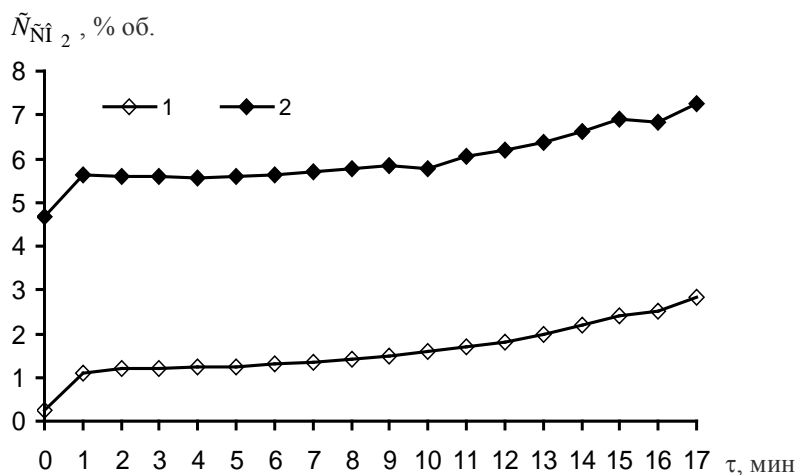


Рис. 2. Результаты испытаний аппарата с маятниковой схемой дыхания на режиме 3 на установке «Искусственные легкие»: 1 – концентрация диоксида углерода во вдыхаемом воздухе; 2 – концентрация диоксида углерода в выдыхаемом воздухе

Таблица 3

Величины теоретического и практического поглощения диоксида углерода в аппарате с маятниковой схемой дыхания при различных режимах

Режим	$m_{пр}$, кг	τ_{max} , мин	$V_{гвс}$, дм ³ /мин	V_{CO_2} , дм ³	$m_{CO_2\text{пòäò}}$, г	$V_{CO_2\text{пòäò}}$, дм ³
2	0,270	27	24,3	27,75	81,55	41,52
3	0,272	17	28,4	23,95	82,12	41,81
4	0,271	12	48,7	26,68	81,76	41,62
5	0,272	10	57,1	24,64	82,12	41,81

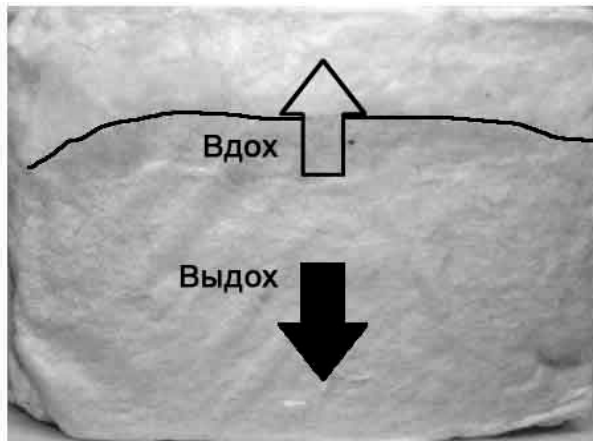


Рис. 3. Оработавшая не полный ресурс пластина регенеративного продукта

слоями регенеративного продукта, насыщается кислородом. Таким образом, после каждого цикла вдоха-выдоха в аппарате увеличивается объем, который не участвует в дальнейшем процессе регенерации ГВС, и потому является «вредным». К вредному объему также относятся неизменные объемы лицевой части аппарата, дыхательных трубок и пространства над регенеративным продуктом в регенеративном патроне.

Зависимость величины вредного объема от времени работы ИДА для различных режимов испытаний аппаратов приведена на рис. 4.

По виду кривых на рис. 4 можно предположить, что существует некоторый «начальный вредный объем» V , дм^3 , не зависящий от режима проведения испытаний.

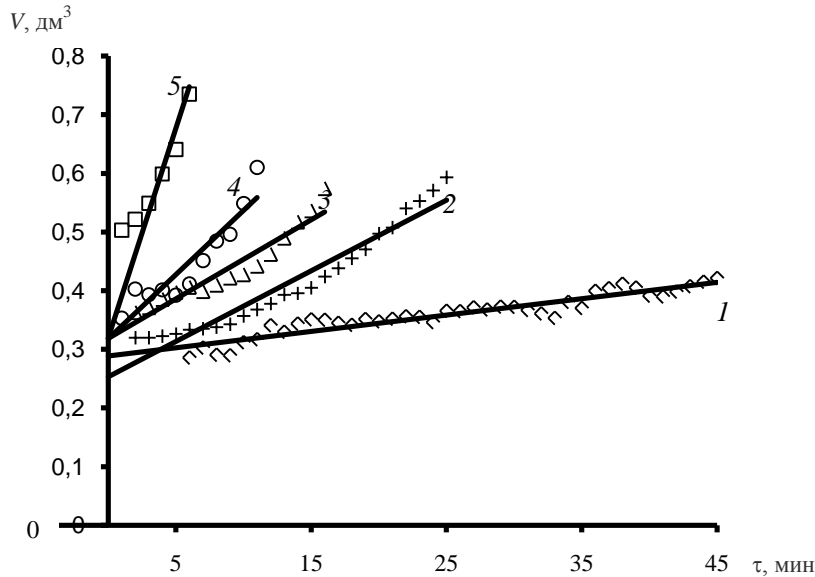


Рис. 4. Нарастание вредного объема в процессе работы аппарата при различных нагрузках:

1 – 10 $\text{дм}^3/\text{мин}$ (относительный покой); 2 – 30 $\text{дм}^3/\text{мин}$ (средняя нагрузка); 3 – 35 $\text{дм}^3/\text{мин}$ (средняя нагрузка); 4 – 60 $\text{дм}^3/\text{мин}$ (высокая нагрузка); 5 – 70 $\text{дм}^3/\text{мин}$ (высокая нагрузка)

Учитывая принятое выше допущение об обрывном фронте сорбции в аппарате, можно в соответствии с законом Вильсона [5] выразить равновесную величину адсорбции, или практическую емкость регенеративного продукта по диоксиду углерода для реальных условий работы в патроне

$$a_0 = \left(\frac{\omega_{\text{аан}}}{U} - 1 \right) c_0,$$

где $\omega_{\text{аан}}$ – скорость движения ГВС в регенеративном патроне; U – скорость движения всех точек «обрывного» фронта по регенеративному продукту; c_0 – концентрация диоксида углерода в подаваемой ГВС.

Скорость движения фронта сорбции U по слою регенеративного продукта с достаточной степенью точности можно принять за постоянную для каждого режима и определить ее как наклон аппроксимирующей прямой зависимости высоты рабочего слоя регенеративного продукта от времени.

Наконец, для каждого режима можно рассчитать значение равновесной адсорбции a_0 (степени отработки регенеративного продукта) и поглощение продуктом диоксида углерода за время проведения опыта с учетом того, что регенеративный продукт отработал не в полном объеме. Для режима 3 эти величины составили $a_0 = 3,592 \cdot 10^{-3}$ моль/см³ и $V_{\text{погл}} = 22,92$ л, соответственно. Рассчитанная величина поглощенного продуктом диоксида углерода вполне сопоставима с экспериментально определенной величиной, равной 23,95 л. При этом погрешность составляет 4 %. Это свидетельствует о правомерности принятой гипотезы об обрывном фронте сорбции при маятниковой схеме дыхания.

Достаточно точное совпадение расчетных данных с экспериментальными говорит о применимости данного подхода для исследования кинетики работы регенеративного продукта на матрице при работе в аппарате с маятниковой схемой дыхания.

Применим полученное значение a_0 для определения U по закону Вильсона для остальных режимов. Получим следующие результаты (табл. 4).

Расхождение полученных в результате расчета и экспериментально определенных величин поглощения диоксида углерода регенеративным продуктом составляет не более 10 %. Это свидетельствует о верности допущений об обрывном фронте сорбции при маятниковой схеме дыхания.

Таблица 4

**Скорость движения фронта сорбции и
объем поглощенного диоксида углерода**

Легочная вентиляция, дм ³ /мин	Масса продукта m , кг	c_0 , моль/см ³	U , м/с	$V_{\text{погл}} \times 10^{-3}$, м ³		
				расч.	эксп.	хим. анализ
10	0,271	$1,62 \cdot 10^{-5}$	$2,17 \cdot 10^{-5}$	18,87	16,28	17,2
30	0,270	$1,82 \cdot 10^{-6}$	$4,27 \cdot 10^{-5}$	25,51	27,7	28,3
60	0,271	$9,15 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	25,85	26,6	27,0
70	0,272	$2,16 \cdot 10^{-6}$ $1,19 \cdot 10^{-3}$	$5,93 \cdot 10^{-5}$ $1,77 \cdot 10^{-4}$	25,41	24,64	24,7

Работа выполнена по государственному контракту № ГП/071700/НТБ/к от 29 ноября 2007 года в соответствии с ФЦП «Национальная технологическая база».

Список литературы

1. Пат. 2259231 РФ, МПК7 В 01 J 20/04. Способ получения регенеративного продукта и поглотителей кислых газов и устройство для его осуществления / Путин Б.В., Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Симаненков Э.И., Холодиллин Н.Ю.; заявитель и патентообладатель ОАО «Корпорация «Росхимзащита». – № 2003120415/15; заявл. 03.07.2003; опубл. 27.08.2005, Бюл. № 24. – 10 с.: ил.
2. Пат. 2225241 РФ, МПК А 62 D 9/00. Регенеративный продукт и способ его получения / Гладышева Т.В., Гладышев Н.Ф. [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Корпорация «Росхимзащита»; заявл. 12.05.02; опубл. 10.03.04. – 12 с.
3. Титова, К.В. Координационные соединения пероксида водорода / К.В. Титова, В.П. Никольская, В.В. Буянов. – Черноголовка, 2000. – 148 с.
4. Пероксосолюваты в дезинфектологии / В.В. Буянов [и др.]. – Черноголовка, 2000. – 137 с.
5. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1976. – 218 с.

Modeling of Kinetics of the Process of Regenerative Product Interaction on Matrix with Carbon Dioxide

N.F. Gladyshev¹, T.V. Gladysheva¹, S.I. Dvoretzky², V.P. Tarov³, N.Yu. Kholodilin¹

Corporation “Roskhimzashchita”, Tambov (1),

Departments: “Technological Equipment and Food Technologies” (2);

“Equipment and Technologies of Engineering” (3), TSTU

Key words and phrases: adsorption kinetics; carbon dioxide; isolating breathing apparatus; kalium peroxide; regenerative product.

Abstract: The paper studies kinetics of the process of regenerative product interaction on matrix with carbon dioxide in the course of testing of isolating breathing apparatus on the set “Artificial Lungs”. Mathematics model of the regenerative product performance in the apparatus is proposed. It is shown that adsorption kinetics of carbon dioxide is described through the equation $a_0 = \left(\frac{\Omega_{\text{aân}}}{U} - 1 \right) c_0$. The difference between the calculated value of carbon dioxide absorption by regenerative product and the one which was defined experimentally equals 10 % approximately.

Modellierung der Kynetik des Prozesses der Zusammenarbeit des regenerativen Produktes auf der Matrix mit dem Kohlendioxid

Zusammenfassung: Es ist die Kynetik des Prozesses der Zusammenarbeit des regenerativen Produktes auf der Matrix mit Kohlendioxid im Prozess der Untersuchungen des isolierenden Atmungsapparates auf der Anlage «Kunstlungen» untersucht. Es ist das mathematische Arbeitsmodell des regenerativen Produktes im Apparat vorge-

schlagen. Es ist gezeigt, daß die Kinetik der Sorbtion des Kohlenoxides mit der Gleichung $a_0 = \left(\frac{\omega_{\text{CO}}}{U} - 1 \right) c_0$ beschrieben wird. Die Differenz der erhaltenen im Resultat der Rechnung der Größen der Absorption des Kohlendioxides des Dioxidproduktes vom Regenerativprodukt und von den experimentellbestimmten Produkten beträgt nicht mehr als 10 %.

Modélage de la cinétique de l'interaction du produit régénéré sur la matrice avec le dioxyde de l'hydrogène

Résumé: Est étudiée la cinétique du processus de l'interaction du produit régénéré sur la matrice avec le dioxyde de l'hydrogène lors des essais de l'appareil isolé d'aspiration sur l'installation «Poumons artificiels». Est proposé le modèle mathématique du fonctionnement du produit régénéré dans l'appareil. Est montré que la cinétique de l'absorption du dioxyde de l'hydrogène est décrite par l'équation

$a_0 = \left(\frac{\omega_{\text{CO}_2}}{U} - 1 \right) c_0$. Le décollage des grandeurs de l'absorption du dioxyde de

l'hydrogène par le produit régénéré reçues lors du calcul et définies par l'expérience est pas plus de 10 %.
