

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

С.Б. Путин<sup>1</sup>, Д.Л. Симонова<sup>2</sup>, С.А. Скворцов<sup>3</sup>

ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (1);  
ГБОУ ВПО «Российский национальный исследовательский  
медицинский университет им. Н.И. Пирогова», г. Москва (2);  
кафедра «Информационные процессы и управление», ТГТУ (3);  
dfoxd@yandex.ru

Представлена членом редколлегии профессором В.Г. Матвейкиным

**Ключевые слова и фразы:** адсорбционный процесс; математическое моделирование; регенерация воздуха.

**Аннотация:** Разработана математическая модель процесса регенерации воздуха методом адсорбции.

### Обозначения

$a$  – концентрация компонента в адсорбенте, кг компонента / кг адсорбента;  
 $b$  – параметр изотермы, м<sup>3</sup> межгранулярного пространства / кг компонента;  
 $c$  – концентрация компонента в межгранулярном пространстве, кг компонента / м<sup>3</sup> межгранулярного пространства;  
 $D$  – эффективный коэффициент продольного перемешивания, м<sup>2</sup>/с;  
 $G$  – объемный расход исходной газовой смеси в нормальных условиях, нм<sup>3</sup>/с;  
 $\Delta H$  – тепловой эффект адсорбции, Дж/моль;  
 $L$  – длина слоя адсорбента, м;  
 $Oxyz$  – прямоугольная система координат в адсорбере;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  
 $S$  – площадь поперечного сечения адсорбера, м<sup>2</sup>;

$T$  – абсолютная температура, К;  
 $w$  – линейная скорость потока, м/с;  
 $\beta$  – кинетический коэффициент адсорбции, с<sup>-1</sup>;  
 $\varepsilon$  – порозность слоя, м<sup>3</sup> межгранулярного пространства / м<sup>3</sup> сорбционного слоя;  
 $\rho$  – насыпная плотность адсорбента, кг адсорбента / м<sup>3</sup> сорбционного слоя;  
 $\tau$  – время процесса, с;  
 $A$  – адсорбер;  
 $K$  – клапан.

### Индексы

ад – стадия адсорбции;  
 $p$  – равновесная величина;  
 $\infty$  – предельная величина;  
 $0$  – начальная величина в начальный момент времени.

В настоящее время все более актуальной становится задача освоения человеком новых пространств с неестественными для него условиями обитания. Это требует разработки новых поколений технических систем, способных решать задачи жизнеобеспечения персонала на длительных этапах пребывания в экстремальных условиях.

В процессе жизнеобеспечения одной из важнейших задач является задача обеспечения физиологических норм дыхания человека. Для ее решения существу-

ет значительное многообразие технических систем, где одной из основных стадий является адсорбционное поглощение углекислого газа из замкнутого объема обитания.

В работе ставится задача разработки математической модели процесса регенерации воздуха, пригодной для проведения численных имитационных исследований, а также решения задач управления в широком спектре входных воздействий.

Рассмотрим технологическую схему процесса регенерации воздуха (рисунок).

На стадии адсорбции исходная газовая смесь, состоящая из воздуха, паров воды, углекислого газа, подается через клапан  $K_3$  в адсорбер А, где происходит селективное поглощение углекислого газа. Через клапан  $K_2$  выходит очищенная от углекислого газа газовая смесь воздуха и паров воды. При этом, клапаны  $K_1$  и  $K_5$  закрыты. После окончания стадии адсорбции начинается стадия десорбции углекислого газа, где клапаны  $K_2$  и  $K_3$  закрываются, а  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_7$  открываются. Через клапан  $K_1$  подается перегретый пар. Адсорбент принимает тепло перегретого пара, вследствие чего, начинается процесс десорбции углекислого газа в лобовом слое. Повышение парциального давления углекислого газа в последующих, менее нагретых слоях, приводит к его адсорбции. В слое возникает сорбционный фронт углекислого газа, который начинает перемещение к концевому слою адсорбента. Поэтому на выход установки, через клапан  $K_7$ , поступает газовая смесь состоящая преимущественно из воздуха и воды. Когда сорбционный фронт углекислого газа достигает концевого слоя адсорбента, то начинается фаза активного выделения углекислого газа, что сопровождается резким ростом расхода и концентрации  $CO_2$  на выходе. В этот момент клапан  $K_7$  закрывается, а  $K_6$  открывается и установка переходит в режим продуцирования углекислого газа. После этого адсорбер А вновь готов к проведению стадии адсорбции.

В технологической схеме, представленной на рисунке, используется цилиндрический адсорбер с постоянным проходным сечением и с однородной загрузкой шихты.

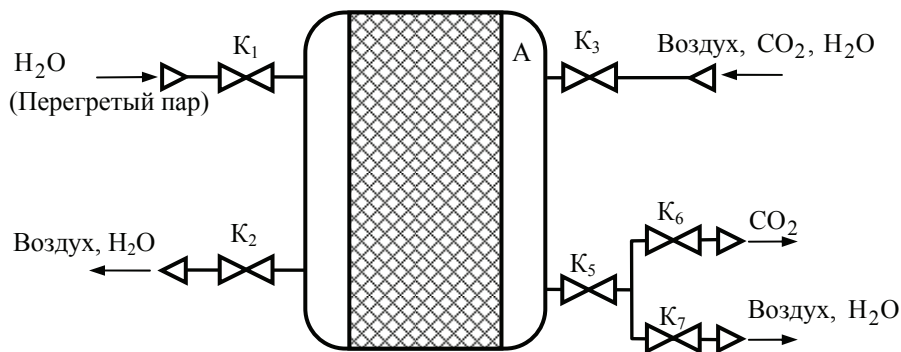
Математическое описание процесса адсорбции углекислого газа имеет вид:

а) материальный баланс по углекислому газу в адсорбере определяется уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + \frac{\rho}{\varepsilon} \frac{\partial a}{\partial \tau} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}; \quad (1)$$

б) начальные условия для уравнения (1) имеют вид:

$$c(z,0) = c_0(z), \quad a(z,0) = a_0(z); \quad (2)$$



Технологическая схема процесса регенерации воздуха

в) граничные условия для уравнения (1):

$$c(0, \tau) = c^{\text{BX}}(\tau), \quad \frac{\partial c(L, \tau)}{\partial z} = 0; \quad (3)$$

г) уравнение изотермы [1]

$$a_p = \frac{a_\infty b c}{1 + b c}; \quad (4)$$

д) зависимость для пересчета параметра  $b$  изотермы при различных температурах [1]

$$b = b_0 e^{\frac{\Delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}; \quad (5)$$

е) уравнение кинетики поглощения

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \beta_1 (a_p - a) + \beta_2 (c - c_p); \quad (6)$$

ж) зависимость для расчета скорости газового потока

$$w = \frac{G}{S}. \quad (7)$$

Новизной математической модели является применение уравнения (6). В этом уравнении учитываются процессы во внешнедиффузионной и внутридиффузионной фазе. Значения кинетических коэффициентов находятся в результате решения задачи параметрической идентификации. Для решения данной задачи разработан специальный алгоритм.

Таким образом, разработана математическая модель процесса адсорбции углекислого газа, пригодная для проведения имитационных исследований и решения задач управления в широком диапазоне входных воздействий.

*Работа выполнена в рамках соглашения № 14.В37.21.2083 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

*Список литературы*

1. Шумяцкий, Ю.И. Промышленные адсорбционные процессы : учеб. пособие / Ю.И. Шумяцкий. – М. : КолосС, 2009. – 183 с.

---

## Mathematical Modelling of Air Regeneration Process in Confined Spaces

S.B. Putin<sup>1</sup>, D.L. Simonova<sup>2</sup>, S.A. Skvortsov<sup>3</sup>

*ОАО “Corporation “Roskhimzashcita” (1); Russian National Research Medical University named after N.I. Pirogov, Moscow (2); Department “Information Processes and Control”, TSTU (3); dfoxd@yandex.ru*

**Key words and phrases:** adsorption process; air regeneration; mathematical modeling.

**Abstract:** The paper describes a mathematical model of air regeneration process by an adsorption method.

## **Mathematische Modellierung des Prozesses der Regeneration der Luft im geschlossenen Umfang**

**Zusammenfassung:** Es ist das mathematische Modell des Prozesses der Regeneration der Luft von der Methode der Adsorption entwickelt.

---

## **Modélage mathématique du processus de la régénération de l'air dans le volume fermé**

**Résumé:** Est élaboré le modèle mathématique du processus de la régénération de l'air par la méthode de l'absorption.

---

**Авторы:** *Путин Сергей Борисович* – кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, ОАО «Корпорация «Росхимзащита»; *Симонова Дарья Леонидовна* – клинический ординатор, ГБОУ ВПО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова», г. Москва; *Скворцов Сергей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Погонин Василий Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---