

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОНЦЕНТРАТОРОВ КИСЛОРОДА С УЧЕТОМ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

А.С. Васильев¹, Т.А. Лапина², С.А. Скворцов¹

*Кафедра «Информационные процессы и управление», ТГТУ (1);
ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт
химического машиностроения», г. Москва (2); dfoxd@yandex.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.Г. Матвейкиным

Ключевые слова и фразы: адсорбционное разделение газовых смесей; безнагревная короткоцикловая адсорбция; математическое моделирование.

Аннотация: Разработана математическая модель процесса адсорбционного разделения многокомпонентной газовой смеси по методу короткоцикловой безнагревной адсорбции. Полученная модель позволяет рассчитывать многоадсорберные концентраторы кислорода со сложной геометрией адсорберов и многослойной загрузкой шихты.

Обозначения

a – величина сорбции компонента в адсорбенте, моль/м³;
 b – коэффициент изотермы Ленгмюра;
 G – мольный расход газовой смеси, моль/с;
 ΔH – тепловой эффект адсорбции, Дж/моль;
 L – длина слоя адсорбента, м;
 N – количество элементов, шт.;
 $Ox yz$ – прямоугольная система координат в адсорбере;
 P – общее давление газовой смеси, Па;
 p – парциальное давление компонента, Па;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж / (моль·К);
 S – площадь проходного сечения, м²;
 T – абсолютная температура, К;
 V – общий объем слоя, м³;
 w – линейная скорость потока, м/с;
 β – кинетический коэффициент сорбции, с⁻¹;

ε – суммарная порозность слоя, м³ межгранулярного пространства / м³ сорбционного слоя;
 τ – время процесса, с;
 A – адсорбер;
 K – клапан.

Индексы

БСК – более сорбируемый компонент;
МСК – менее сорбируемый компонент;
вп – выпуск газовой смеси;
вх – величина на входе;
вых – величина на выходе;
д – дросселирование потока;
к.с – компонент смеси;
пит – питающая газовая смесь;
пр – промывочная газовая смесь;
прод – потребляемая или производимая газовая смесь;
пц – половина цикла;
р – равновесная величина;
сб – сброс газовой смеси;
 ∞ – предельная величина.

На современном уровне развития мировой промышленности широкое распространение получили газоразделительные установки, работающие по принципу адсорбционного селективного поглощения компонентов газовых

смесей. Достоинствами данных установок являются низкое энергопотребление, мобильность, быстрый выход на заданный режим, возможность управления составом продуктов разделения, что позволяет с успехом применять подобные установки в различных областях жизнедеятельности человека, в том числе и в качестве медицинских концентраторов.

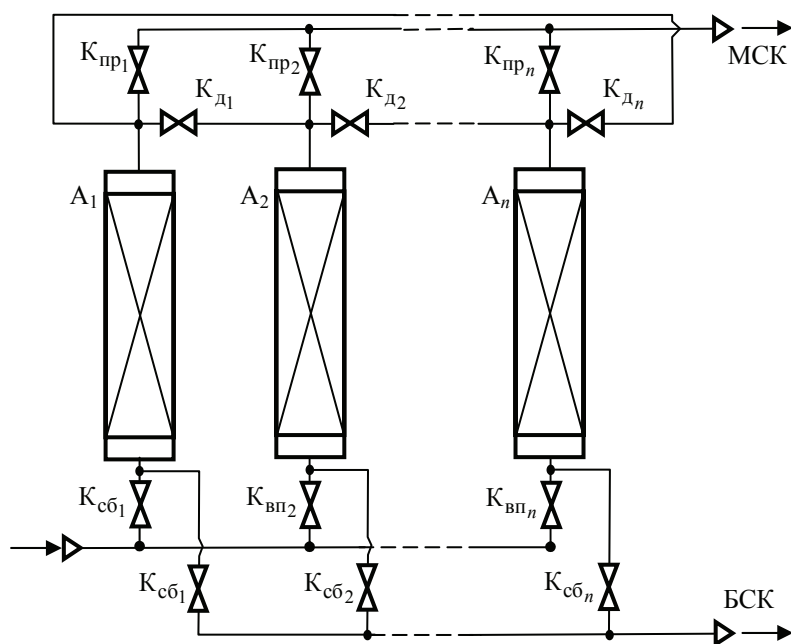
Рассмотрим технологическую схему процесса адсорбционного разделения воздушной газовой смеси в медицинском концентраторе (рисунок), который характеризуется следующими параметрами: n – количество адсорберов; l – количество компонент смеси; m – количество слоев различных поглотителей.

Для проведения процесса адсорбции исходная сжатая смесь вводится в коллектор с помощью клапанов $K_{вп_i}$, $i = \overline{1, n}$. В момент времени, когда открыт клапан $K_{вп_i}$, соответствующий клапан $K_{сб_i}$ закрыт. Исходная смесь через клапан $K_{вп_i}$ поступает в адсорбер A_i , заполненный адсорбентом, который селективно поглощает один (несколько) из компонентов исходной газовой смеси. Через клапан $K_{пр_i}$ выходит смесь, концентрированная МСК. Часть смеси, насыщенной МСК, дросселируется до атмосферного давления в клапане $K_{д_i}$ и противоточно выводится в адсорбер A_{i+1} . Взаимодействие смеси МСК с адсорбентом, насыщенным БСК в течение предшествующей стадии адсорбции, приводит к десорбции БСК и регенерации адсорбента. Через открытые клапаны $K_{сб_i}$ сбрасывают смесь БСК. Переключение клапанов осуществляется через равные промежутки времени $\tau_{пц}$.

В установке, представленной на рисунке, применены адсорберы с переменным проходным сечением и с разнородной загрузкой шихты.

Под разнородной загрузкой шихты подразумевается то, что слой состоит из нескольких m последовательных слоев адсорбента, имеющих различную селективность по каждому компоненту газовой смеси.

При разработке математических моделей процессов, протекающих в адсорбере, принимается следующая основная система допущений [1].



Технологическая схема процесса адсорбционного разделения газовых смесей

1. В процессе функционирования установки короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) физико-механические свойства гранул и геометрические размеры не меняются.

2. Скорость процессов массопереноса вдоль продольной оси Ox слоя значительно превышает скорость процессов массопереноса вдоль поперечных осей.

3. Наличие одного компонента в газовой смеси приводит к снижению величины сорбции других компонентов.

4. Компоненты газовой смеси с процентным содержанием менее 0,1 % не рассматриваются.

5. Сорбционный слой (для одного слоя) считается сплошным пористым телом с изоморфными свойствами.

6. Перепад общего давления смеси по длине зернистого слоя адсорбента незначителен.

7. Снижение эффективной скорости потока за счет обратных газовых пульсаций, вызванных случайной структурой слоя адсорбента, мало.

8. Разделяемая газовая смесь обладает свойствами идеального газа.

9. Влияние пристеночных эффектов в сорбционном слое на профиль скорости газовой смеси мало.

10. Влияние термических факторов на характер протекания процесса адсорбционного разделения мало.

В соответствии с принятыми допущениями математическое описание процессов имеет вид, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, l}$, $k = \overline{1, m}$:

а) покомпонентный материальный баланс в адсорбере определяется уравнением

$$\frac{\partial p_j^i}{\partial \tau} + RT \frac{\rho_b(x)}{\varepsilon_b(x)} \frac{\partial a_j^i}{\partial \tau} + \frac{\partial (w^i p_j^i)}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

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

$$a_j^i(x, 0) = a_{j_0}^i(x), \quad p_j^i(x, 0) = p_{j_0}^i(x); \quad (2)$$

в) граничные условия для уравнений (1):
на стадии адсорбции:

$$\frac{\partial (w^i p_j^i)}{\partial x}(L, \tau) = 0, \quad p_j^i(0, \tau) = p_{j_{\text{пит}}}^i; \quad (3)$$

на стадии десорбции:

$$\frac{\partial (w^i p_j^i)}{\partial x}(0, \tau) = 0, \quad p_j^i(L, \tau) = p_{j_{\text{пр}}}^i; \quad (4)$$

г) уравнение динамики давления в адсорбере:

$$\frac{V}{RT} \frac{d P_i}{d \tau} = G_{i_{\text{вх}}} - G_{i_{\text{вых}}} - \int_0^L \frac{\partial (a_1^i + a_2^i + \dots + a_l^i)}{\partial \tau} S(x) \rho_b(x) dx; \quad (5)$$

с начальным условием в виде

$$P_i(0) = P_{i_{\text{БСК}}}; \quad (6)$$

д) уравнения скорости по длине сорбционного слоя:

$$w^i(x) = w^i(0) \frac{S(0)}{S(x)} - \frac{V(x) \varepsilon(x)}{S(x) P} \frac{d P_i}{d \tau}; \quad (7)$$

где $w(0)$, $w(x=L)$ – скорость газовой смеси на входе и выходе сорбционного слоя соответственно;

е) краевые условия для уравнения (7):

$$w^i(x) = G_{i_{\text{вх}}} \frac{RT}{P_i S(x)}, \quad x=0, \quad w^i(x) = G_{i_{\text{вых}}} \frac{RT}{P_i S(x)}, \quad x=L; \quad (8)$$

ж) кинетические коэффициенты определяются из соотношений

$$\beta_j(x) = \begin{cases} \frac{(\beta_{2,j} - \beta_{1,j})}{2} \text{th}(\Theta(x - x_1) + 1) + \beta_{1,j}, & 0 \leq x \leq x_2; \\ \frac{(\beta_{3,j} - \beta_{2,j})}{2} \text{th}(\Theta(x - x_2) + 1) + \beta_2, & x_2 \leq x \leq x_3; \\ \dots \\ \frac{(\beta_{m,j} - \beta_{m-1,j})}{2} \text{th}(\Theta(x - x_{m-1}) + 1) + \beta_{m-1}, & x_m \leq x \leq L; \end{cases} \quad (9)$$

з) равновесие в системе, с учетом гистерезиса адсорбция-десорбция, определяется уравнениями

$$a_{j,k}^{i_p} = \begin{cases} \frac{a_{j\infty,k} b_{j,k} p_j^i}{1 + b_1 p_{1,k}^j + \dots + b_{l,k} p_l^j} + \delta(p_j^i), & \frac{\partial a_{j,k}^i}{\partial \tau} \geq 0; \\ \frac{a_{j\infty,k} b_{j,k} p_j^i}{1 + b_1 p_{1,k}^j + \dots + b_{l,k} p_l^j}, & \frac{\partial a_{j,k}^i}{\partial \tau} < 0, \end{cases} \quad (10)$$

где $a_{j\infty,k}$ – емкость сорбента по j – у компоненту в слое k .

Коэффициенты $b_{j,k}$ определяются соотношением

$$b_{j,k} = b_{j,k_0} \exp\left(\frac{\Delta H_{j,k}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right). \quad (11)$$

Математическое описание необходимо дополнить уравнениями связи материальных потоков в характерных точках технологической схемы.

Таким образом, разработана модель, описывающая процессы, протекающие в концентраторах кислорода с различным конструкционным оформлением.

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. Беляев, Д.С. Математическое моделирование процесса адсорбционного разделения газовой смеси при многослойной загрузке шихты / Д.С. Беляев, С.Б. Путин, С.А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 2А. – С. 409–417.

Research into Oxygen Concentrator Modes Based on their Design Features

A.S. Vasilyev¹, T.A. Lapina², S.A. Skvortsov¹

*Department “Information Processes and Control”, TSTU (1);
Scientific Research and Design Institute of Chemical Engineering, Moscow (2);
dfoxd@yandex.ru*

Key words and phrases: adsorption separation of gas mixtures; mathematical modeling; pressure swing adsorption.

Abstract: The paper describes a mathematical model of adsorption separation of multi-component gas mixtures by pressure swing adsorption method. The resulting model enables to calculate multi-adsorption oxygen concentrators with a complex geometry and multiple load charge.

Forschung der Regimes der Konzentratoren des Sauerstoffes unter Berücksichtigung ihrer konstruktiven Besonderheiten

Zusammenfassung: Es ist das mathematische Modell des Prozesses der Adsorptionsteilung der Mehrelementengasmischung nach der Methode der kurzzyklischen wärmelosen Adsorption entwickelt. Das erhaltene Modell lässt zu, die vielsorberischen Konzentratoren des Sauerstoffes mit der komplizierten Geometrie der Adsorber und der mehrschichtigen Auslastung des Beschickungsgutes zu rechnen.

Etude des régimes des concentrateurs de l'oxygène compte tenu de leur particularités constructives

Résumé: Est élaboré le modèle mathématique du processus absorbante de la séparation du mélange gazeux multicomposant par la méthode de l'absorption à court cycle sans chauffage. Le modèle obtenu permet de calculer des concentrateurs multiabsorbants de l'oxygène avec une complexe géométrie des absorbants et une charge multicouche du lit de fusion.

Авторы: *Васильев Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Лапина Тамара Александровна* – научный сотрудник, ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения», 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».
