



УДК 66.074.5

## СПОСОБ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

•••••

## METHOD FOR CLEANING GASES FROM VARIOUS GAS MIXTURES

**Байрамова Айгюн Сеймур кызы**

инженер,

Азербайджанский государственный университет  
нефти и промышленности

aygun.b74@mail.ru

**Bayramova Aygun Seymur qizi**

Engineer,

Azerbaijan State Oil and Industry University  
aygun.b74@mail.ru

**Аннотация.** Математическая модель процесса учитывает распределение температуры в зоне массообмена адсорбента в неподвижном слое адсорбента. Получена зависимость  $\theta = f(F_0)$ . Следует отметить, что при повышенных концентрациях адсорбтива тепловой эффект оказывает существенное влияние на протекание процесса адсорбции в неподвижном слое адсорбента в переходном режиме. Нами также получено математическое описание теплообмена промышленных адсорберов.

**Annotation.** The mathematical model of the process takes into account the temperature distribution in the mass transfer zone of the adsorbent in the stationary adsorbent layer. The dependence  $\theta = f(F_0)$  is obtained. It should be noted that at elevated concentrations of the adsorbent, the thermal effect has a significant effect on the course of the adsorption process in the stationary layer of the adsorbent in the transition mode. We also obtained a mathematical description of the heat exchange of industrial adsorbers.

**Ключевые слова:** тепломассообмен, массотеплообмен, адсорбтив, адсорбер, моделирование, температуропроводность.

**Keywords:** heat and mass transfer, mass heat exchange, adsorbent, adsorber, modeling, thermal conductivity.

**П**роблемы моделирования тепломассообмена процесса адсорбции в неподвижном слое адсорбента при повышенных концентрациях тепловой эффект оказывает существенное влияние на протекание адсорбционного процесса и нуждается в учете. Скорость, равновесное состояние тепломассообменных процессов, имеют большое значение при определении эффективности работы адсорбционных аппаратов. В случае неизотермической адсорбции очень важно иметь возможность предсказывать ход изменения температуры неподвижного слоя адсорбента со временем, так как, экономически оказывается наиболее выгодным производить отбор продукта из промышленного адсорбера до установления равновесного состояния, т.е. при переходном режиме.

Получено математическое описание теплообмена промышленных адсорберов. Разработанная математическая модель позволяет определить за каждый момент времени температуру в неподвижном слое адсорбента (на примере процесса адсорбционной очистки газовых смесей  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_2$  цеолита NaX). Для моделирования тепломассообмена использовано уравнение теплопроводности, т.е. дифференциальные уравнения параболического типа. Цель исследования тепломассообмена за каждый момент времени в неподвижном слое и определение тепломассообмена между газовым потоком и неподвижным слоем цеолита NaX.

Как известно, тепловой эффект процесса адсорбции жидкой или газовой среды может привести к появлению внутри слоя адсорбента промышленного адсорбера градиентов температуры, и в этом случае различное значение температуры по длине слоя адсорбента может оказать существенное влияние на процесс адсорбции [1, 2].

Теплота адсорбции, повышая внутреннюю температуру слоя адсорбента и адсорбтива, отрицательно влияет на поглощение нежелательных компонентов газовой смеси. Это влияние особенно значительно в случае высокой концентрации поглощаемого компонента в газовом потоке и большого диаметра промышленного адсорбера. В случае неизотермической адсорбции выделяющееся тепло частично уносится потоком газа, частично остается в неподвижном слое адсорбента. Кроме того, в производственных условиях технологические аппараты, в том числе промышленные адсорберы обычно, работают в зимних и летних условиях. Тепломассообмен в адсорбционных процессах является наиболее узким местом. Поэтому при проектировании промышленных адсорберов и реконструкции стадии процесса адсорбции необходимо проводить тепломассообменные расчеты. Для проведения этих расчетов не обходится без создания математической модели тепломассообмена адсорбционных процессов.

В связи с этим возникает необходимость создания математического описания теплообмена адсорбционных аппаратов.

Основой математического моделирования промышленных адсорберов в неподвижном слое адсорбента является математическое описание тепломассообмена на отдельном зерне адсорбента.



Для моделирования используем уравнение теплопроводности – дифференциальных уравнений параболического типа:

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial m}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 m}{\partial l^2} = 0. \quad (1)$$

Обозначим через  $m$  – температуру,  $\tau$  – время,  $l$  – координату слоя адсорбента,  $c$  – температуропроводность.

Принимаем  $m = m(l, \tau)$ ;  $l \in [h_1, h_2]$ ;  $\tau \in [\tau_1, \tau_2]$ .

$\frac{\partial m}{\partial \tau}$  – описывает изменения температуры по времени.

$\frac{\partial^2 m}{\partial l^2}$  – описывает температурный профиль слоя адсорбента адсорбера.

Температурный профиль слоя адсорбента адсорбера описывает отклонения температуры в данной точке зоны от средней температуры в соседних зонах.

Напишем граничное условие:

$$\begin{cases} m(0, \tau) = 0 & \tau \in ]0; \tau] \\ m_x(1, \tau) - \chi \cdot m(1, \tau) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$m(l, 0) = \varphi(l) \quad l \in ]0, 1].$$

Условия (2) описывают процесс теплообмена с окружающей средой (в летнее время).

Допустим  $m(l, \tau) = L(l) \cdot T(\tau)$ . Тогда из (1) получаем:

$$L(l) \cdot T'(\tau) = c^2 L''(l) \cdot T(\tau). \quad (3)$$

Из уравнений (3) получаем:

$$\frac{L''}{L} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{T'}{T}.$$

Принимаем:

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{T'(\tau)}{T(\tau)} = b,$$

$$\frac{L''(l)}{L(l)} = b,$$

$$L''(l) = b \cdot L(l).$$

Получается два дифференциальных уравнения теплообмена:

$$T'(\tau) - bc^2 T(\tau) = 0. \quad (4)$$

$$L''(l) - bL(l) = 0. \quad (5)$$

Из уравнений (4) получим решение в виде полином –  $p - bc^2 = 0$ . Полином имеет корень  $bc^2$ . Решение уравнения (1) имеет вид:

$$T(\tau) = a \cdot e^{-b \cdot c^2 \cdot \tau}, \text{ а } a \text{ и } b \text{ константы.}$$

При  $b \geq 0$  физически это невозможно. При  $b < 0$ ,  $b = -k^2$  и  $k \in \mathbb{R}$  решение будет в виде:

$$T(\tau) = a \cdot e^{-k^2 \cdot c^2 \tau}. \quad (6)$$

Уравнение (6) описывает за каждый момент времени температуры в неподвижном слое адсорбента. Это уравнение позволяет найти распределение тепла адсорбции между газовым потоком и неподвижным слоем адсорбента. В реальных условиях адсорбция происходит сложнее. При движении потока газа через неподвижный слой адсорбента массообмен при сорбции протекает не мгновенно, изменяется во времени. В зоне массопередачи адсорбера [2] обычно существует 3 границы: 1) отработанный слой; 2) работающий слой; 3) неработающий слой.

Скорость равновесного состояния тепломассообменных процессов, имеет большое значение при определении эффективности работы адсорбционных аппаратов. В случае неизотермической адсорбции очень важно иметь возможность предсказывать ход изменения температуры неподвижного слоя адсорбента со временем, так, как, экономически оказывается наиболее выгодным производить



отбор продукта из промышленного адсорбера до установления равновесного состояния, т.е. при переходном режиме. Степень отклонения от равновесного состояния, обуславливает, кроме того, продолжительность процесса. Безразмерную температуру описываем уравнением (7).

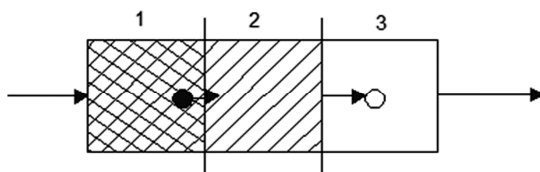


Рисунок 1 – Зоны массотеплообмена адсорбера

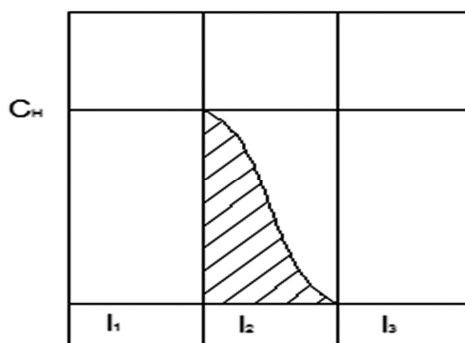


Рисунок 2 – Зависимость концентрации адсорбтива от высоты слоя адсорбента

$$\theta = \frac{m_k - m_n}{m_{o.c} - m_n}, \quad (7)$$

где  $m_k$  – конечная температура,  $m_n$  – начальная температура,  $m_{o.c}$  – температура окружающей среды,  $\theta$  – безразмерная величина температуры:

$$\theta = f(F_0), \quad (8)$$

здесь  $F_0$  – критерий Фурье

$$F_0 = \frac{c \cdot \tau}{R^2}, \quad (9)$$

$R$  – радиус зерна адсорбента.

Из уравнений (6), (7) и (9) получаем

$$\theta = a \cdot e^{-k^2 \cdot c \cdot R^2 F_0} = a \cdot e^{-x \cdot F_0}. \quad (10)$$

где  $x = k^2 \cdot c \cdot R^2$ .

На основе уравнений (10) вычисляем зависимость  $\theta = f(F_0)$  (рис. 3).

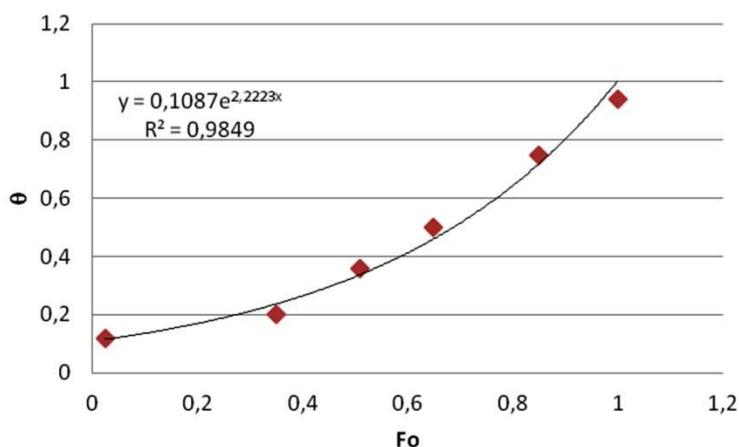


Рисунок 3 – Зависимость  $\theta = f(F_0)$



Разработанная ранее математическая модель процесса адсорбции [3] дает возможность определения продолжительности адсорбционного цикла. Математическая модель процесса представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Решение системы получено с использованием преобразований Лапласа-Карсона. В результате ряда математических операций из этой системы получена следующая система уравнений [3, 4].

$$a^* = 2 \cdot K_a \cdot D_a \cdot \frac{1}{r_*} \cdot \tau_a, \quad a = D_a \cdot 4\pi \cdot r_0^2 \cdot N' \cdot K_a \cdot \tau_a,$$

$$c_c = 2 \cdot K_c \cdot D_c \cdot \frac{1}{r} \cdot \tau_a - a,$$

$$K_c = C/R, \quad K_a = a/r_0,$$

$$C_c = a / [b (a_\infty - a)],$$

$$c = 0,9 \left[ -C_s(S_1) + \frac{16}{3} C_s(S_2) - \frac{16}{5} C_s(S_3) \right]$$

$$C_s = f(D_s),$$

$$S_1 = 1/(2,89 \cdot \tau_a),$$

$$S_2 = 3/(2,89 \cdot \tau_a),$$

$$S_3 = 5/(2,89 \cdot \tau_a).$$

Однако при определении времени адсорбции не учтен теплообмен. При повышенных концентрациях тепловой эффект может оказывать существенное влияние на протекание адсорбционного процесса и нуждается в учете.

От начала адсорбции спустя промежуток времени фронт сорбции окажется в слое 1. Поглощаемый компонент насыщает слой 1. Зона массотеплообмена соответствует работающему слою 2. С течением времени на выходе слоя 1 и слоя 3, процесс адсорбции происходит на границе насыщенных и ненасыщенных зонах адсорбции и соответственно изменяется тепломассообмен. Ранее нами в разработанной модели стадии адсорбции тепломассообмен не был учтен. Это показывает, что в неподвижном слое адсорбента фронт сорбции размыт, происходит теплообмен [5].

Процессы адсорбции экзотермичны, обратные процессы требуют подвода тепла. При анализе динамики сорбции следует учитывать распределения температуры в этих зонах адсорбента при неподвижном слое адсорбента.

Математическая модель процесса учитывает распределение температуры в зоне массообмена адсорбента в неподвижном слое адсорбента. Получена зависимость  $\theta = f(F_0)$ . Следует отметить, что при повышенных концентрациях адсорбтива тепловой эффект оказывает существенное влияние на протекание процесса адсорбции в неподвижном слое адсорбента в переходном режиме [6].

### Литература:

1. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой). – Л. : Химия, 1990. – 384 с.
2. Кельцев Н.В. Физическая адсорбция из многокомпонентных фаз. – М. : Наука, 1982. – С. 30–38.
3. Юсубов Ф.В. Математическое моделирование и оптимизация процесса химической технологии : учебник. – Баку, 2015. – С. 598.
4. Юсубов Ф.В., Байрамова А.С. Исследование диффузионных параметров адсорбционной очистки природных газов // Журнал нефтегазовые технологии. – 2016. – № 4. – С. 64–69.
5. Юсубов Ф.В., Байрамова А.С. Исследование зависимости адсорбционных процессов от внешних условий // Журнал «Химическое и нефтегазовое машиностроение». – 2018. – № 5. – С. 13–15.
6. Юсубов Ф.В., Байрамова А.С. Моделирование тепломассообмена при адсорбции газовых смесей в переходном режиме // Инженерно-физический журнал (ИФЖ). – Белорусь, г. Минск, 2019. – Т. 92. – № 1. – С. 120–127.

### References:

1. Romankov P.G., Frolov V.F. Mass transfer processes of chemical technology (systems with disperse solid phase). – L. : Chemistry, 1990. – 384 p.
2. Keltsev N.V. Physical adsorption from the multicomponent phases. –M. : Nauka, 1982. – P. 30–38.
3. Yusubov F.V. Mathematical Modeling and Process Optimization of Chemical Technology : a textbook. – Baku, 2015. – P. 598.
4. Yusubov F.V., Bayramova A.S. Research of diffusion parameters of adsorption purification of natural gases // Journal of oil and gas technologies. – 2016. – № 4. – P. 64–69.
5. Yusubov F.V., Bairamova A.S. Research of adsorption processes dependence on the external conditions // Journal for chemical and oil-and-gas machine-building. – 2018. – № 5. – P. 13–15.
6. Yusubov F.V., Bayramova A.S. Modeling of a heat-and-mass transfer at adsorption of the gas mixtures in a transitional mode // Engineering-physical journal. – Byelorussia, Minsk, 2019. – V. 92. – № 1. – P. 120–127.