

УДК 677

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ МАССОПЕРЕДАЧИ  
ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ХЕМОСОРБЦИИ И СУШКИ ЛЕНТОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**THE USE OF THE GENERALISED EQUATION FOR MASS TRANSPORT  
FOR THE PROCESSES OF A CHEMISORPTION  
AND DRYING OF BAND MATERIALS**

В.А. РЕУТСКИЙ Б.С. САЖИН  
V.A. REUTSKY, B.S. SAZHIN

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)  
(Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")  
E-mail: office@msta.ac.ru

*Предложенный обобщенный аналитический метод расчета процессов хемосорбции позволяет осуществлять расчет хемосорбционной обработки ленточных материалов на основе единого уравнения без разделения аппарата на зоны в зависимости от области протекания процесса хемосорбции.*

*The offered generalised analytical method of calculation of the chemisorption processes allows to make accounts of chemisorption treatment of band materials on the basis of the integrated equation without separation of the apparatus into zones depending on area of the chemisorption process.*

**Ключевые слова:** обобщенное уравнение массопередачи, процесс хемосорбции, массообмен, кинетическая кривая.

**Keywords:** a generalised equation of mass transport, chemisorption process, mass exchange, a kinetic curve.

Обобщенное уравнение массопередачи, известное в специальной литературе как «уравнение Сажина-Реутского», является базовым в новой теории массопередачи и успешно применяется во многих технологических (в том числе сорбционных) процессах химической, текстильной и других отраслях промышленности. Оно позволяет

рассчитывать все процессы без их деления на периоды или зоны.

В настоящей статье обобщенное уравнение массопередачи использовано для расчета процессов хемосорбции и сушки ленточных материалов.

Для расчета процессов хемосорбции применяются численные, численно-графи-

ческие и аналитические методы, основанные на разделении хемосорбционного аппарата на отдельные участки – зоны. Недостатками всех этих методов являются их громоздкость и большой объем исходной информации, необходимой для расчета процесса (кинетическое уравнение реакции, сопровождающей процесс абсорбции, и его параметры, величина удельной поверхности контакта фаз, коэффициенты массоотдачи в газовой и жидкой фазе, величина коэффициента ускорения и ее зависимость от состава фаз, параметры границ раздела между стадиями - зонами и др.). Большая часть необходимых для расчета параметров может быть определена лишь грубо приближенно с погрешностями порядка 30...50%, а в ряде случаев и более. Для многих процессов хемосорбционной обработки значительная часть необходимой информации вообще отсутствует.

Разработанный нами метод расчета процессов хемосорбции, основанный на использовании обобщенного уравнения массопередачи, требует минимального объема исходной информации о процессе.

В основу метода положены следующие представления и допущения. Профили изменения концентраций реагентов по длине аппарата, как показывает опыт, имеют вид S-образных кривых (двойных экспонент) или простых экспонент, обращенных выпуклостью вверх или вниз. Конечные участки S-образных профилей стремятся к своим асимптотам. Форма профилей (положение точки перегиба, крутизна среднего участка, симметричность или асимметричность расположения конечных участков) определяется удаленностью асимптот от концевых точек конечных участков профилей концентраций. Простые экспоненты можно рассматривать как вырожденные S-образные кривые, образующиеся при большом удалении одной из асимптот от соответствующего конечного участка профиля концентраций. Положение асимптот профилей концентраций определяется начальным и конечным состоянием хемосорбционной системы, то есть фазовым равновесием между газом и жидкостью на

входе в хемосорбционный аппарат и на выходе из него. При этом ниже точки перегиба сопротивление массо-обмену по мере удаления от этой точки все в большей степени сосредоточивается на стороне одной фазы, а выше точки перегиба – на стороне другой. Скорость протекания процесса хемосорбции в любом сечении хемосорбционного аппарата определяется как верхним, так и нижним состоянием равновесия.

Учитывая, что газовая и жидкая фазы движутся в ленточном хемосорбционном аппарате в режиме, близком к идеальному вытеснению, для математического описания процесса хемосорбции можно использовать уравнение:

$$q = -bG \frac{dC_A}{dh} = L \frac{dC_B}{dh} = K(C_A - A)(C_B - B), \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент скорости процесса, предполагаемый постоянным по высоте хемосорбционной колонны;  $C_A$  – концентрация поглощаемого компонента в газовой фазе;  $C_B$  – концентрация активной части абсорбента в жидкой фазе;  $G, L$  – нагрузки по газу и жидкости соответственно;  $h$  – текущая высота хемосорбционного аппарата;  $b$  – стехиометрический коэффициент, показывающий, какое число молей активной части абсорбента взаимодействует с одним молем поглощаемого компонента;  $q$  – скорость хемосорбции.

Концентрации реагентов и нагрузки хемосорбционного аппарата по газу и жидкости могут быть выражены различным образом в зависимости от конкретной постановки задачи. Под равновесной концентрацией  $A$  подразумевается концентрация поглощаемого компонента в газовой фазе, равновесная фактической концентрации активной части абсорбента на входе жидкой фазы в хемосорбционную колонну. Под равновесной концентрацией  $B$  подразумевается концентрация активной части абсорбента, равновесное давление поглощаемого компонента которой равно фактической концентрации в газовой фазе на входе газа в аппарат. В случае процессов хемосорбции, в которых активной ча-

стью абсорбента является вода (процессы получения кислот), обозначения равновесных концентраций изменяются на противоположные, а правая часть уравнения (1) принимает вид:  $K(A - C_B)(C_A - B)$  ( $C_B$  – концентрация образующейся кислоты). Для определения высоты хемосорбционного аппарата достаточно проинтегрировать уравнение (1) [диаметр колонны определяется требуемой производительностью, поэтому для унификации расчетов процесса хемосорбции уравнение (1) составлено применительно к хемосорбционному аппарату с величиной поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ ]. Для этой цели можно воспользоваться методом разделения переменных и уравнением рабочей линии, связывающим между собой концентрацию активной части абсорбента и поглощаемого компонента:

$$C_A = M - NC_B, \quad (2)$$

где  $M$  и  $N$  – параметры уравнения рабочей линии, определяемые условиями проведения процесса хемосорбции (нагрузками колонны по газу и жидкости и концентрациями поглощаемого компонента и активной части абсорбента на входе или на выходе из хемосорбционной колонны). В результате интегрирования уравнения (1) с учетом уравнения (2) получим:

$$h = \frac{L}{KN(A' - B)} \ln \left[ \frac{(A' - C_B)(C_B - B)}{(A' - C_{B_0})(C_B - B)} \right], \quad (3)$$

где  $A' = (M/N) - (1/N)A$ ;  $C_{B_0}$  – концентрация активной части абсорбента на входе в хемосорбционную колонну.

Коэффициент скорости  $K$ , входящий в уравнения (1) и (3), может быть рассчитан различным образом в зависимости от располагаемой информации о процессе. Если известна скорость процесса хемосорбции, хотя бы в одной точке (для произвольного сечения хемосорбционной колонны), то для определения  $K$  известная скорость подставляется в левую часть уравнения (1) и полученное таким образом уравнение разрешается относительно  $K$ . Если известна высота, необходимая для достиже-

ния определенной степени извлечения поглощаемого компонента, то эта высота подставляется в уравнение (3), из которого и находится искомая величина  $K$ . Таким образом, исходная информация, необходимая для расчета процесса хемосорбции, включает в себя лишь данные по фазовому равновесию и данные о скорости процесса для одного из сечений хемосорбционного аппарата, либо данные о размерах хемосорбционного аппарата, требующихся для достижения определенной степени извлечения поглощаемого компонента.

Предложенный обобщенный аналитический метод расчета процессов хемосорбции позволяет производить расчет хемосорбционной обработки ленточных материалов на основе единого уравнения без разделения аппарата на зоны в зависимости от области протекания процесса хемосорбции.

Обобщенное уравнение массопередачи можно успешно использовать в других технологических процессах, например для сушки тканей.

В настоящее время процесс сушки различных материалов независимо от способов сушки принято делить на три последовательных периода: начальный – прогрев материала, постоянной скорости сушки и убывающей скорости сушки. Применительно к процессу сушки обобщенное уравнение массопередачи можно представить в виде:

$$q = Ku(Au - U)(U - Vu), \quad (4)$$

где  $Ku$  – эффективный коэффициент скорости сушки;  $Au$ ,  $Vu$  – равновесные влажности высушиваемого материала на входе в сушильную камеру (в начале процесса сушки) и на выходе из нее (в конце процесса сушки).

Начальная равновесная влажность материала  $Au$  по физическому смыслу представляет собой влажность, достигаемую материалом после завершения периода прогрева, когда температура сушильного агента достигает температуры мокрого термометра. При этом предполагается, что в период прогрева влага частично испаря-

ется, вследствие чего  $A_u$  всегда меньше начальной влажности материала  $U_0$ . Разность между обеими величинами тем больше, чем выше температура сушильного агента.

Все три величины ( $K_u$ ,  $A_u$  и  $B_u$ ), входящие в уравнение (4), легко определяют-

$$\tau = \frac{M}{K_u(A_u - B_u)} \ln \left[ \frac{(A_u - U_k)(U_0 - B_u)}{(A_u - U_0)(U_k - B_u)} \right] = \frac{M}{K(U_0 - B_u)} z', \quad (5)$$

где  $U_0$ ,  $U_k$  – соответственно начальная и конечная влажность материала;  $z'$  – безразмерный концентрационный комплекс.

$$\tau = \frac{M}{K'u(A_u - B_u)} \ln \left[ \frac{(U_0 - U_k)(A_u - B_u)}{(U_0 - A_u)(U_k - B_u)} \right] = \frac{M}{K'(U_0 - B_u)} z'. \quad (6)$$

Коэффициент скорости сушки можно представить в виде:

$$B_2 = K'u(U_0 - U). \quad (7)$$

Из уравнения (6) следует, что на графике в координатах  $\tau - z$  зависимость продолжительности сушки от безразмерного комплекса  $z$  должна представлять собой прямую линию, проходящую через начало координат с тангенсом угла наклона, равным коэффициенту перед знаком логарифма. Положение прямой относительно начала координат характеризуется величиной  $A_u$ , а степень прямизны – правильностью определения равновесной концентрации  $B_u$ . После определения истинного значения параметра  $B_u$  истинное значение  $A_u$  определяется из формулы:

$$A_u = (U_0\psi - B_u)/(1 + \psi), \quad (8)$$

$$\psi = \exp(Z_0) \frac{(A_u - B_u)}{(U_0 - A_u)}. \quad (9)$$

ся по экспериментальным кривым кинетики сушки. В результате интегрирования уравнения (4) можно получить уравнение для определения общей продолжительности процесса сушки (без деления процесса на периоды) при  $A_u > U_0$ :

При  $A_u < U_0$  уравнение (5) принимает вид:

По найденному ранее углу наклона прямой рассчитывают значение  $K_u$ .

Анализ обобщенного уравнения массопередачи в сочетании с экспериментальными данными показывает, что для конкретных условий ведения процесса кинетическая кривая может «вырождаться» и принимать вид части S-образной кривой. В зависимости от этого задачи массообмена можно классифицировать следующим образом: внешняя задача (когда кинетическая кривая отражает только верхнюю ветвь S-образной кривой (до точки перегиба), внутренняя задача массообмена (кинетическая кривая соответствует участку S-образной кривой после точки перегиба) и смешанная задача массообмена, когда на кинетической кривой имеется точка перегиба.

Рекомендована кафедрой процессов, аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 01.02.11.