

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАССООТДАЧИ И МАССОПРОВОДНОСТИ ИЗ КРИВЫХ КИНЕТИКИ

THE DETERMINATION OF MASS TRANSFER AND MASS CONDUCTIVITY COEFFICIENTS FROM THE KINETIC CURVES

С.П. РУДОБАШТА, М.К. КОШЕЛЕВА
S.P. RUDOBASHTA, M.K. KOSHELEVA

(Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева,
Московский государственный университет дизайна и технологии)
(Russian State Agrarian University named after K.A. Timiryazev,
Moscow State University of Design and Technology)
E-mail: rudobashta@mail.ru, oxtpaxt@yandex.ru

Предложены новые методы определения коэффициентов массоотдачи и массопроводности процессов в системах с твердой фазой из кинетических кривых. Коэффициенты массопроводности определяются в зависимости от массосодержания распределяемого компонента методом, не требующим реализации внутридиффузионного кинетического режима, что существенно упрощает эксперимент. Проведен анализ кинетики промывки плотной шерстяной ткани от технологического загрязнения, определены коэффициенты массоотдачи и массопроводности, которые могут использоваться в кинетических расчетах процесса промывки тканей данной группы.

New methods of determining the mass transfer and mass conductivity coefficients of the processes in systems with solid phase from the kinetic curves were proposed. The coefficients of mass conductivity are determined depending on mass of the distributed component by the method which does not require of the implementation of internal diffusion kinetic regime, which greatly simplifies the experiment. The analysis of the kinetic of washing of the thick woolen cloth from the technological pollution was held, the coefficients of mass transfer and mass conductivity, which can be used in the calculation of the kinetics of process of washing fabrics of this group were determined.

Ключевые слова: системы с твердой фазой, кинетика, методы определения коэффициентов массоотдачи и массопроводности, промывка плотной шерстяной ткани.

Keywords: systems with solid phase, kinetic, methods of determining the mass transfer and mass conductivity coefficients, washing of the thick woolen cloth.

Для расчета кинетики массообменных процессов в системах с твердой фазой (сушка, адсорбция, экстрагирование) необходимы данные по коэффициентам массоотдачи и массопроводности. В настоящее время эти коэффициенты находят опытным путем, что связано с опреде-

ленными трудностями. Отсутствие данных по ним затрудняет кинетический расчет. Сложность экспериментального определения этих коэффициентов связана с проблемой измерения локальных концентраций и с зависимостью коэффициента мас-

сопроводности от концентрации распределяемого вещества.

Для расчета коэффициента массоотдачи β_c из опытной кривой кинетики необходимо, чтобы процесс лимитировался внешней диффузией и чтобы была известна концентрация распределяемого вещества у поверхности тела. Такая ситуация имеет место, например, при конвективной сушке в первом периоде или при растворении твердого тела. В первом случае концентрация пара у поверхности твердой фазы может быть определена по температуре мокрого термометра, а во втором – как концентрация насыщенного раствора. В [1], [2] приведен зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации распределяемого вещества в твердой фазе из кривой кинетики, который, однако, требует исключения внешнего диффузионного сопротивления. Известен метод определения коэффициента массопроводности из кривой кинетики – среднего по всему диапазону концентраций распределяемого вещества в твердой фазе, который нашел применение в технологии текстильных материалов [3], но он тоже должен реализовываться при числе Био массообменном $Bi_m \rightarrow \infty$.

Целью данной работы является разработка методов определения коэффициента массоотдачи и концентрационной зависимости коэффициента массопроводности из кривой кинетики процесса, не требующих в последнем случае выполнения условия отсутствия внешнего диффузионного сопротивления.

Кривая кинетики процесса в системе с твердой фазой, как правило, содержит два периода: первый период, в котором процесс лимитируется внешней диффузией, и второй период, в котором внутридиффузионное сопротивление оказывает влияние на кинетику процесса. Запишем уравнение массоотдачи для рассматриваемого процесса:

$$i_n = \beta_c (C_{c,п} - C_c), \quad (1)$$

где i_n – плотность потока распределяемого вещества, $кг/(м^2 \cdot с)$; β_c – коэффициент массоотдачи, $м/с$; $C_{c,п}$, C_c – концентрация распределяемого вещества во внешней фазе соответственно у поверхности тела и в ядре потока, $кг/м^3$.

Плотность потока распределяемого вещества i_n у поверхности тела связана со скоростью процесса $-(d\bar{u}/d\tau)$ соотношением:

$$i_n = -(d\bar{u}/d\tau)R_v\rho_0, \quad (2)$$

где \bar{u} – среднееобъемное массосодержание тела в момент времени τ ; $-(d\bar{u}/d\tau)$ – скорость процесса в момент времени τ , $1/с$; $R_v = V/F$ – отношение объема тела к его поверхности ($R_v = R$ – для пластины, $R/2$ – для цилиндра, $R/3$ – для шара), $м$; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, $кг/м^3$.

Пусть точка К разграничивает первый и второй периоды на кривой кинетики $\bar{u}=f(\tau)$. В первом периоде кинетики (до точки К на кривой кинетики) скорость процесса $-(du/d\tau)_1 = N = const$. Это означает, что процесс лимитируется внешней диффузией, причем у поверхности тела поддерживается постоянная концентрация распределяемого вещества, которая в случае сушки определяется температурой мокрого термометра, а в случае экстрагирования равна концентрации насыщенного раствора. Последнее следует из того, что в соответствии с уравнениями (1) и (2) постоянная скорость процесса может иметь место только при $C_{c,п} = C_{нас} = const$, где $C_{нас}$ – концентрация насыщенного раствора, $кг/м^3$. В первом периоде кинетики $u(x) \approx \bar{u}$ и интенсивность внутреннего массопереноса достаточна, чтобы у поверхности тела поддерживать концентрацию насыщения во внешней фазе. В точке К (критическая точка) начинается второй период кинетики, в котором в случае экстрагирования концентрация распределяемого вещества у поверхности тела становится меньше $C_{нас}$ и при $\tau \leq \tau_{кр}$ ($\tau_{кр}$ – время достижения критического массосодержа-

ния) определяется функцией фазового концентрационного равновесия.

Для второго периода кинетики преобразуем правую часть уравнения массоотдачи (1), считая функцию концентрационного фазового равновесия линейной ($u_p = A_p C_c$), к виду:

$$i_n = \beta_c (C_{c,n} - C_c) = \beta_c^* (u_n - u_p), \quad (3)$$

где A_p – коэффициент распределения; $\beta_c^* = \beta_c / A_p$ – модифицированный коэффициент массоотдачи, кг/(м²·с).

Запишем для критической точки на основе (2) и (3) следующее равенство, обозначив скорость процесса в первом периоде $-(d\bar{u} / d\tau) = N$ и приняв $u_{n,кр} = \bar{u}_{кр}$:

$$NR_{\sqrt{\rho_0}} = \beta_c^* (\bar{u}_{кр} - u_p), \quad (4)$$

откуда имеем:

$$\beta_c^* = \frac{NR_{\sqrt{\rho_0}}}{(\bar{u}_{кр} - u_p)}. \quad (5)$$

Уравнение (5) может быть использовано для определения модифицированного коэффициента массоотдачи β_c^* из кривой кинетики и далее – для нахождения его истинного значения $\beta_c = \beta_c^* \cdot A_p$.

Рассмотрим далее определение концентрационной зависимости коэффициента массопроводности из кривой кинетики. Внутренний массоперенос в твердой фазе может быть описан уравнением массопроводности (эффективной диффузии) [1]:

$$i = -k \rho_0 \frac{\partial u}{\partial n}, \quad (6)$$

где n – нормаль к изоконцентрационной поверхности, м.

Аналитическое решение дифференциального уравнения массопроводности для неограниченной пластины, бесконечного цилиндра и шара при равномерном начальном распределении массосодержа-

ния применительно к его среднеобъемному значению $\bar{u}(\tau)$ при $u_n, k, \beta_c^*, R = \text{const}$ имеет вид [1]:

$$\bar{E} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{R^2} k \tau\right), \quad (7)$$

где B_n и μ_n – коэффициенты, зависящие от формы тела и числа Био массообменного модифицированного Bi_m .

Ряд в решении (7) быстро сходится и, начиная с некоторого момента времени, наступает регулярный режим, для которого величина \bar{E} описывается первым членом ряда:

$$\bar{E} = B_1 \exp\left(-\frac{\mu_1^2}{R^2} k \tau\right), \quad (8)$$

в котором предэкспоненциальный множитель B_1 является функцией числа Bi_m и формы тела, где

$$Bi_m = \frac{\beta_c^* R}{k \rho_0}. \quad (9)$$

Примем за начало отсчета второго периода точку K на кривой кинетики. Для нахождения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности $k = f(u)$ разбивают весь диапазон изменения массосодержания распределяемого вещества в твердой фазе от $\bar{u}_{кр}$ до \bar{u}_k (где \bar{u}_k – конечное массосодержание на опытной кривой кинетики) на n интервалов (концентрационных зон), для каждого из которых находят значение этого коэффициента, используя решение (8), справедливое в регулярном режиме. Область регулярного режима процесса массопроводности применительно к среднеобъемной концентрации в телах разной формы исследована в [4], на основе этих исследований построены графики, позволяющие обоснованно выбирать концентрационные интервалы [1], [4]. Обозначив в i -й концентрационной зоне $P_i = k_i \mu_{i,1}^2$, выразим этот

сомножитель из уравнения (8), переобозначив V_1 на V_1^* :

$$P_i = k_i \mu_{1,i}^2 = \frac{R^2}{\tau_i} \ln \frac{V_1^*}{\bar{E}_i}. \quad (10)$$

Решение (8) получено при условии, что начальная концентрация в теле равномерна, это справедливо только в 1-й концентрационной зоне, при этом $V_1^* = V_1$. Во второй и последующих зонах учет неравномерного начального распределения концентрации при зональном расчете приводит к условию $V_1^* \approx \gamma_i V_1$. В [1] приведены зависимости для поправочного коэффициента γ_i , учитывающего неравномерное начальное распределение концентрации во второй и последующих зонах.

Запишем далее характеристические уравнения решения (7) задачи массопроводности [1], заменив в них первые корни в концентрационных зонах $\mu_{1,i}$ на выражения $\mu_{1,i} = \sqrt{P_i/k_i}$:

- пластина

$$\operatorname{ctg}(\sqrt{P_i/k_i}) = \frac{\rho_0 \sqrt{P_i k_i}}{\beta_c^* R}; \quad (11)$$

- цилиндр

$$\frac{J_0(\sqrt{P_i/k_i})}{J_1(\sqrt{P_i/k_i})} = \frac{\rho_0 \sqrt{P_i k_i}}{\beta_c^* R}; \quad (12)$$

- шар

$$\operatorname{tg}(\sqrt{P_i/k_i}) = \frac{\rho_0 \sqrt{P_i k_i}}{k_i \rho_0 - \beta_c^* R}, \quad (13)$$

где J_0, J_1 – функции Бесселя первого рода, нулевого и первого порядка соответственно.

Таким образом, имеется четыре уравнения: (9), (10), одно из уравнений (11)...(13), зависимость $\mu_{1,i} = \sqrt{P_i/k_i}$, содержащие 4 неизвестных: $V_{1,i}, P_i, \mu_{1,i}, k_i$, что позволяет вычислить их при условии, что известны остальные величины, входящие в эти уравнения. Однако указанные уравнения алгебраически не разрешимы относительно искомых неизвестных, которые могут быть найдены только как корни уравнений. Предлагается следующая про-

цедура их нахождения: 1) задаются величиной V_1^* – в интервале $\bar{E}_i < V_1^* \leq 1$, 2) по уравнению (10) определяют P_i , 3) по одному из уравнений (11)...(13), соответствующему форме тела, находят значение k_i – как корень этих уравнений, 4) по соотношению (9) вычисляют $V_{1,m}$, 5) проверяют правильность задания V_1^* , при необходимости перезадают значение V_1^* и повторяют расчет – до совпадения предварительно принятых и найденных из расчета значений этого параметра.

Для иллюстрации предлагаемого метода определения кинетических коэффициентов β_c^* и k_i рассмотрим кинетическую кривую, полученную при промывке плотной шерстяной ткани в лабораторных условиях. Ткань имела поверхностную плотность $\rho_n = 0,780 \text{ кг/м}^2$, ширину 0,07 м, длину 0,5 м, толщину $2R = 0,006 \text{ м}$. Образец ткани фиксировался на направляющих роликах промывной установки в виде бесконечной петли. Линейная скорость перемещения петли, которая то погружалась в промывной раствор, то выходила из него, в опытах составляла 60 м/мин – как в промывной машине для плотных шерстяных тканей при соблюдении параметров технологического режима промывки [5...7]. Полученная экспериментальная кривая кинетики промывки типовой тонкосуконной шерстяной ткани (поверхностная плотность 780 г/м^2) приведена на рис. 1.

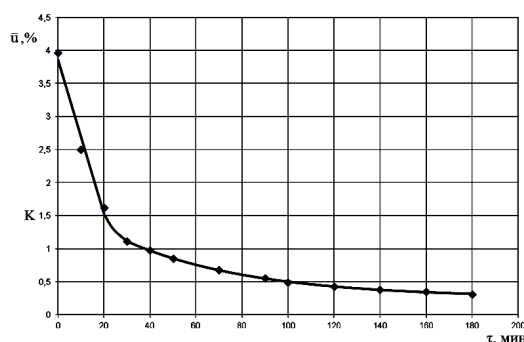


Рис. 1

Как видно из рис. 1, на первой стадии в течение 20 мин зависимость $\bar{u} = f(\tau)$ линейна, что характерно и для промывки других

тканей [7], [8]. Это свидетельствует о том, что процесс контролируется внешней диффузией и, следовательно, подчиняется уравнению массоотдачи (1). Из этого участка кривой кинетики по уравнению (5) был найден модифицированный коэффициент массоотдачи: $\beta_c^* = 0,60 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с). Соответствующий ему истинный коэффициент массоотдачи равен: $\beta_c = \beta_c^* A_p = \beta_c^* A'_p \epsilon / \rho_0$, где A'_p – коэффициент распределения функции равновесия, у которой концентрация распределяемого вещества в твердой фазе отнесена к объему внутрипоро-

вой жидкости, (кг/м³)/(кг/м³); ϵ – пористость твердой фазы, м³/м³. Принимая $\epsilon=0,5$, $\rho_0 = \rho_n / (2R) = 130$ кг/м³, получили: $\beta_c = 0,23 \cdot 10^{-5}$ м/с, что согласуется по порядку величин со значениями коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе [9].

Коэффициенты массопроводности определяли по приведенной выше методике, разбивая кривую кинетики при $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ на интервалы, приведенные в табл. 1 (расчет коэффициента k зональным методом для плотной шерстяной ткани).

Таблица 1

Номер концентрационной зоны	1	2	3
$(\bar{u}_{н.и} - \bar{u}_{к.и}) \cdot 10^2$, кг/кг с. м.	1,09-0,795	0,795-0,34	0,34-0,31
\bar{E}_i	0,643	0,444	0,605
$P_i \cdot 10^9$	3,315	3,22	2,00
$k_i \cdot 10^9$, м ² /с	1,69	1,62	1,39
μ_1	1,401	1,410	1,200
Vi_m	8,19	8,71	2,10

Как видно из табл.1, коэффициент массопроводности имеет порядок 10^{-9} , что согласуется по порядку величины со значениями этого коэффициента при экстрагировании целевых компонентов из твердой фазы [9]. С уменьшением концентрации загрязнений он несколько снижается. Это объясняется тем, что по мере развития процесса экстрагируются вещества, более прочно связанные со структурой тела. Величина числа Vi_m указывает на то, что в рассматриваемом процессе реализуется смешанно-диффузионный механизм массопереноса, при котором на скорость процесса влияют как внутреннее, так и внешнее диффузионные сопротивления. Более низкие значения величин k_i и Vi_m в третьей зоне объясняются также погрешностью вычислений из-за близости конечного массосодержания к равновесному значению.

ВЫВОДЫ

1. Для массообменных процессов в системах с твердой фазой предложены методы определения коэффициентов массоотдачи и массопроводности (последнего в

функции от массосодержания распределяемого вещества) из кривой кинетики.

2. Метод определения $k = f(\bar{u})$ из кривой кинетики не требует реализации внутридиффузионного кинетического режима, что существенно упрощает эксперимент.

3. Выполнен анализ кинетики промывки плотной шерстяной ткани, на основе которого получены данные по коэффициенту массоотдачи и массопроводности, показывающие "работоспособность" предложенных методов.

4. Показано, что при промывке плотной шерстяной ткани на скорость процесса влияют как внутреннее, так и внешнее диффузионные сопротивления.

5. Полученные данные по коэффициентам массопереноса могут быть использованы в кинетических расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудобаица С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980.
2. Очнев Э.Н., Рудобаица С.П., Плановский А.Н., Дмитриев В.М. Зональный метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации // Теоретические основы химической технологии. – 1975. Т. IX. № 4. С. 491...495.

3. Мельников Б.Н., Виноградова Г.И. Применение красителей. – М.: Химия, 1986.

4. Плановский А.Н., Рудобашта С.П., Кормильцин Г.С. Определение области регулярного режима в задачах массопроводности // Теоретические основы химической технологии. – 1972. Т. VI. № 3. С.459...462.

5. Кошелева М.К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счет совершенствования технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005, №2. С. 100...105.

6. Кошелева М.К., Сучков А.Ф., Реутский В.А. Договор №17926/03 о продаже ЗАО "Московская тонкосуконная фабрика имени Петра Алексеева" лицензии на использование патента РФ №2100501 "Способ жидкостной обработки шерстяных тканей после крашения", 01.02.2003.

7. Кошелева М.К., Кереметин П.П., Булекова А.А., Наумов Д.А. Анализ плотных шерстяных тканей как объекта технологической обработки и интенсификация процесса их отделки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, №2. С.118...121.

8. Кошелева М.К., Щеголев А.А., Шацких С.Н., Апалькова М.С. Интенсификация процессов промывки с наложением ультразвуковых полей // Изв.вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, №3. С.113...117.

9. Аксельруд А.А., Лысянский В.М. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость. – Л.: Химия, 1974.

tracii // Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii. – 1975. Т. IX. № 4. S. 491...495.

3. Mel'nikov B.N., Vinogradova G.I. Primenenie krasitelej. – М.: Himija, 1986.

4. Planovskij A.N., Rudobashta S.P., Kormil'cin G.S. Opredelenie oblasti reguljarnogo rezhima v zadachah massoprovodnosti // Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii. – 1972. Т. VI. № 3. S.459...462.

5. Kosheleva M.K. Povyshenie proizvodstvennoj i jekologicheskoj bezopasnosti otdelocnogo proizvodstva tonkosukonnyh fabrik za schet sovershenstvovanija tehnologii // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2005, №2. С. 100...105.

6. Kosheleva M.K., Suchkov A.F., Reutskij V.A. Dogovor №17926/03 o prodazhe ЗАО "Moskovskaja tonkosukonnaja fabrika imeni Petra Alekseeva" licenzii na ispol'zovanie patenta RF №2100501 "Sposob zhidkostnoj obrabotki sherstjanyh tkanej posle krashenija", 01.02.2003.

7. Kosheleva M.K., Keremetin P.P., Bulekova A.A., Naumov D.A. Analiz plotnyh sherstjanyh tkanej kak ob"ekta tehnologicheskoj obrabotki i intensifikacija processa ih otdelki // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2007, №2. S.118...121.

8. Kosheleva M.K., Shhjogolev A.A., Shackih S.N., Apal'kova M.S. Intensifikacija processov promyvki s nalozheniem ul'trazvukovyh polej // Izv.vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, №3. S.113...117.

9. Aksel'rud A.A., Lysjanskij V.M. Jekstragirovanie. Sistema tverdoe telo-zhidkost'. – L.: Himija, 1974.

REFERENCES

1. Rudobashta S.P. Massoperenos v sistemah s tverdoj fazoj. – М.: Himija, 1980.

2. Ochnev Je.N., Rudobashta S.P., Planovskij A.N., Dmitriev V.M. Zonal'nyj metod opredelenija zavisimosti kojefficienta massoprovodnosti ot koncen-

Рекомендована кафедрой процессов, аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 20.05.15.