

О КОЭФФИЦИЕНТЕ СКОРОСТИ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОМЫВКЕ ТКАНЕЙ*

М.И. ДАВИДЗОН

(Ивановский государственный университет)

Для математического описания массопереноса при жидкостных обработках текстильных материалов можно использовать систему из двух дифференциальных уравнений в частных производных [1...4]. Одним из них является уравнение кинетики

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma(n - \alpha\beta), \quad (1)$$

где (в случае промывки) β – безразмерная концентрация вымываемого вещества в объеме капилляра; n – безразмерная концентрация вымываемого вещества на поверхности капилляра; α – величина, характеризующая равновесие (постоянная равновесия); γ – величина, характеризующая скорость десорбции; t – время.

Анализ показал [5], что длительность процесса промывки в наибольшей степени зависит от времени десорбции $\tau_c = 1/\gamma$. В то же время в научно-технической литературе отсутствуют какие-либо данные о численном значении величины γ , которую можно назвать коэффициентом скорости процесса массопереноса.

В настоящей работе предложен метод и определены численные значения коэффициента скорости процесса массопереноса γ при десорбции щелочи в результате промывки хлопчатобумажной ткани.

В основу метода положено использование упрощенного уравнения (1) и кривых кинетики промывки тканей. Уравнение (1) можно свести к форме

$$\gamma = \left| \frac{\partial n}{\partial t} \right|, \quad (2)$$

если предположить, что $\alpha\beta \ll n$ и $n=1$.

Поверхностная концентрация удаляемого вещества n меняется от единицы в самом начале процесса до величины, близкой к нулю, в конце промывки. Если принять [6], что в первом периоде промывки происходит замещение раствора в капиллярах промывной жидкостью, то концентрация удаляемого вещества в объеме капилляров материала близка к нулю в конце первого периода промывки. Таким образом, в конце первого периода промывки соблюдаются необходимые условия:

$$\alpha\beta \ll n \text{ и } n \approx 1.$$

При обработке экспериментальных данных вместо n обычно используется концентрация удаляемого вещества в ткани C' , отнесенная к массе сухой ткани, то есть

$$C' = m_3 / m_c, \quad (3)$$

где m_3 – масса удаляемого из ткани вещества; m_c – масса сухой ткани.

Необходимо найти связь между величинами, измеряемыми в экспериментах и входящими в уравнение (2) – прежде всего – между C' и n .

* Публикуется в порядке обсуждения

Безразмерную поверхностную концентрацию n можно выразить [4] в виде

$$n = m_n / m_0, \quad (4)$$

где m_n – масса удаляемого вещества на поверхности ; m_0 – масса удаляемого вещества на поверхности в начальный момент времени промывки.

Равенство (3) можно записать как

$$C' = m_3 / m_c = (m_n + m_v) / m_c, \quad (5)$$

где m_v – масса удаляемого вещества в объеме капилляра.

В конце первого периода промывки, когда произошло замещение пропиточного раствора промывным, $m_v \cong 0$, и следовательно,

$$C' = m_n / m_c. \quad (6)$$

Соответственно

$$m_n = C' m_c. \quad (7)$$

С учетом (7) равенство (4) можно записать в форме

$$n = C' \frac{m_c}{m_0}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (2) и продифференцировав, найдем

$$\gamma = \left| \frac{\partial n}{\partial t} \right| = \frac{m_c}{m_0} \left| \frac{\partial C'}{\partial t} \right|. \quad (9)$$

Покажем, что отношение $\frac{m_c}{m_0}$ можно выразить через начальную концентрацию вещества, удаляемого из ткани.

Ткань поступает на промывку (например, от щелочи) после выдержки в щелочном растворе до равновесного состояния (так принято при проведении экспериментов). Это означает, что начальное содер-

жание в ткани вымываемого вещества C'_0 можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} C'_0 &= (m_0 + m_v) / m_c = \\ &= (m_0 + m_0 / \alpha) m_c = \\ &= (m_0 / m_c) [(1 + \alpha) / \alpha], \quad (10) \end{aligned}$$

где постоянная равновесия $\alpha = m_n / m_v$.

При комнатной температуре ($t=22^\circ\text{C}$) по экспериментальным данным [7, 8] $\alpha=0,65$. Воспользовавшись приведенным значением α , из (10) найдем m_0 и подставим его в (9). Выражение для γ примет вид

$$\gamma = \frac{2,54}{C'_0} \left| \frac{\partial C'}{\partial t} \right|. \quad (11)$$

Зная начальную концентрацию удаляемого вещества в ткани C'_0 и скорость изменения C' в первом периоде, по экспериментальным данным можно вычислить коэффициент скорости процесса γ .

Очевидно, что как и α , коэффициент скорости процесса удаления вещества с поверхности γ зависит от температуры. Какие-либо данные (экспериментальные или теоретические) по определению функции $\gamma(T)$ скорее всего отсутствуют. Попытаемся предсказать вид функции $\gamma(T)$.

Переход частицы с поверхности в раствор можно представить в виде двух стадий. На первой стадии на поверхности образуется зародыш будущей частицы. На второй – частица переходит в раствор. На каждую из этих стадий требуется энергия перехода (энергия активации): энергия образования зародыша – E_1 и энергия перехода в раствор – E_2 . Процессы образования зародыша и перехода в раствор при данной температуре T независимы.

Вероятность образования зародыша W_1 равна

$$W_1 = A_1 \exp(-E_1/kT), \quad (12)$$

где k – постоянная Больцмана.

Вероятность перехода в раствор

$$W_2 = A_2 \exp(-E_2/kT). \quad (13)$$

Вероятности для независимых событий перемножаются, то есть вероятность того, что образовался зародыш и перешел в раствор, равна

$$W = A_1 A_2 \exp(-E_1/kT) \cdot \exp(-E_2/kT). \quad (14)$$

Учтем малость показателей экспонент. В этом случае экспоненты можно разложить в ряд, ограничившись линейным приближением. Выражение (14) можно упростить

$$W \cong A \{1 - (E_1 + E_2)/kT\} - [(E_1 + E_2)/2kT]^2, \quad (15)$$

где A – постоянная.

Таким образом, вероятность, а соответственно и $\gamma(T)$, имеет вид

$$\gamma = A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^2}, \quad (16)$$

где B и C – постоянные.

Для определения функции $\gamma(T)$ необходимо из эксперимента или каких-либо соображений найти три значения γ при соответствующих температурах. Из (16) следует, что при $T \rightarrow \infty$ γ стремится к некоторому асимптотическому значению.

В реальных технологиях температура изменяется в относительно узком диапазоне. При промывках водными растворами область изменения температуры ограничена 300...373°K.

Предположим, что при атмосферном давлении и температурах вблизи 273°K процесс промывки почти прекращается, а

именно $\gamma=0$ (вследствие недостаточности энергий для образования зародышей и их перехода в раствор). При температурах, близких к кипению воды (373°K), скорость процесса десорбции должна стремиться к некоторому предельному значению. Вероятно, это связано с тем, что с одной стороны, энергия в системе достаточна для образования множества зародышей и их перехода в раствор. С другой стороны, повышение температуры приводит к образованию в растворе зародышей с энергией, достаточной для того, чтобы достичь поверхности материала и сорбироваться на ней. То есть с ростом температуры увеличивается не только поток частиц от стенки (десорбция), но и поток частиц на стенку. И, если не отводить из ткани эти частицы, то процесс придет в равновесие и промывка станет невозможной. Мы приходим к выводу о существовании некоторого предельного значения у коэффициента скорости промывки γ при температурах, близких к кипению.

Для определения функции (16) в явном виде обратим внимание, что относительно $1/T$ уравнение (16) представляет собой параболу. Для параболы в точке экстремума

$$\frac{\partial \gamma}{\partial (1/T)} = 0, \text{ а при } T = 273^\circ\text{K } \gamma = 0. \text{ Тогда для}$$

определения численных значений постоянных A , B и C запишем три уравнения:

$$0 = A + B(1/T_1) + C(1/T_1)^2, \quad (17)$$

$$0 = B + 2C(1/T_2), \quad (18)$$

$$\gamma_2 = A + B(1/T_2) + C(1/T_2)^2, \quad (19)$$

где T_1 – температура, при которой $\gamma=0$; T_2 – температура, при которой γ принимает экстремальное (максимальное) значение.

Достаточно из экспериментов или каких-либо соображений найти одно значение γ_2 при температуре T_2 , чтобы решив систему (17...19), найти численные значения постоянных A , B и C .

Вычисления показали, что в явном виде функцию (16) можно записать так:

$$\gamma = 2430(1/T) - 450000(1/T)^2 - 2.83. \quad (20)$$

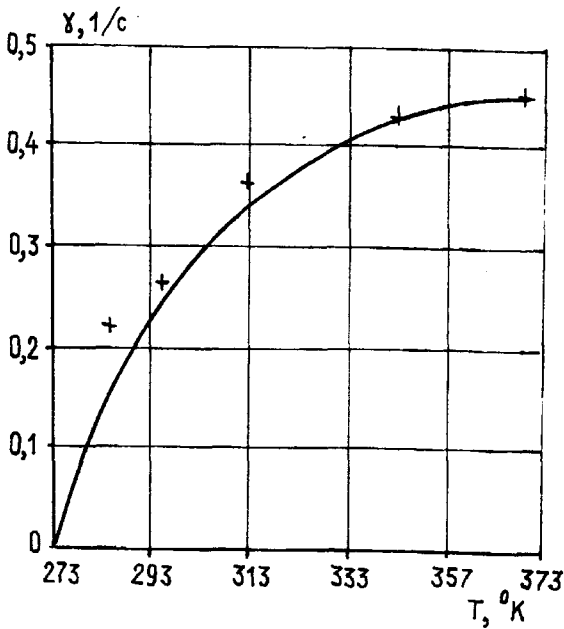


Рис. 1

На рис. 1 представлено сопоставление результатов расчета по уравнению (20) (сплошная линия) и значений $\gamma(+)$, полученных из экспериментальных кривых кинетики промывки [7]. По оси ординат отложена величина γ (в 1/с), по оси абсцисс – температура T (°K). Следует отметить хорошее совпадение результатов.

1. Предложен способ определения коэффициента скорости массопереноса γ по кинетическим кривым промывки текстильных материалов.

2. Определена зависимость γ от температуры. Получено достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидзон М.И., Маурин Л.Н. // Инженерно-физический журнал. – 1986, т.50, № 3.
2. Давидзон М.И., Маурин Л.Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1989, № 6.
3. Давидзон М.И., Маурин Л.Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1991, № 3.
4. Давидзон М.И. Массоперенос в капиллярах с поглощающими стенками. – Иваново: ИвГУ, 1992.
5. Давидзон М.И., Ивлиева С.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1997, № 5.
6. Смирнов В.И. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1984, № 6.
7. Щеголев А.А. Исследование способов интенсификации процесса промывки ткани в высокоскоростных промывных машинах: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МТИ, 1981.
8. Процессы промывки тканей и методы их интенсификации / Под ред. Б.С. Сажина, Ф.Л. Альтер-Песоцкого. – М., 1984.

Рекомендована кафедрой общей физики. Поступила 11.09.00.