

УДК 677.027.12 : 536

**О МАССОПЕРЕНОСЕ В ПРОТОЧНЫХ КАПИЛЛЯРАХ
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЕСОРБЦИИ**

М. И. ДАВИДЗОН, С. В. ИВЛИЕВА

(Ивановский государственный университет)

В текстильных технологиях широко распространены операции по удалению из пор материала и с его поверхности частиц красителя или других избыточных веществ для придания материалам тех или иных потребительских свойств (цвета, несминаемости, огнестойкости и др.). В основе этих операций лежит массоперенос вещества с поверхности капилляра в его объем и удаление во внекапиллярную среду. Явления, происходящие внутри капилляров, и механизм удаления вещества во внекапиллярный объем изучены крайне мало.

В настоящей работе путем моделирования процесса массопереноса на ЭВМ предпринята попытка рассмотреть способы удаления вещества из капилляров и их взаимосвязь со скоростью десорбции. Для численного моделирования процесса выбрана физическая модель, в которой пористый материал представлен в виде капилляра с эквивалентной длиной l и радиусом r . Раствор поступает в капилляр, поглощает удаляемые с поверхности частицы и уходит в промывную ванну. Принято, что модуль промывной ванны во много раз больше единицы.

Математически процесс описывается системой дифференциальных уравнений [1]:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{v}{l} \frac{\partial \beta}{\partial \bar{z}} = D \frac{\partial^2 \beta}{\partial \bar{z}^2} - \frac{\partial n}{\partial t},$$

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

где β — безразмерная концентрация вымываемого вещества в объеме капилляра;

t — время;

v — скорость конвекции;

\bar{z} — безразмерное расстояние от устья капилляра;

$z = \bar{z}l$;

z — координата в направлении длины;

D — коэффициент диффузии частиц вымываемого вещества в жидкости, заполняющей капилляр;

n — безразмерная поверхностная концентрация вымываемого вещества;

γ — величина, характеризующая скорость десорбции;

α — величина, характеризующая равновесие (постоянная равновесия).

Безразмерные концентрации можно интерпретировать: β — отношение массы удаляемого вещества, находящегося в объеме капилляра, к его массе на поверхности в начальный момент, n — отношение массы удаляемого вещества на поверхности к ее величине в начальный момент.

Приняв, что в начальный момент времени удаляемое вещество присутствует только на поверхности, то есть $n=1$, а на границах капилляра, находящихся в промывной жидкости, загрязнений нет, краевые условия запишем в виде

$$t=0: n=1, \beta=0,$$

$$\bar{z}=0, \bar{z}=1: n=0.$$

С целью численного решения задачи использовали метод конечных разностей. Применена неявная разностная схема. Программа составлена на языке Турбопэйсик. Расчеты выполнены на IBM-совместимом компьютере. Ввиду отсутствия в научно-технической литературе соответствующих экспериментальных данных выбор схемы и программа счета проверялись сопоставлением результатов численного счета с аналитическим решением системы уравнений (1) для случая быстрой диффузии, когда $l^2/D \ll 1$ [2]. Расхождений во всей области изменения $n(t)$ практически нет.

В рассматриваемой задаче выделим характерные времена: конвекции $\tau_k = l/v$, диффузии $\tau_D = l^2/D$ и десорбции $\tau_c = 1/\gamma$. Для частных случаев при преобладании одного из характерных времен получены решения в аналитической форме [1...3]; в других ситуациях обратимся к численному моделированию процесса.

В случае равенства характерных времен ($\tau_k = \tau_D = \tau_c$) время поступления удаляемых с поверхности частиц в объем капилляра, заполненного жидкостью, примерно равно времени их диффузии вдоль капилляра и времени их выноса во внекапиллярный промывной раствор конвективным путем.

Если численные значения характерных времен велики (более 10^6 с), процесс промывки практически не наблюдается. Не происходит со временем заметных изменений безразмерных поверхностной и объемной концентраций. По мере уменьшения характерных времен длительность промывки падает. Начиная с характерных времен, равных 100 с ($D = 10^{-8}$ м²/с, $v = 10^{-5}$ м/с, $\alpha = 1$, $\gamma = 10^{-2}$ 1/с, $l = 10^{-3}$ м), время процесса сокращается до 780 с.

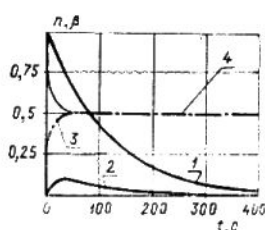


Рис. 1.

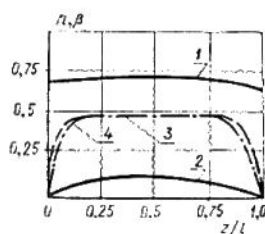


Рис. 2.

На рис. 1 показано изменение во времени в середине капилляра безразмерных поверхностной $n(t)$ (кривая 1) и объемной концентрации $\beta(t)$ (кривая 2), откуда следует, что убывание загрязнений с поверхности носит монотонный характер. По истечении 400 с на поверхности все еще остается удаляемое вещество. В объеме капилляра в начале процесса содержание удаляемого вещества растет, достигает максимума, а затем падает до нуля. Полагаем, что в начале промывки в рассматриваемых условиях идет процесс накопления удаляемых частиц в объеме материала (в капиллярах, заполненных жидкостью), которые затем, вследствие конвекции и диффузии, выносятся в промывную ванну.

На рис. 2 изображено изменение безразмерных поверхностной (кривая 1) и объемной (кривая 2) концентраций по длине капилляра (толщине материала) для момента времени 40 с после начала промывки. Видно, что удаление вещества с поверхности идет практически равномерно. В объеме капилляра масса удаляемого вещества имеет наибольшую концентрацию в середине капилляра и снижается до нуля на его границах.

Время удаления вещества с поверхности можно уменьшить, создав условия, при которых повышаются значения величин D , v , γ . Так, при $D = 10^{-7}$ м²/с, $v = 10^{-4}$ м/с, $\alpha = 1$, $\gamma = 10^{-1}$ 1/с вещество с поверхности можно удалить за 82 с. При $D = 10^{-6}$ м²/с, $v = 10^{-3}$ м/с, $\gamma = 1$ 1/с время процесса равно 11 с, а при $D = 10^{-5}$ м²/с $\alpha = 1$, $\gamma = 10$ 1/с вещество с материала толщиной 10^{-3} м можно удалить за 4 с.

Рассмотрим случай, когда характерные времена не равны. Десорбция вещества идет быстрее диффузии и конвективного переноса: $\tau_D =$

$=\tau_k \gg \tau_c$. Результаты расчетов при $D=10^{-10}$ м²/с, $v=10^{-7}$ м/с, $\gamma=10^{-1}$ л/с, $l=10^{-3}$ м представлены на рис. 1 и 2.

Поскольку десорбция с поверхности идет быстрее процесса удаления вещества во внекапиллярный объем ($\tau_c=10 \ll \tau_k=\tau_D=10^4$ с), наблюдается накопление вещества в капилляре до равновесного значения. Из рис. 1 (кривая 4) видно, что в течение небольшого промежутка времени концентрация вещества на поверхности быстро падает до $n \approx 0,5$, а затем массоперенос с поверхности прекращается. Объемная же концентрация интенсивно растет до значения $\beta=0,5$, а далее остается неизменной (кривая 3). Распределение удаляемого вещества по длине капилляра (толщине материала) показано также на рис. 2. При $t=40$ с вещество содержится на поверхности (кривая 3) и в объеме капилляра (кривая 4) по всей его длине, отсутствуя лишь на границах. Едва начавшись, процесс промывки как бы захлебывается, останавливается. Причем с ростом γ равновесие наступает быстрее и удаление вещества из капилляра прекращается раньше.

При росте значений D и v при том же значении γ концентрации n и β изменяются с течением времени аналогично, как и в случае равенства характерных времен. Однако процесс удаления вещества с поверхности во внекапиллярный объем протекает медленнее, чем в случае равенства характерных времен. Объяснить это можно тем, что при одном и том же времени десорбции (времени поступления удаляемого вещества с поверхности в объем капилляра) и при равенстве характерных времен удаление во внекапиллярный объем осуществляется диффузионным и конвективным путями с одинаковыми скоростями. В рассматриваемой ситуации удаление вещества из объема материала протекает с помощью тех же механизмов, но с более медленной скоростью.

Если время десорбции много больше равных между собой характерных времен диффузии и конвекции: $\tau_D=\tau_k \ll \tau_c$ (например, $\tau_D=\tau_k=10^2$ с, $\tau_c=10^3$ с), то характер кривых $n(t)$ и $\beta(t)$ отличается от рассмотренных ранее случаев. Убывание со временем безразмерной поверхностной концентрации $n(t)$ носит почти линейный характер, а $\beta(t)$ имеет значение, близкое к нулю. Такое поведение кривой $\beta(t)$ кажется естественным. В рассматриваемых условиях ($\tau_D=\tau_k \ll \tau_c$) частицы вещества, отрываясь от поверхности, быстро выносятся в промывную ванну и не накапливаются в объеме капилляра. Если время десорбции увеличить до $\tau_c=10^4$ с, то в течение 400 с $n(t)$ остается близким значению, равному единице, то есть удаление массы вещества с поверхности не наблюдается, а $\beta(t)$ по-прежнему близко к нулю.

Если время диффузии велико: $\tau_D \gg \tau_k=\tau_c$ (например, $\tau_D=10^4$ с, а $\tau_k=\tau_c=10$ с при $D=10^{-10}$ м²/с, $v=10^{-4}$ м/с, $\gamma=10^{-1}$ л/с, $a=1$, $l=10^{-3}$ м), то удаление материала десорбированных частиц из объема пор осуществляется в основном конвективным путем. Однако по толщине материала удаление десорбированных частиц идет неравномерно. На поверхности и в объеме максимальное содержание удаляемых частиц наблюдается вблизи одной из границ капилляра. По мере увеличения скорости от $v=10^{-6}$ до $v=10^{-2}$ м/с, что соответствует $\tau_k=10^3 \dots 10^{-1}$ с при $\tau_D=10^4$ с и $\tau_c=10$ с, скорость промывного раствора становится столь велика, что вещество, не успевая накапливаться в объеме, сразу же выносится наружу. Безразмерная концентрация β принимает нулевые значения, а n убывает со временем равномерно по длине капилляра. Процесс протекает довольно интенсивно.

На основании изложенного выше заключаем, что длительность про-

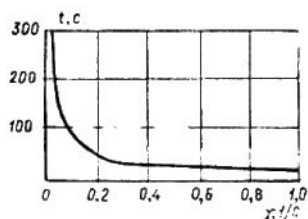


Рис. 3.

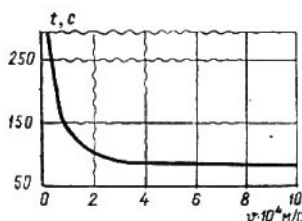


Рис. 4.

мывки определяется прежде всего значением постоянной десорбции γ и зависит от способа транспортировки вещества по капилляру (конвекции, диффузии).

На рис. 3 (ось ординат — время промывки, ось абсцисс — γ) представлены результаты расчетов по изучению влияния постоянной десорбции на длительность промывки при условиях: $l=10^{-3}$ м, $D=10^{-10}$ м²/с, $v=10^{-1}$ м/с, $\alpha=1$. В рассматриваемом случае диффузия массы вещества по капилляру идет очень медленно ($\tau_D=10^4$ с) и роль транспортного механизма выполняет конвекция ($\tau_K=10^{-2}$ с). При $\gamma=10^{-3}$ 1/с ($\tau_c=10^3$ с) вещество с поверхности капилляра десорбируется медленнее, нежели выносится во внекапиллярный объем (не успевает накапливаться в объеме). Но так как время десорбции велико, большим остается и время промывки. С ростом численного значения γ ускоряются перенос вещества с поверхности капилляра в объем и выведение массы вещества во внекапиллярное пространство. Следовательно, с увеличением γ время промывки стремится к нулю.

Влияние скорости v конвективного движения жидкости в капилляре на длительность промывки t представлено на рис. 4. Условия моделирования: $D=10^{-10}$ м²/с, $\gamma=10^{-1}$ 1/с, $\alpha=1$, $l=10^{-3}$ м. На первый взгляд, чем выше скорость движения жидкости в капиллярах текстильного материала, тем меньше время процесса промывки. Однако, как видно из рис. 4, с ростом скорости от нуля до значения 10^{-4} м/с время промывки действительно резко падает. Затем наблюдается уменьшение влияния v на процесс, а при достижении $v=10^{-3}$ м/с дальнейшее увеличение скорости не сокращает времени промывки. Такой характер кривой $t(v)$ объясняется следующим образом. После десорбции частиц с поверхности в объем капилляра, их удаление в промывную ванну осуществляется диффузией и конвекцией. Численный эксперимент проводился в условиях преобладания конвекции $\tau_K \ll \tau_D$. Отсюда видно, что вынос удаляемого вещества из капилляра происходит конвективным путем. При увеличении скорости до значения $v=10^{-4}$ м/с характерное время конвекции становится равным характерному времени десорбции $\tau_c=1/\gamma=10$ с. При дальнейшем увеличении скорости ($v=10^{-3}$ м/с) время конвекции становится меньше времени десорбции. Вынос частиц из объема капилляра идет быстрее, нежели их поступление с поверхности. Очевидно, что здесь увеличение скорости конвекции не приводит к ускорению промывки, то есть t с ростом скорости не меняется.

ВЫВОДЫ

1. Моделирование на ЭВМ массопереноса в проточных капиллярах показало, что десорбированное в объем капилляра вещество выносится

из капилляров диффузионным и конвективным путем. При разработке технологий промывки прежде всего необходимо принять меры для увеличения численного значения постоянной десорбции γ . Промывку следует вести так, чтобы характерное время десорбции было равным или незначительно превышало время конвекции (возможно диффузии).

2. При малых значениях времени десорбции (10^{-1} с), когда оно много меньше времени диффузии и конвекции, устанавливается равновесие между концентрацией вещества в объеме капилляра и на поверхности — едва начавшись, процесс промывки приостанавливается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидзон М. И. Массоперенос в капиллярах с поглощающими стенками. — Иваново. ИвГУ, 1992.
2. Давидзон М. И., Маурин Л. Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. — 1989, № 6. С. 84. . 86.
3. Давидзон М. И., Маурин Л. Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. — 1991, № 3. С. 86. . 89.

Рекомендована кафедрой общей физики. Поступила 07.04.97.
