

## **МАССООБМЕН В ПРОЦЕССАХ ОТДЕЛОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА ТЕКСТИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**М.К. Кошелева, Ю.А. Чабаева, А.П. Булеков.**

*Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина, г. Москва,  
Россия*

Представлено математическое описание процесса промывки хлопчатобумажных тканей, основанное на решении краевой задачи для уравнения диффузии с граничными условиями, моделирующими промывку ткани в высокоскоростных машинах башенного типа. Расчетные соотношения для интегральных характеристик качества целевого продукта при промывке получены в виде функциональных рядов. Теоретически и экспериментально обоснованы возможность и целесообразность повышения эффективности процесса промывки хлопчатобумажной ткани с помощью ультразвукового воздействия на промывной раствор и обрабатываемую ткань. Установлено, что применение ультразвука приводит к уменьшению общего сопротивления процессам массопереноса при промывке, при этом продолжительность процесса сокращается на 35%.

Промывка тканей – один из самых распространенных и энергоемких массообменных процессов отделочного производства в текстильной технологии. На реализацию процессов промывки расходуется значительное количество технологической воды (до 5 м<sup>3</sup>/час на одну промывную машину), до 40% электроэнергии и до 15-20% тепловой энергии, потребляемой отделочными фабриками. Кроме того, работа промывного оборудования сопровождается сбросом сточных вод и загрязнением окружающей среды моющими средствами. Все это неблагоприятным образом отражается на технологических и экологических показателях работы отделочного производства. Указанные недостатки становятся все более значимыми в условиях возрастания дефицита и удорожания энергетических и материальных ресурсов, а также все более жестких требований к экологической чистоте производственных установок.

Изложенное свидетельствует, что задача повышения эффективности работы промывного оборудования является актуальной. Одним из перспективных способов решения этой задачи является интенсификация промывки ткани с помощью ультразвукового воздействия на этот процесс. Положительный эффект этого воздействия обусловлен, главным образом, снижением диффузионного сопротивления переносу технологического загрязнения из ткани в промывной реактор. Практическая же реализация этого способа интенсификации процесса промывки связана с необходимостью экспериментального определения его режимных и конструктивных параметров, что возможно на основе соответствующего математического описания. Указанные исследования применительно к процессам промывки тонких хлопчатобумажных тканей с применением ультразвука и реализованы в работе. Выбор объекта исследования обусловлен значительной ролью и удельным объемом, занимаемым хлопчатобумажными тканями в отделочном производстве.

В основе предложенного математического описания процесса промывки тканей лежит диффузионная модель удаления частиц (незакрепленного красителя, щелочи, загрязнений и т.п.) из волокнистого субстрата. При таком подходе используются фундаментальные физические законы, что обуславливает как достоверность полученных на их основе результатов, так и возможность их использования для описания процессов массопереноса, непосредственно не связанных с текстильной технологией.

Разработанная математическая модель процесса промывки представлена в виде краевой задачи, граничные и начальные условия которой соответствуют гидродинамической

обстановке, реализуемой в высокоскоростных промывных машинах башенного типа. В этом случае обрабатываемая ткань может интерпретироваться как бесконечно тонкая пластина, а соответствующая одномерная краевая задача имеет вид (начало координат находится на одной из сторон ткани):

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$c(x, 0) = c_0 \quad (2)$$

$$D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = \beta (c|_{x=0} - c_p) \quad (3)$$

$$-D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \beta (c|_{x=\delta} - c_p) \quad (4)$$

В общем случае коэффициенты  $D$  и  $\beta$ , характеризующие диффузию распределяемого компонента внутри ткани и от ее поверхности в промывной раствор, а также равновесная концентрация загрязнения  $c_p$  на поверхности ткани зависят от текущей концентрации загрязнения в ткани  $c$ , от температуры процесса, технологических параметров промывного раствора. Все это обуславливает нелинейность и неоднородность сформулированной краевой задачи, а, следовательно, исключает возможность получения ее аналитического решения.

Введение новых переменных:

$$\tilde{c}(x, \tau) = c(x, \tau) - c_p \quad (5)$$

$$\theta = \int_0^t D(\tau) d\tau \quad (6)$$

позволяет учесть зависимость коэффициента диффузии  $D$  от параметров процесса и привести к однородному виду граничные условия (3)-(4). В новой системе координат  $\tilde{c} - \theta$  краевая задача (1)-(4) может быть решена методом Фурье [1] на интервале  $\Delta\theta$ , в пределах которого параметры  $D, \beta, c_p$  могут быть зафиксированы на их среднем уровне. Оценка степени соответствия указанных упрощений реальной обстановке в промывных машинах осуществляется сопоставлением решения задачи при сделанных допущениях экспериментальным данным. Такой подход к решению задачи (1)-(4) реализован в работе.

Полученное методом разделения переменных аналитическое решение сформулированной краевой задачи в исходной системе координат имеет вид:

$$c(x, \tau) = c_p + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \left( \lambda_n \frac{D}{\beta} \cos \lambda_n x + \sin \lambda_n x \right) \cdot \exp(-\lambda_n^2 D \tau) \quad (7)$$

Собственные числа задачи  $\lambda_n$  определяются трансцендентным уравнением:

$$\operatorname{tg}(\delta\lambda) = \frac{2(\delta\lambda)Bi}{(\delta\lambda)^2 - Bi^2} \quad (8)$$

Коэффициенты ряда  $b_n$  рассчитываются по формуле:

$$b_n = \frac{4}{\pi(2m-1)}(c_0 - c_p) \quad m \in N \quad (9)$$

Следует отметить, что в условиях реализуемых при промывке хлопчатобумажных тканей в промышленных условиях, массообменный критерий  $Bi = \beta\delta/D$  достигает значение  $10^{12}$  и более. В этих условиях собственные числа задачи определяются соотношением:

$$\lambda_n = \frac{\pi}{\delta}n \quad (n \in Z) \quad (10)$$

Решение (7) рассматриваемой краевой задачи в этом случае приводится к виду:

$$c(x, \tau) = c_p + \frac{4}{\pi}(c_0 - c_p) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \sin\left(\frac{(2n-1)\pi}{\delta}x\right) \exp\left(-\left(\frac{(2n-1)\pi}{\delta}\right)^2 D\tau\right) \quad (11)$$

Уравнение (11) является аналитическим решением краевой задачи для процесса промывки тканей при сформулированных в работе допущениях и позволяет рассчитать концентрацию распределяемого компонента в ткани в любой ее точке в зависимости от времени. На практике, экспериментальные данные для этого показателя обрабатываются в виде зависимости концентрации загрязнений во всей ткани от времени. Расчетное соотношение для показателя эффективности процесса промывки (средней концентрации загрязнения в ткани) может быть получено интегрированием уравнения (11) по толщине обрабатываемой ткани. После реализации этой процедуры и алгебраических преобразований искомое соотношение может быть представлено в виде:

$$\overline{c(x, \tau)} = c_p + \frac{8}{\pi^2}(c_0 - c_p) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot \exp\left(-\left(\frac{2n-1}{\delta}\pi\right)^2 D\tau\right) \quad (12)$$

Анализ ряда, входящего в уравнение (12) показывает, что он быстро сходится. Только при весьма малых значениях  $\tau$  несколько его слагаемых, следующих за первым членом, являются величинами того же порядка, что и первый. Кроме того, с увеличением  $\tau$  каждый член ряда существенно меньше по сравнению с предыдущим, и, следовательно, сумма ряда отличается от его первого члена на малую величину. Таким образом, при  $\tau \gg 1$ , что соответствует реальным условиям, средняя концентрация загрязнения в ткани определяется формулой:

$$\overline{c(x, \tau)} = c_p + \frac{8}{\pi^2} (c_0 - c_p) \cdot \exp\left(-\left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2 D \tau\right) \quad (13)$$

Соотношение (13), полученное на основе аналитического решения краевой задачи для процесса промывки, свидетельствует об экспоненциальном характере зависимости средней концентрации загрязнения в ткани от продолжительности промывки. Этот вывод хорошо согласуется с результатами анализа экспериментальных кривых промывки хлопчатобумажных тканей от загрязнений (в частности от щелочи) [2] и является обоснованием для аппроксимации экспериментальных кинетических кривых по промывке тканей зависимостью вида:

$$E(\tau) = \frac{\overline{c(x, \tau)} - c_p}{c_0 - c_p} = A \exp(-b \tau) \quad (14)$$

Наличие оценок параметров  $A$  и  $b$  зависимости (14) позволяет использовать ее в инженерной практике при проектировании и расчете промывных машин. Практическая реализация такого подхода к расчету процесса промывки основана на обработке экспериментальных кривых промывки методом наименьших квадратов.

Из общего решения краевой задачи процесса промывки (12) следует, что его скорость определяется уравнением:

$$\frac{d\overline{c}}{d\tau} = -\frac{8}{\delta^2} D (c_0 - c_p) \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{2n-1}{\delta} \pi\right)^2 D \tau\right) \quad (15)$$

Анализ уравнения (15) показывает, что при малых  $\tau$  ( $\tau < (4 \div 6)c$ ) и  $D = 10^{-9} \div 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, что соответствует условиям промывки хлопчатобумажных тканей, скорость промывки изменяется в соответствии в уравнением:

$$\frac{d\overline{c}}{d\tau} = -\frac{8D}{\delta^2} (c_0 - c_p) \quad (16)$$

Из уравнения (16) следует, что в начале процесса промывки его скорость постоянна (параметры  $D$  и  $c_p$  за малый промежуток практически не изменяются) и, следовательно, на кинетических кривых процесса промывки хлопчатобумажных тканей, должен присутствовать период практически постоянной скорости процесса. Это явление действительно наблюдается на экспериментальных кривых процесса промывки тканей, что послужило обоснованием для выделения в процессе промывки тканей, по аналогии с процессом сушки капиллярно-пористых тел, периодов постоянной и падающей скорости. При этом, исследователи, использующие такую методику расчета процесса промывки, не имея возможности обосновать период постоянной скорости с массообменной точки зрения, интерпретируют эту стадию как чисто механический процесс замены промежуточного раствора в ткани на промывной раствор. Уравнение (16), вытекающее из аналитического решения краевой задачи процесса промывки, свидетельствует о том, что искусственно

выделяемый период постоянной скорости в действительности является частью общего массообменного процесса, описываемого единым уравнением.

Одним из важных практических результатов, полученных на основе разработанной математической методики процесса промывки, является возможность оценки коэффициента диффузии распределяемого компонента в ткани.

Такая оценка возможна на основе уравнений (15)-(16) на любом участке кинетической кривой промывки. Для этого необходимо определить угол наклона касательной в заданной точке на экспериментальной кривой промывки. Алгоритм и процедура расчета коэффициента диффузии  $D$  представлены в [2, 3].

Анализ полученных расчетных соотношений для процесса промывки тонких хлопчатобумажных тканей показывает, что решающая роль в нем принадлежит диффузионным процессам. Следовательно, для интенсификации процесса следует стремиться увеличить значение коэффициента диффузии. Указанный эффект может быть достигнут за счет повышения температуры процесса, введения в промывной раствор химических веществ, повышающих его вязкость, воздействием на раствор физическими полями. Оценка эффективности этих мероприятий являлась одной из задач экспериментальной части исследования.

Опыты проводились на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1. Конструкция промывной ванны и контрольно-измерительной аппаратуры позволяли варьировать в достаточно широком диапазоне технологические параметры процесса промывки, а также предоставляли возможность исследовать влияние физических полей на характеристики процесса. В процессе экспериментов на установке моделировался технологический режим процесса промывки хлопчатобумажных тканей на башенных промывных машинах, являющихся одними из самых высокопроизводительных промывных устройств.

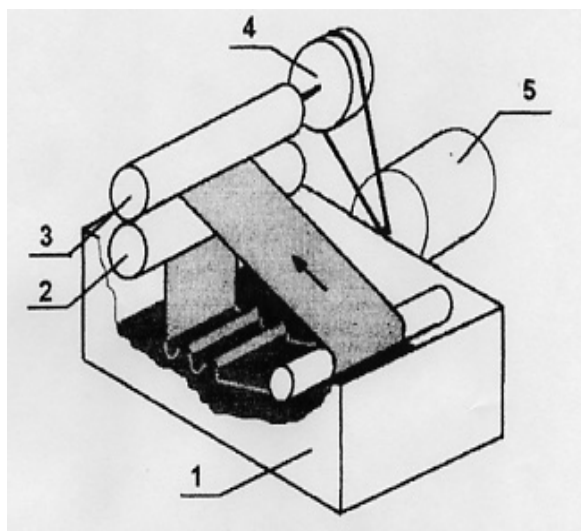


Рис 1. Схема лабораторной установки  
1 – съемная ванна, со встроенными источниками ультразвука; 2, 3 – рабочие валы; 4 – ведомый вал; 5 - электродвигатель

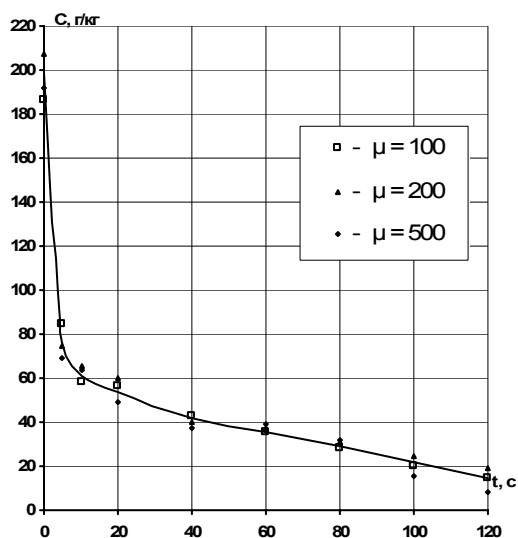


Рис.2. Кинетика промывки ткани

Скорость движения ткани относительно промывного раствора (воды) составляла 100 м/мин, модуль ванны изменялся в пределах от 100 до 500, температура промывного раствора

составляла 20<sup>0</sup>С. Концентрация загрязнения (щелочи) на ткани определялась методом обратного титрования.

На рис. 2 приведена типичная усредненная (по модулю ванны) кинетическая кривая промывки хлопчатобумажной ткани Миткаль. На основе экспериментальных кривых кинетики промывки получены зависимости степени промывки ткани от ее продолжительности. Последний показатель используется в инженерной практике в качестве оценки эффективности процесса и вычисляется по кинетической кривой.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о соответствии форм экспериментальных кривых уравнению (12), описывающему кинетику процесса промывки экспоненциальной зависимостью. Обработка экспериментальных данных на начальном участке ( $\tau < 5c$ ) в соответствии с уравнением (16), являющимся следствием общей зависимости (15) позволила получить оценки для коэффициентов диффузии  $D$  загрязнения в ткани. В исследованном диапазоне изменения режимных параметров процесса промывки легких хлопчатобумажных тканей можно принять следующую оценку для коэффициента диффузии:

$$D_0 = (2,6 \div 2,7) \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с} \quad (18)$$

Предварительная линеаризация (логарифмированием) уравнения (13) позволила получить оценку коэффициента диффузии на заключительной стадии промывки. Зональная обработка кинетических кривых в соответствии с формулой (16) позволила получить зависимость коэффициента диффузии от времени промывки. В процессе вычислений весь период промывки был разделен на 10 зон (периодов) размером в 10 с. Искомая зависимость удовлетворительно описывается формулой:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_n}\right) \quad (19)$$

Составной частью экспериментальных исследований являлись опыты по исследованию эффективности ультразвукового воздействия на промывку тканей. Практическое применение выбранного способа интенсификации процесса промывки, возможность и целесообразность использования которого обоснована на стадии предварительных исследований [3], связана с поиском как конструктивных, так и технологических параметров работы источника ультразвуковых колебаний.

Оптимальные значения указанных характеристик в работе устанавливались экспериментально.

Опыты проводились на лабораторной установке со съемными ваннами, в одной из которых были установлены два типовых пьезоэлектрических преобразователя и питающий их генератор. В опытах использовался также погружной ультразвуковой излучатель фирмы «Техносоник». Ультразвуковые устройства создавали акустические колебания ультразвуковой частоты в диапазоне 22 ÷ 35 кГц, при этом мощность установки составляла 70 ÷ 120 Вт. Выбор ультразвуковых устройств обусловлен простотой и доступностью их применения, что упрощает реализацию полученных результатов в производственных условиях. При проведении экспериментов и обработке их результатов использовались апробированные на стадии изучения кинетики промывки методики.

На рис. 3 приведены экспериментальные кривые, характеризующие влияние расстояния источника ультразвуковых колебаний от поверхности обрабатываемой ткани на концентрацию технологического загрязнения (щелочи) в ней. Результаты опытов

свидетельствуют о тесной корреляционной зависимости указанных параметров и позволяют определить оптимальное расстояние источника ультразвуковых колебаний до поверхности ткани. В исследованном диапазоне изменения параметров процесса оно составляет 5 мм.

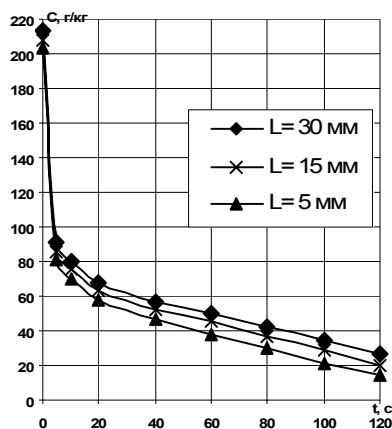


Рис. 3. Зависимость эффективности промывки ткани от месторасположения источника ультразвука

Обработка результатов эксперимента в соответствии с разработанной математической моделью процесса промывки показывает, что в наибольшей степени в количественном отношении ультразвуковое воздействие отражается на коэффициенте диффузии загрязнения в ткани, при этом продолжительность процесса промывки легких хлопчатобумажных тканей от щелочи сокращается в среднем на 35...60% в зависимости от модуля ванны. Интегральный эффект от применения ультразвукового воздействия промывки выражается в сокращении продолжительности процесса промывки для достижения требуемой остаточной концентрации загрязнения в ткани. Изучение влияния модуля промывной ванны на эффективность процесса промывки при ультразвуковом воздействии проводилось при оптимальном расстоянии источника излучения от поверхности ткани равном 5 мм. Анализ этих данных свидетельствует об усилении эффекта ультразвукового воздействия на течение процесса промывки легких хлопчатобумажных тканей с увеличением модуля ванн.

Обобщение результатов исследования влияния ультразвукового воздействия на эффективность процесса промывки легких хлопчатобумажных тканей позволяет сделать вывод о снижении общего сопротивления диффузионным процессам, обуславливающим перенос загрязнения из ткани в промывной раствор. В количественном отношении это явление отражается в увеличении коэффициента внутренней диффузии  $D$ , увеличении коэффициента массопереноса в жидкой фазе за счет турбулизации пограничного слоя у поверхности материала. Указанный эффект усиливается с ростом модуля ванны, что обусловлено увеличением движущей силы в процессе диффузии загрязнения от поверхности ткани в ядро промывного раствора.

Выявленное в процессе исследования положительное влияние ультразвукового воздействия на эффективность процесса промывки хлопчатобумажных тканей и найденные количественные характеристики явились основанием для разработки практических рекомендаций по его внедрению в производство. Установлены необходимые конструктивные и технологические характеристики типовой линии для мерсеризации и промывки, включающей шесть промывных машин башенного типа ВМБ-180-10. Для повышения эффективности промывки достаточно оборудовать ультразвуковым устройством последнюю промывную машину, и также ту, в которой промывка проводится с применением моющего средства. В качестве источника ультразвукового излучения используются четыре погружных пьезоэлектрических преобразователя ПП-25/8, устанавливаемых по два на двух

противоположных боковых стенках промывной ванны. Мощность ультразвукового устройства составляет 5 кВт/ч. Применение ультразвука при промывке на данной линии позволяет, в зависимости от характеристик ткани и параметров промывного раствора, исключить из рабочего цикла от 2 до 4 машин ВМБ-180-10, уменьшить энергозатраты на 15-20%. Использование ультразвука приводит также к снижению концентрации моющих средств, к уменьшению расхода чистой воды, объема и степени загрязненности сточных вод.

---

### **Обозначения**

$E$  – приведенная концентрация загрязнения в ткани;  $A$  и  $b$  – константы, подлежащие экспериментальному определению;  $\tau_n$  - длительность процесса промывки.

---

### **Литература**

1. Рудобашта С.П., Карташов Э.М.. Диффузия в химико-технологических процессах. – М.: Колос, 2010. – 478 с.
2. Кошелева М.К., Булекова А.А., Евсеева К.В., Паршин А.А Исследование процесса промывки хлопчатобумажных тканей при разных скоростях фильтрации промывного раствора // Успехи в химии и химической технологии: Сборник научных трудов; М., изд. РХТУ им. В.И. Менделеева. – 2006, т. 20, №10(68). – с. 61-65.
3. Кошелева М.К., Булекова А.А., Кереметин П.П., Наумов Д.А. Исследование и расчет диффузионных процессов в тонких волокнистых материалах и волокнообразующих полимерах // Химические волокна. – 2007, №3. – с. 92-96.