

**МАССОПРОВОДНОСТЬ ПРИ ЭКСТРАГИРОВАНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

М. К. Кошелева✉

*Кафедра энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии
и безопасности, oхtraxt@yandex.ru, ФГБОУ ВО «Российский государственный
университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия*

Ключевые слова: кинетика; массопроводность; промывка волокнистых материалов; шерстяная ткань; экстрагирование.

Аннотация: На основе экспериментальных кривых кинетики процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов в химической технологии их отделки определены кинетические коэффициенты массопроводности в зависимости от массосодержания материала. Для определения коэффициентов массопроводности использовался зональный метод и его модификация, не требующая специальных условий снятия кинетических кривых. Рассмотрены процессы удаления воскообразных веществ из хлопчатобумажных тканей при отварке, щелочи и красителя при промывке после мерсеризации и крашения, жировых загрязнений при промывке плотных шерстяных тканей. Коэффициенты массопроводности определены в зависимости от массосодержания распределяемого технологического компонента по кинетическим кривым. Полученные коэффициенты массопроводности могут быть использованы в кинетических расчетах процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов.

Введение

Для расчета массообменных процессов экстрагирования технологических загрязнений (незафиксированных красителей, поверхностно-активных веществ, щелочи, жировых веществ и др.) необходимо определение кинетических коэффициентов массопроводности. Зависимость данных кинетических коэффициентов от концентрации можно определять по снятым в специальных условиях кривым кинетики массообменного процесса [1 – 5].

В работе [2] приводится метод определения коэффициента массопроводности из кривой кинетики массообменного процесса, полученной без снятия внешнедиффузионного сопротивления. Кривая кинетики массообменного процесса экстрагирования технологических загрязнений (промывки) практически всегда содержит первый период, в котором процесс лимитируется внешней диффузией, и второй – где внутридиффузионное сопротивление оказывает влияние на кинетику процесса [1 – 7]. Концентрационная зависимость коэффициента массопроводности определяется из кривой кинетики удаления технологического загрязнения из волокнистого материала.

Внутренний массоперенос описывается уравнением массопроводности [2, 4]

$$i = -k\rho_0 \frac{\partial u}{\partial n}, \quad (1)$$

где k – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; u – среднеобъемное массосодержание материала в момент времени τ ; n – нормаль к изоконцентрационной поверхности, м ; ρ_0 – плотность абсолютно сухого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Цель работы – на основе экспериментальных кривых кинетики процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов в химической технологии их отделки определить кинетические коэффициенты массопроводности в зависимости от массосодержания материала.

Материалы и методы исследований

Аналитическое решение дифференциального уравнения массопроводности для неограниченной пластины, бесконечного цилиндра и шара при равномерном начальном распределении массосодержания имеет вид [2, 4, 5]

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

где B_n и μ_n – коэффициенты, зависящие от формы тела и числа Био массообменного модифицированного; R – определяющий размер тела, м ; τ – время, с .

Ряд в решении (2) быстро сходится и, начиная с некоторого момента времени, наступает регулярный режим, для которого величина \bar{E} описывается первым членом ряда [2, 4]

$$\bar{E} = B_1 \exp\left(-\frac{\mu_1^2}{R^2} k \tau\right). \quad (3)$$

При расчете за начало второго периода принимается точка K на кривой кинетики экстрагирования, которая разделяет первый и второй периоды, называется критической точкой и соответствует критическому массосодержанию $U_{\text{кр}}$.

Для нахождения концентрационной зависимости коэффициента массопроводности $k = f(U)$ весь диапазон изменения массосодержания технологического загрязнения в материале разбивается от $U_{\text{кр}}$ до $U_{\text{к}}$ (где $U_{\text{к}}$ – конечное массосодержание на экспериментальной кинетической кривой экстрагирования – промывки) на N интервалов (концентрационных зон). Для каждого из интервалов находится значение коэффициента массопроводности по решению, справедливому в регулярном режиме [2].

На рисунке 1 приведена лабораторная экспериментальная кинетическая кривая промывки плотной шерстяной ткани от жировых технологических загрязнений [6 – 8].

Коэффициенты массопроводности определяли по методике [2], разбивая кривую кинетики при $U < U_{\text{кр}}$ на концентрационные зоны, приведенные в табл. 1. Как видно из табл. 1, коэффициент массопроводности жировых технологических загрязнений k имеет порядок 10^{-9} , что согласуется по порядку величины со значениями этого коэффициента при экстрагировании различных компонентов из разных твердых материалов [4, 9 – 13].

На рисунке 2 представлены лабораторные кинетические кривые промывки, полученные при экстрагировании технологического загрязнения гидроксида на-

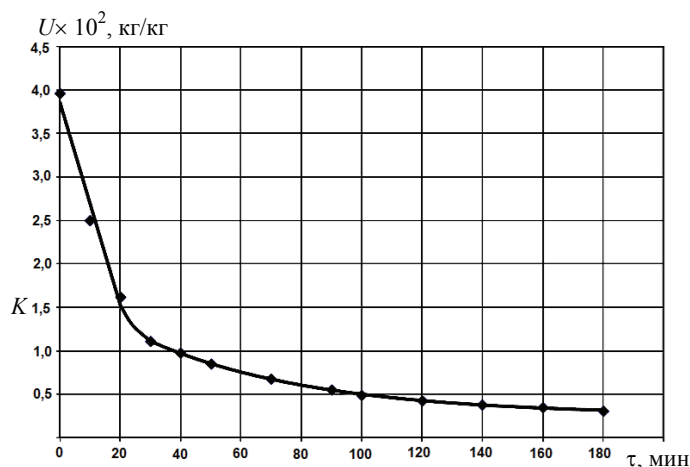


Рис. 1. Экспериментальная кривая кинетики промывки плотной шерстяной ткани (поверхностная плотность 780 г/м²)

Таблица 1

Коэффициенты массопроводности при экстрагировании жировых веществ из плотной шерстяной ткани

Параметр	Концентрационные зоны		
	1	2	3
Диапазон на кинетической кривой ($U_{нi} - U_{к,i}$) · 10 ² , кг/кг	1,509...0,795	0,795...0,34	0,34...0,31
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$, м ² /с	1,69	1,62	1,39

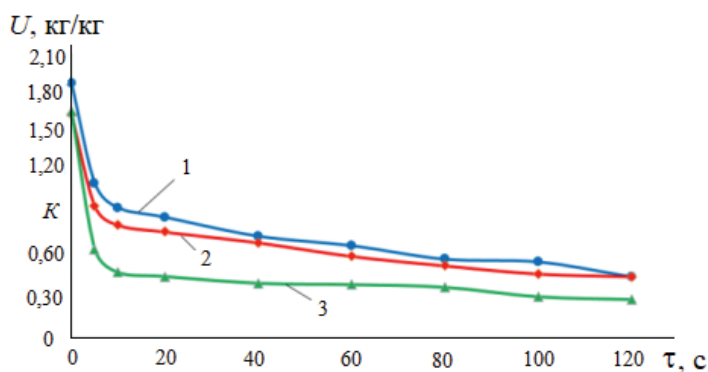


Рис. 2. Кинетика промывки хлопчатобумажных тканей различной плотности от гидроксида натрия при разных МВ:

1 – двунитка (МВ = 100); 2 – двунитка (МВ = 500); 3 – миткаль (МВ = 100)

трия из хлопчатобумажных тканей (ткань обрабатывается щелочью в процессе мерсеризации). Ткани отличались поверхностной плотностью, менялся модуль промывной ванны (МВ) (соотношение массы промывного раствора и массы ткани) [1, 3].

Коэффициенты массопроводности при экстрагировании гидроксида натрия из хлопчатобумажной ткани средней плотности (двунитка)

Параметр	Концентрационные зоны		
	1	2	3
Диапазон на кинетической кривой ($U_{ni} - U_{k,i}$), кг/кг	0,995...0,765	0,765...0,645	0,645...0,475
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$, м ² /с	1,258	0,534	0,486

Коэффициенты массопроводности определяли, разбивая кривую кинетики 3 при $U < U_{кр}$ на три интервала. В таблице 2 приведены рассчитанные по методике [2] коэффициенты массопроводности щелочи – гидроксида натрия, из хлопчатобумажной ткани. В процессе отварки из хлопчатобумажных тканей экстрагируется сложная смесь из углеводов, органических кислот, эфиров, спиртов, а также минеральные соли и воскообразные вещества.

Расчет коэффициентов массопроводности k зональным методом для хлопчатобумажной ткани при экстрагировании воскообразных веществ в процессе отварки проводился на основе экспериментальной кинетической кривой (рис. 3), при температуре 100 °С и концентрации гидроксида натрия в варочном растворе – 70 г/л [8].

В таблице 3 представлены кинетические коэффициенты массопроводности для процесса отварки при вышеприведенных параметрах процесса.

Кинетические коэффициенты массопроводности для процесса экстрагирования красителя из хлопчатобумажной ткани определялись на основании полученной в промышленных условиях кривой кинетики промывки от незафиксированного активного красителя, приведенной на рис. 4. На основании данной кривой получены значения коэффициентов массопроводности, приведенные в табл. 4.

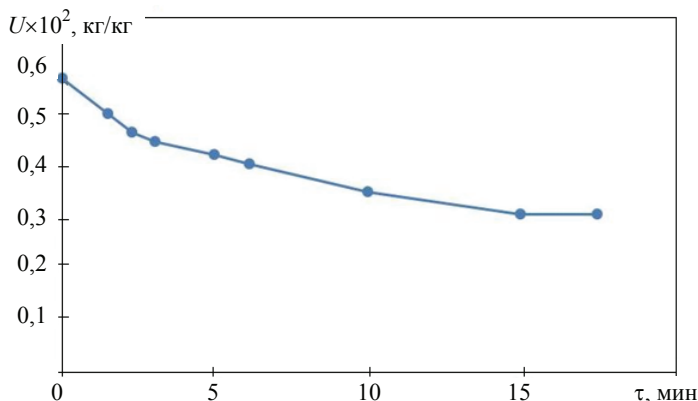


Рис. 3. Экспериментальная кривая кинетики процесса экстрагирования воскообразных веществ из хлопчатобумажной ткани

Таблица 3

Коэффициенты массопроводности при экстрагировании технологических загрязнений из хлопчатобумажной ткани в процессе отварки

Параметр	Концентрационные зоны		
	1	2	3
Диапазон на кинетической кривой ($U_{нi} - U_{к,i}$) · 10 ² , кг/кг	0,46...0,40	0,46...0,40	0,345...0,30
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$, м ² /с	0,0791	0,0978	0,0326

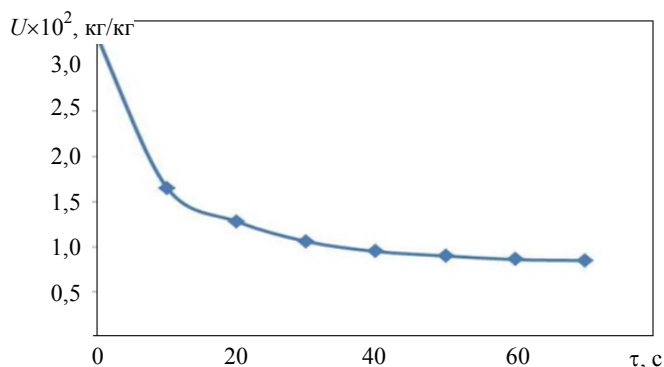


Рис. 4. Кинетика процесса промывки хлопчатобумажной ткани после крашения активным красителем

Таблица 4

Коэффициенты массопроводности при экстрагировании активного красителя из хлопчатобумажной ткани

Параметр	Концентрационные зоны		
	1	2	3
Диапазон на кинетической кривой ($U_{нi} - U_{к,i}$) · 10 ² , кг/кг	1,65...1,28	1,06...1,10	1,10...0,95
Коэффициент массопроводности $k_i \cdot 10^9$, м ² /с	1,506	1,124	0,642

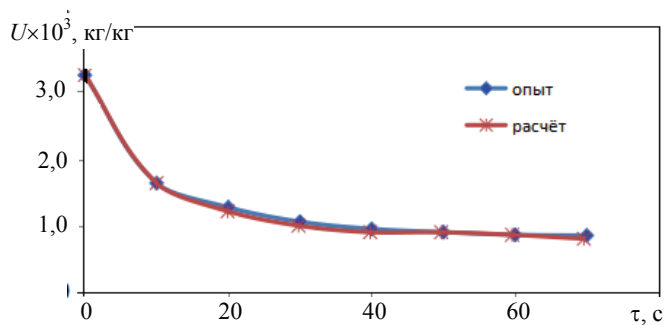
Результаты и обсуждения

На рисунках 5 приведены опытные и рассчитанные с использованием полученных коэффициентов массопроводности кривые кинетики экстрагирования различных технологических загрязнений (активного красителя, воскообразных веществ, щелочи) из хлопчатобумажных тканей. Опытные экспериментальные кинетические кривые снимались на лабораторных модельных установках [1, 3, 12, 13].

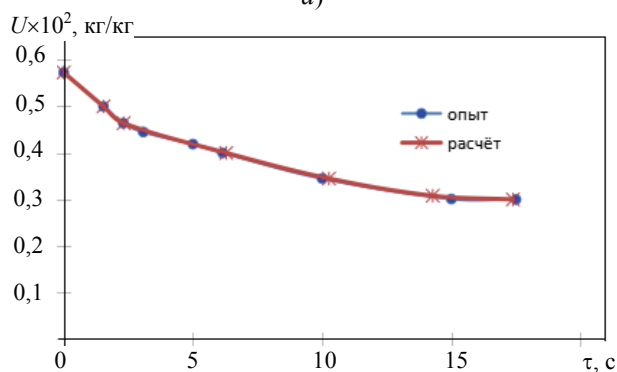
Расчет времени промывки осуществлялся зональным методом с использованием уравнения [2, 4, 11]

$$k_i \mu_{1,i}^2 = \frac{R^2}{\tau_i} \ln \frac{B_1^*}{E_i}. \quad (4)$$

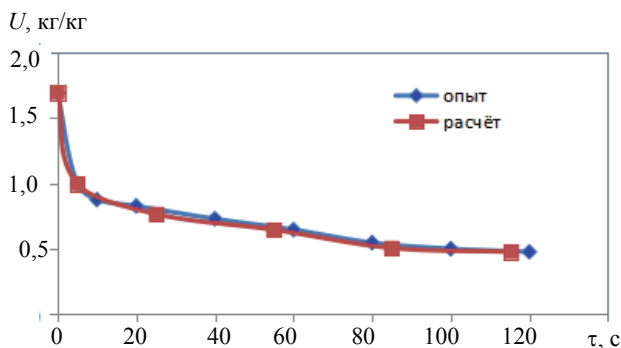
Очевидно хорошее совпадение опытных и рассчитанных зональным методом кинетических кривых экстрагирования различных технологических загрязнений из хлопчатобумажной ткани при проведении процессов промывки и отварки (см. рис. 5).



а)



б)



в)

Рис. 5. Кинетика экстрагирования активного красителя (а) воскообразных веществ (б), щелочи (в)

Заключение

На основе экспериментальных кривых кинетики процессов экстрагирования технологических загрязнений из волокнистых материалов в химической технологии их отделки при проведении процессов удаления из хлопчатобумажных тканей воскообразных веществ при отварке, при их промывке после обработки щелочью и после крашения, при промывке плотных шерстяных тканей от жировых загрязнений получены данные по коэффициентам массопроводности в зависимости от массосодержания ткани. Коэффициенты массопроводности могут быть использованы в кинетических расчетах процессов экстрагирования различных технологических загрязнений из волокнистых материалов.

Список литературы

1. Сажин, Б. С. Процессы сушки и промывки текстильных материалов : монография / Б. С. Сажин, М. К. Кошелева, М. Б. Сажина. – М. : Изд-во ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2013. – 301 с.
2. Рудобашта, С. П. Определение коэффициентов массопередачи и массопроводности из кривых кинетики / С. П. Рудобашта, М. К. Кошелева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 6(360). – С. 175 – 180.
3. Реутский, В. А. Расчет процесса промывки при фильтрации моющего раствора сквозь полотно ткани / В. А. Реутский, А. А. Щеголев, М. К. Кошелева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1984. – № 5. – С. 50 – 54.
4. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М. : Химия, 1980. – 248 с.
5. Плановский, А. Н. Определение области регулярного режима в задачах массопроводности / А. Н. Плановский, С. П. Рудобашта, Г. С. Кормильцин // Теоретические основы химической технологии. – 1972. – Т. VI, № 3. – С. 459 – 462.
6. Кошелева, М. К. Повышение производственной и экологической безопасности отделочного производства тонкосуконных фабрик за счет совершенствования технологии / М. К. Кошелева // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 100 – 105.
7. Анализ плотных шерстяных тканей как объекта технологической обработки и интенсификация процесса их отделки / М. К. Кошелева, П. П. Кереметин, А. А. Булекова, Д. А. Наумов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007. – № 2. – С. 118 – 121.
8. Кричевский, Г. Е. Химическая технология текстильных материалов / Г. Е. Кричевский, М. В. Корчагин, А. В. Сенахов. – М.: Легпромбытиздат, 1985. – 640 с.
9. Аксельруд, А. А. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость / А. А. Аксельруд, В. М. Лысянский. – Л. : Химия, 1974. – 255 с.
10. Мельников, Б. Н. Применение красителей / Б. Н. Мельников, Г. И. Виноградова. – М. : Химия, 1986. – 240 с.
11. Кошелева, М. К. Влияние ультразвукового поля на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, № 5. – С. 2404 – 2409.
12. Kosheleva, M. K. Improving the Efficiency of the Extraction Process in Production of Hygroscopic Fibrous Materials / M. K. Kosheleva, O. R. Dorniyak, E. N. Shirokoroyas // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 94 – 102. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.094-102
13. Kosheleva, M. K. A Resource-Saving Process of Extracting Industrial Contaminates from Fibrous Material / M. K. Kosheleva, O. R. Dorniyak, M. Z. Tsintsadze // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 411 – 420. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.411-420

Mass Conductivity during Extraction of Technological Contaminants from Fibrous Materials

M. K. Kosheleva✉

*Department of Energy Resource Efficient Technologies, otxpaxt@yandex.ru,
Industrial Ecology and Safety. A. N. Kosygin Russian State University
(Technologies.Design. Art), Moscow, Russia*

Keywords: kinetics; mass conductivity; washing of fibrous materials; dense woolen fabric; extraction.

Abstract: On the basis of the experimental curves of the kinetics of the processes of extraction of various technological contaminants from fibrous materials in the chemical technology of their finishing, the kinetic coefficients of mass conductivity were determined depending on the mass content of the material. To determine the mass conductivity coefficients, the zonal method and its modification were used, which do not require special conditions for removing kinetic curves. The processes of removing waxy substances from cotton fabrics during boiling, alkali and dye during washing after mercerization and dyeing, and fatty impurities during washing of dense woolen fabrics are considered. The mass conductivity coefficients were determined depending on the mass content of the distributed technological component according to kinetic curves. The obtained mass conductivity coefficients can be used in kinetic calculations of extraction processes of various technological contaminants from fibrous materials.

References

1. Sazhin B.S., Kosheleva M.K., Sazhina M.B. *Protsessy sushki i promyvki tekstil'nykh materialov : monografiya* [Drying and washing processes of textile materials: a monograph], Moscow: Izd-vo Federal State Budgetary Educational Institution "MGUDT", 2013, 301 p. (In Russ.)
2. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K. [Determination of mass transfer and mass conductivity coefficients from kinetic curves], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 2015, no. 6(360), pp. 175-180. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Reutsky V.A., Shchegolev A.A., Kosheleva M.K. [Calculation of the washing process during filtration of a detergent solution through a cloth], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 1984, no. 5, pp. 50-54. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Rudobashta S.P. *Massoperenos v sistemakh s tverдой fazoy* [Mass transfer in systems with a solid phase], Moscow: Chemistry, 1980, 248 p. (In Russ.)
5. Planovsky A.N., Rudobashta S.P., Kormiltsin G.S. [Determination of the area of the regular regime in mass conduction problems], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii*. [Theoretical foundations of chemical technology], 1972, vol. VI, no. 3, pp. 459-462. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kosheleva M.K. [Improving the production and environmental safety of the finishing production of fine-grain factories due to the improvement of technology], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 2005, no. 2, pp. 100-105. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Kosheleva M.K., Keremetin P.P., Bulekova A.A., Naumov D.A. [Analysis of dense woolen fabrics as an object of technological processing and intensification of their finishing process], *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti* [News of universities. Technology of the textile industry], 2007, no. 2, pp. 118-121. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Krichevsky G.E., Korchagin M.V., Senakhov A.V. *Khimicheskaya tekhnologiya tekstil'nykh materialov* [Chemical technology of textile materials], Moscow: Legprombytizdat, 1985, 640 p. (In Russ.)
9. Akselrud A.A., Lysyansky V.M. *Ekstragirovaniye. Sistema tverdoye telo-zhidkost'* [Extraction. Solid-liquid system], Leningrad: Khimiya, 1974, 255 p. (In Russ.)
10. Melnikov B.N., Vinogradova G.I. *Primeneniye krasiteley* [Application of dyes], Moscow: Khimiya, 1986, 240 p. (In Russ.)
11. Kosheleva M.K., Rudobashta S.P. [Influence of the ultrasonic field on the kinetic coefficients in the extraction process], *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], 2019, vol. 92, no. 5, pp. 2404-2409. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Shirokopoyas E.N. Improving the efficiency of the extraction process in production of hygroscopic fibrous materials, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 94-102. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.094-102

13. Kosheleva M.K., Dornyak O.R., Tsintsadze M.Z. A resource-saving process of extracting industrial contaminants from fibrous material, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 411-420. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.411-420

Massenleitfähigkeit bei der Extraktion der technologischen Verschmutzungen aus Fasermaterialien

Zusammenfassung: Basierend auf experimentellen Kurven der Kinetik der Prozesse der Extraktion verschiedener technologischer Verunreinigungen aus Fasermaterialien in der chemischen Technologie, ihrer Veredelung sind die kinetischen Koeffizienten der Massenleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Massengehalt des Materials bestimmt. Zur Bestimmung der Massenleitfähigkeitskoeffizienten ist die Zonenmethode und ihre Modifikation verwendet, die keine besonderen Bedingungen für die Aufzeichnung kinetischer Kurven erfordert. Der Artikel untersucht die Prozesse zur Entfernung wachstümlicher Substanzen aus Baumwollstoffen beim Kochen, von Alkali und Farbstoffen beim Waschen nach der Mercerisierung und Färbung sowie von fetthaltigen Verunreinigungen beim Waschen dichter Wollstoffe. Die Massenleitfähigkeitskoeffizienten sind in Abhängigkeit vom Massengehalt der verteilten technologischen Komponente gemäß kinetischen Kurven bestimmt. Die erhaltenen Massenleitfähigkeitskoeffizienten können bei kinetischen Berechnungen von Prozessen zur Extraktion verschiedener technologischer Verunreinigungen aus Fasermaterialien verwendet werden.

Conductivité massique lors de l'extraction des pollutions technologiques des matériaux fibreux

Résumé: A la base des courbes expérimentales de la cinétique des processus d'extraction de divers contaminants technologiques à partir de matériaux fibreux, est déterminée la technologie chimique des effets cinétiques de la conductivité massique en fonction de la teneur en masse du matériau. Pour déterminer les coefficients de conductivité massique, est utilisé la méthode zonale et sa modification, qui ne nécessite pas de conditions particulières pour l'enlèvement des courbes cinétiques. Sont examinés les processus d'élimination des substances cireuses des tissus de coton lors de la cuisson, de l'alcali et du colorant lors du lavage après la mercerisation et la teinture, les impuretés grassieuses lors du lavage des tissus de laine denses. Les coefficients de conductivité massique sont déterminés en fonction de la teneur en masse du composant technologique distribué le long des courbes cinétiques. Les coefficients de conductivité de masse obtenus peuvent être utilisés dans les calculs cinétiques des processus d'extraction de divers contaminants technologiques à partir de matériaux fibreux.

Автор: *Коселева Мария Константиновна* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия.