

УДК 677.027.13

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-28-36

Математическое описание интенсифицированных процессов  
экстрагирования технологических загрязнений из плоских  
волокнистых материалов

М. К. Кошелева<sup>1,\*</sup>, А. П. Булеков<sup>1,\*</sup>, В. Т. Казуб<sup>2,\*</sup>, М. З. Цинцадзе<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

<sup>2</sup>Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал Волгоградского государственного медицинского университета, Пятигорск, Россия

---

**Аннотация**

Сформулирована краевая задача для процесса экстрагирования технологических загрязнений из плоских текстильных материалов – процесса промывки. Процесс является одним из самых распространенных энерго- и ресурсоёмких массообменных процессов в химической технологии отделочного производства текстильной промышленности. Для практической реализации выбранного для интенсификации импульсного воздействия, в том числе ультразвукового, необходимо определение режимных и конструктивных параметров процесса, что возможно на основе соответствующего математического описания. Предложенная модель учитывает влияние ультразвукового воздействия на объект промывки. Получено решение данной задачи в виде функционального ряда. На основе разработанной математической модели возможна оценка коэффициента диффузии распределяемого компонента в текстильном материале.

**Ключевые слова**

Экстрагирование, система жидкость-твёрдое, промывка, интенсификация, ультразвук, моделирование, расчёт.

---

**Введение.** Термовлажностная обработка волокнистых и плоских текстильных материалов включает ряд энерго- и ресурсоёмких технологических процессов, таких как пропитка, промывка, сушка и другие процессы отделочного производства.

Промывка тканей – один из самых распространенных и энергоёмких 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

---

\* Для переписки

Email addresses: oxtpart@yandex.ru, bulekov-ap@rguk.ru, bukva46@mail.ru, tsintsadze-mz@rguk.ru

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 при жёстких требованиях к экологической чистоте производственных установок.

Изложенное свидетельствует, что задача повышения эффективности работы промывного оборудования (повышения интенсивности, экологичности, экономичности и безопасности) является актуальной. Практическая реализация любого 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 плоских текстильных материалов с применением ультразвука реализованы в работе. Выбор объекта исследования обусловлен значительной ролью и удельным объемом, занимаемым хлопчатобумажными тканями в отделочном производстве. Положительное воздействие ультразвукового поля на эффективность различных процессов, в том числе процесса промывки текстильных материалов установлено во многих работах [1-4], использование данного способа интенсификации, вопросы моделирования при использовании импульсного воздействия рассматриваются в [5-12].

**Математическое описание процесса.** В основе предложенного математического описания процесса промывки тканей лежит диффузионная модель удаления частиц (незакрепленного красителя, щёлочи, моющих и жировых веществ и др.) 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. Обрабатываемая ткань интерпретируется как бесконечно тонкая пластина, а соответствующая одномерная краевая задача имеет вид (начало координат находится на одной из сторон ткани):

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} & (1) \\ c(x, 0) = c_0 & (2) \\ D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = \beta(c|_{x=0} - c_p) - \rho_{\text{тк}} \sqrt{\frac{\chi J}{l \rho_{\text{тк}} U}} & (3) \\ -D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \beta(c|_{x=\delta} - c_p) - \rho_{\text{тк}} \sqrt{\frac{\chi J}{l \rho_{\text{тк}} U}}, & (4) \end{cases}$$

где  $C$  – концентрация удаляемого из ткани технологического «загрязнения» ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $D$  – коэффициент диффузии ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  $\beta$  – коэффициент массоотдачи ( $\text{м}/\text{с}$ );  $\rho$  – плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $J$  – интенсивность ультразвукового воздействия ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ );  $U$  – скорость звука в обрабатываемой среде ( $\text{м}/\text{с}$ );  $l$  – расстояние от источника ультразвука до обрабатываемого объекта ( $\text{м}$ );  $\tau$  – время ( $\text{с}$ );  $x$  – текущая координата ( $\text{м}$ );  $\chi$  – коэффициент, учитывающий долю ультразвуковой энергии, затрачиваемой на формирование акустических течений в ткани.

Индексы: тк – ткань; о – начало процесса; р – равновесие

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, затрудняет возможность получения ее аналитического решения.

Граничные условия (3)-(4) учитывают ультразвуковое воздействие на ткань при её промывке путём введения дополнительного члена, характеризующего сток удаляемого компонента с поверхности ткани. Количественная оценка этого потока, обусловленного предположительно формирующимися в ткани акустическими течениями от центра к периферии произведена на основании результатов исследований ультразвукового воздействия на процесс массопереноса [4].

Введение новой функции:

$$\tilde{c}(x, \tau) = c(x, \tau) - c_p - \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность технологического загрязнения (кг/м<sup>3</sup>), позволяет привести к однородному виду граничные условия (3)-(4). В новой системе координат  $\tilde{c} - \tau$  краевая задача (1)-(4) может быть решена методом Фурье [5] на интервале  $\Delta\tau$ , в пределах которого параметры  $D, \beta, c_p$  фиксированы 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 данной работе.

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

$$c(x, \tau) = c_p + \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}} + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \left( \lambda_n \frac{D}{\beta} \cos \lambda_n x + \sin \lambda_n x \right) \times \exp(-\lambda_n^2 D \tau) \quad (6)$$

Собственные числа задачи  $\lambda_n$  определяются трансцендентным уравнением:

$$tg(\delta \lambda) = \frac{2(\delta \lambda) Bi}{(\delta \lambda)^2 - Bi^2} \quad (7)$$

Коэффициенты ряда  $b_n$  рассчитываются по формуле:

$$b_n = \frac{4}{\pi(2n-1)} \times \left( c_0 - c_p - \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}} \right), \quad n \in N \quad (8)$$

Следует отметить, что в условиях, реализуемых при промывке текстильных материалов от многих технологических загрязнений в промышленных условиях, массообменный критерий  $Bi = \beta \delta / D$  имеет высокие значения. В этих условиях собственные числа задачи определяются соотношением:

$$\lambda_n = \frac{\pi}{\delta} n \quad (9)$$

Решение (6) рассматриваемой краевой задачи в этом случае приводится к виду:

$$c(x, \tau) = c_p + \frac{4}{\pi} \left( c_0 - c_p - \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}} \right) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)} \cdot \sin\left(\frac{(2n-1)\pi}{\delta} x\right) \times \exp\left(-\left(\frac{(2n-1)\pi}{\delta}\right)^2 D \tau\right) \quad (10)$$

Уравнение (10) 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 (10) по толщине обрабатываемой ткани. После реализации этой процедуры и алгебраических преобразований искомое соотношение может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \overline{c(x, \tau)} = c_p + \frac{8}{\pi^2} (c_0 - c_p - \\ - \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \times \\ \times \exp\left(-\left(\frac{2n-1}{\delta} \pi\right)^2 D \tau\right) \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ ряда, входящего в уравнение (11), 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:

$$\begin{aligned} \overline{c(x, \tau)} = c_p + \\ + \frac{8}{\pi^2} \left( c_0 - c_p - \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}} \right) \times \\ \times \exp\left(-\left(\frac{\pi}{\delta}\right)^2 D \tau\right) \end{aligned} \quad (12)$$

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, в частности хлопчатобумажных тканей, от щелочи [2] и является обоснованием для аппроксимации экспериментальных кинетических кривых по промывке тканей зависимостью вида:

$$E(\tau) = \frac{\overline{c}(x, \tau) - c_p}{c_0 - c_p} = A \exp(-b\tau) \quad (13)$$

где  $E$  – приведенная концентрация загрязнения в ткани,  $A$  и  $b$  – константы, подлежащие определению.

Наличие оценок параметров  $A$  и  $b$  зависимости (13) 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 (1) следует, что его скорость определяется уравнением:

$$\begin{aligned} \frac{d\overline{c}}{d\tau} = -\frac{8}{\delta^2} D \times \\ \times \left( c_0 - c_p - \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}} \right) \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{2n-1}{\delta} \pi\right)^2 D \tau\right) \end{aligned} \quad (14)$$

Анализ уравнения (14) показывает, что при небольшом времени промывки и достаточно низких коэффициентах диффузии, что соответствует условиям промывки текстильных материалов от различных технологических загрязнений, скорость промывки изменяется в соответствии в уравнением:

$$\frac{d\overline{c}}{d\tau} = -\frac{8D}{\delta^2} \left( c_0 - c_p - \frac{\rho T_3}{\beta} \sqrt{\frac{\chi J}{\ell \rho T K U}} \right) \quad (15)$$

Из уравнения (15) 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 плоских текстильных материалов, в частности, 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 (15), 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.

### Выводы

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

Такая оценка возможна на основе уравнений (14)-(15) на любом участке кинетической кривой промывки. Для этого необходимо определить угол наклона касательной в заданной точке на экспериментальной кривой промывки. Алгоритм расчета коэффициента диффузии  $D$  реализуется по стандартной процедуре.

Таким образом, в работе сформулирована краевая задача для

процесса промывки плоских текстильных материалов, учитывающая влияние ультразвукового воздействия на обрабатываемую ткань. Получено аналитическое решение краевой задачи для процесса промывки тканей в виде функционального ряда. Число членов ряда, используемых при расчетах, определяется требуемой точностью результатов.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Кошелева М. К., Шацких С. Н. Resource-saving technology for Saxony fabric // Вестник ТГТУ. – 2013. – Т. 19. – №. 3. – С. 584-592.
- [2]. Кошелева М.К., Булеков А.П., Шацких С.Н. Интенсификация процессов промывки с наложением ультразвуковых полей. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2012. №2. с. 113-117.
- [3]. Khmelev V. N., Tsyganok S. N., Barsukov R. V. et al. Ultrasonic Devices for Intensifying Technological Processes. Fibre Chem 51, 259–262 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10692-020-10090-0>
- [4]. Гинстлинг А.М., Барам А.А. Ультразвук в процессах химической технологии. Л.: ГОСХИМИЗДАТ, 1960, 96 с.
- [5]. Рудобашта С.П., Карташов Э.М. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Колос, 2010, 478 с.
- [6]. Хмелев В. Н., Голых Р.Н., Боброва Г.А. Модель влияния ультразвукового воздействия на массоперенос в гетерогенных системах // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2019) : Материалы XIV Всерос. науч-техн. конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, 2019. – С. 38-42.

[7]. Сажин Б.С., Федосов С.В., Кошелева М.К. Формирование научных направлений и отражение научных достижений в области повышения эффективности тепломассообменных процессов, экологической и производственной безопасности текстильных производств в разделе "Экологическая и производственная безопасность. Промтеплоэнергетика" // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 4 (376). С. 116-122.

[8]. Сафонов В. В. Перспективы развития технологии отделки текстильных материалов //Текстильная промышленность. – 2005. – №. 7/8. – С. 57-66.

[9]. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Mathematical simulation of the extraction of a blending agent from cylindrical bodies in the semicontinuous regime. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. Т. 89, № 3. С. 606-613.

[10]. В. Н. Хмелев, Р. Н. Голых, В. В. Педдер и др. Компьютерная модель ультразвуковой экстракции патологического

содержимого из биологических систем // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование : сборник науч. трудов Междунар. науч.-техн. симпозиума «Вторые междунар. Косыгинские чтения, приуроч. к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» на Междунар. Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук», 2019. – С. 186-190.

[11]. Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Nonstationary mass transfer near the surface of a cylindrical body. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Т. 88, № 6. С. 1320-1328.

[12]. Гришаева И.Н., Хмелев В.Н., Галахов Н.Н. Исследование процесса ультразвуковой экстракции для приготовления пантовых ванн // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 2(26). – С. 199 – 203.

DOI 10.25699/SSSB.2019.2(26).32550

**Кошелева Мария Константиновна** – канд. техн. наук, профессор кафедры: «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

**Булеков Александр Павлович** – д-р техн. наук, профессор кафедры: «Высшая математика» Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

**Казуб Валерий Тимофеевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры: «Физика и математика» Пятигорского медико-фармацевтического института – филиала Волгоградского государственного медицинского университета (Российская Федерация, 357532, Ставропольский край, г. Пятигорск, пр. Калинина, 11).

**Цинцадзе Марина Зиевна** – без ученой степени, аспирант кафедры: «Энергоресурсоэффективные технологии, промышленная экология и безопасность» Российского государственного университета имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство) (Российская Федерация, 119071, Москва, Малая Калужская ул., д. 1).

# Mathematical description of intensified processes for extracting technological contaminants from flat fibrous materials

M.K. Kosheleva<sup>1,\*</sup>, A.P. Bulekov<sup>1,\*</sup>, V.T. Kazub<sup>2,\*</sup>, M.Z. Tsintsadze<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute, a branch of the Volgograd State Medical University, Pyatigorsk, Russia*

---

## Abstract

A boundary value problem is formulated for the extraction process of technological contaminants from flat textile materials - the washing process. The process is one of the most common energy and resource-intensive mass transfer processes in the chemical technology of finishing in textile industry. For the practical implementation of the pulse effect selected for intensification, including ultrasonic one, it is necessary to determine the operating and design parameters of the process, which is possible on the basis of an appropriate mathematical description. The proposed model takes into account the effect of ultrasonic action on the object being washed. The solution to this problem is obtained in the form of a functional series. On the basis of the developed mathematical model, it is possible to estimate the diffusion coefficient of the distributed component in the textile material.

## Keywords

Extraction, liquid-solid system, flushing, intensification, ultrasound, simulation, calculation.

---

## REFERENCES

- [1] Kosheleva M.K., Shatskikh S.N. [Resource-saving technology for Saxony fabric], Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Transactions of the Tambov Technical University] 2013.Vol. 19.No. 3, p. 584 – 592. (In Russ.)
- [2] Kosheleva M.K., Shchyogolev A.A., Shackih S.N., Apal'kova M.S. [Intensification of washing processes with the application of ultrasonic fields], Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti [Proceedings of universities. Textile technology], 2012, N. 3, pp. 113-117 (In Russ.)
- [3] Khmelev, V.N., Tsyganok, S.N., Barsukov, R.V. et al. Ultrasonic Devices for Intensifying Technological Processes. Fibre Chem 51, 259–262 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10692-020-10090-0>
- [4] Ginstling A.M., Baram A.A. Ul'trazvuk v processah himicheskoy tekhnologii [Ultrasound in chemical technology processes], L.: GOSHIMIZDAT, 1960, 96 p. (In Russ.)

---

\*Corresponding author

Email addresses: [oxtpaxt@yandex.ru](mailto:oxtpaxt@yandex.ru), [bulekov-ap@rguk.ru](mailto:bulekov-ap@rguk.ru), [bukva46@mail.ru](mailto:bukva46@mail.ru), [tsintsadze-mz@rguk.ru](mailto:tsintsadze-mz@rguk.ru)

- [5] Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffuziya v himiko-tekhnologicheskikh processah [Diffusion in chemical engineering processes], M.: Kolos, 2010, 478 p. (in Russ.)
- [6] Hmelev V. N., Golyh R.N., Bobrova G.A. Model' vlijanija ul'trazvukovogo vozdejstvija na massoperenos v geterogennyh sistemah [Model of the influence of ultrasonic action on mass transfer in heterogeneous systems] // Izmerenija, avtomatizacija i modelirovanie v promyshlennosti i nauchnyh issledovanijah (IAMP-2019) : Materialy XIV Vseros. nauch-tehn. konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhdunar. Uchastiem [[Measurements, Automation and Simulation in Industry and Scientific Research (MASI-2019) : Materials of the XIV All-Russian Scientific and Technological Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation], 2019. – pp. 38-42. (In Russ.)
- [7] Sazhin B.S., Fedosov S.V., Kosheleva M.K. [Formation of scientific directions and reflection of scientific achievements in the field of increasing the efficiency of heat and mass transfer processes, environmental and industrial safety of textile industries in the section "Environmental and Industrial Safety. Industrial Heat Power Engineering"], Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti [Proceedings of universities. Textile technology], 2018, N.4, pp.116-122. (in Russ.)
- [8] Safonov V. V. [Prospects for the development of technology for finishing textile materials] // Tekstil'naja promyshlennost' [Textile industry]. – 2005. – №. 7/8. – Pp. 57-66. (In Russ.)
- [9] Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Mathematical simulation of the extraction of a blending agent from cylindrical bodies in the semicontinuous regime. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. T. 89, № 3. С. 606-613.
- [10] V. N. Hmelev, R. N. Golyh, V. V. Pedder i dr. Komp'juternaja model' ul'trazvukovoj jekstrakcii patologicheskogo sodержimogo iz biologicheskikh sistem [Computer model of ultrasonic extraction of pathological contents from biological systems] // Jenergoresursojeffektivnye jekologicheski bezopasnye tehnologii i oborudovanie : sbornik nauch. trudov Mezhdunar. nauch-tehn. simpoziuma «Vtorye mezhdunar. Kosyginские chtenija, priuroch. k 100-letiju RGU imeni A. N. Kosygina» na Mezhdunar. Kosyginском Forume-2019 «Sovremennye zadachi inzhenernyh nauk» [Energy and recourse efficient environmentally safe technologies and equipment : materials of the second International Kosygin Forum ISTS], 2019. – Pp. 186-190. (In Russ.)
- [11] Rudobashta S.P., Kosheleva M.K., Kartashov E.M. Nonstationary mass transfer near the surface of a cylindrical body. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. T. 88, № 6. С. 1320-1328.
- [12] Grishaeva I.N., Hmelev V.N., Galahov N.N. [Investigation of the process of ultrasonic extraction for the preparation of antler baths] // Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik [South-Siberian Scientific Bulletin]. – 2019. – № 2(26). – S. 199-203. – DOI 10.25699/SSSB.2019.2(26).32550. (In Russ.)

**Kosheleva M. K.** — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Sadovnicheskaya ul. 33, str. 1, Moscow, 115035 Russian Federation).

**Bulekov A. P.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Higher Mathematics, The Kosygin State University of Russia (Sadovnicheskaya ul. 33, str. 1, Moscow, 115035 Russian Federation).

**Kazub V. T.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Physics and Mathematics, Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute, a branch of the Volgograd State Medical University, Pyatigorsk, Russia.

**Tsintsadze M. Z.** — postgraduate student, Department of Energy and Resource Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, The Kosygin State University of Russia (Sadovnicheskaya ul. 33, str. 1, Moscow, 115035 Russian Federation).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Математическое описание интенсифицированных процессов экстрагирования технологических загрязнений из плоских волокнистых материалов / М. К. Кошелева, А. П. Булеков, В. Т. Казуб, М. З. Цинцадзе // Промышленные процессы и технологии. 2021. № 1. С. 28 – 36

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-28-36

**Please cite this article as:**

M. K. Kosheleva, A.P. Bulekov, V.T. Kazub, M.Z. Tsintsadze. Mathematical description of intensified processes for extracting technological contaminants from flat fibrous materials. Industrial processes and Technologies, 2021, no. 1, pp. 28 –36.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-28-36