

DOI 10.23859/1994-0637-2020-6-99-1

УДК 542.63:621.929

© **Кожевников С. О., Кузнецов В. Б.,
Ершов С. В., Малов М. С., 2020**

Кожевников Сергей Олегович

Кандидат технических наук, доцент,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
<https://orcid.org/0000-0003-2222-6759>
E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

Kozhevnikov Sergey Olegovich
PhD in Technology, Associate Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
<https://orcid.org/0000-0003-2222-6759>
E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

Кузнецов Виктор Борисович

Доктор технических наук, профессор,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
E-mail: kuznetsovtex@gmail.com

Kuznetsov Viktor Borisovich
Doctor of Technology, Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: kuznetsovtex@gmail.com

Ершов Сергей Владимирович

Кандидат технических наук, доцент,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
<https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>
E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru

Ershov Sergey Vladimirovich
PhD in Technology, Associate Professor,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
<https://orcid.org/0000-0003-2587-5084>
E-mail: ershovsv.iv@yandex.ru

Малов Михаил Сергеевич

Студент,
Ивановский государственный
политехнический университет
(Иваново, Россия)
E-mail: mishamalov1@gmail.com

Malov Mikhail Sergeevich
Student,
Ivanovo State Polytechnic University
(Ivanovo, Russia)
E-mail: mishamalov1@gmail.com

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИКИ ЖИДКОСТИ
В РАБОЧЕМ ОРГАНЕ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ МЕХАНОАКТИВАЦИИ
КОЛЛОИДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ
СИСТЕМ**

**SIMULATION OF FLUID
HYDRODYNAMICS IN THE WORKING
BODY OF A DEVICE FOR
MECHANICAL ACTIVATION OF
COLLOIDAL DISPERSE SYSTEMS**

Аннотация. В статье представлены результаты моделирования гидродинамики жидкости в рабочем органе устройства для механоактивации коллоидных дисперсных систем. Моделирование процесса движения жидкой среды выполнялось с применением систем автоматизированного проектирования SolidWorks, FloWorks и MATLAB. Получена детальная картина поля скорости для

Abstract. The article presents the results of modeling fluid hydrodynamics in the working body of a device for mechanical activation of colloidal dispersed systems. Modeling of the fluid motion process was performed using computer-aided design systems SolidWorks, FloWorks, and MATLAB. A detailed picture of the velocity field for the specified parameters is obtained. A comparison of the results of

заданных параметров. Приведено сравнение результатов моделирования движения жидкой среды, реализованное посредством различных методов. Для исследуемого процесса выполнен расчет профиля скорости потока жидкости в рабочем органе и представлены выводы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, рабочий орган, гидродинамика

modeling the motion of a liquid medium performed by various methods is presented. For the process under study, the profile of the fluid flow rate in the working body is calculated and conclusions are given.

Keywords: computer modeling, working body, hydrodynamics

Введение

Потребительские свойства текстильных изделий обуславливаются двумя факторами художественно колористического оформления и качества отделки. Одним из основных механизмов получения оригинальных дизайнерских рисунков является печатание. В то же время необходимо обеспечить устойчивость окраски к различным физико-химическим воздействиям (стирка, химчистка и т. д.). Качество печати материалов пигментными красителями зависит от степени их дисперсности. Меньший размер частиц пигмента увеличивает скорость их проникновения в волокно. Существенное влияние на получение коллоидов пигментных красителей оказывает технология процесса и используемое при этом технологическое оборудование¹.

Наиболее энергоемкой операцией получения дисперсий пигментных красителей является их диспергирование. Под диспергированием понимается разрушение агломератов и агрегатов пигментов и обеспечение полного смачивания поверхности пигмента жидкой фазы композиции, что предотвращает его флокуляцию.

Аппаратурное оформление для получения материалов высокой дисперсности характеризуется наличием небольшого количества устройств. Анализ конструкций таких аппаратов показал, что они требуют дальнейшего совершенствования, а также достаточно энерго- и металлоемки².

Гидродинамическая картина потока в аппаратах оказывает существенное влияние на процессы массо- и теплообмена, а также диспергирования. Для оценки этого влияния необходимо знать распределение скорости и давления. Получение детальной картины поля скорости и давления в рабочем органе устройства экспериментальным путем является задачей трудоемкой, в большинстве случаев недостижимой.

В данной работе выполнено моделирование процесса движения жидкой среды с применением систем автоматизированного проектирования SolidWorks, FloWorks и MATLAB, а также сравнение двух методик.

¹ Кожевников С. О. Разработка смесителя для перемешивания жидких и гетерогенных сред: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: Ренкид-Центр, 2005. – 138 с.; Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Ленинград: Химия, 1975. – 384 с.

² Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Ленинград: Химия, 1975. – 384 с.

Основная часть

Перемешивающие устройства находят широкое применение во многих отраслях промышленности при проведении различных технологических процессов¹. Важной задачей в теории перемешивания является распределение скорости в объеме аппарата и его рабочих органах. Используемые при решении задач перемешивания методы расчета связаны с гидродинамическими параметрами потока жидкости. Получаемые числовые значения составляющих поля скоростей потока жидкости применяются для вычисления таких важных характеристик, как мощность, затрачиваемая на перемешивание, время перемешивания и коэффициенты теплопередачи².

Исследования, проведенные нами в лабораторных условиях³, показали, что для получения высокодисперсных суспензий можно использовать принципиально новую конструкцию устройства, состоящую из ротора с трубками переменного сечения⁴.

Разработанное устройство служит для механоактивации коллоидных дисперсных сред; его рабочими органами являются трубы переменного поперечного сечения, через которые движется жидкая среда. При этом узкие концы труб снабжены ребрами сложной формы. При прохождении жидкости через трубки переменного сечения, выполняющие вращательное движение, скорость среды на выходе многократно возрастает.

Особый интерес представляет исследование распределения поля скоростей в рабочих органах аппаратов, оснащенных новыми перемешивающими устройствами. В таких устройствах жидкая среда проходит через рабочие органы, вращающиеся вокруг центральной оси (см. рис.1)⁵.

¹ Кожевников С. О. Разработка смесителя для перемешивания жидких и гетерогенных сред: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: Ренкид-Центр, 2005. – 138 с.

² Кожевников С. О. Разработка смесителя для перемешивания жидких и гетерогенных сред: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: Ренкид-Центр, 2005. – 138 с.; Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Ленинград: Химия, 1975. – 384 с.

³ Кожевников С. О. Разработка смесителя для перемешивания жидких и гетерогенных сред: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: Ренкид-Центр, 2005. – 138 с.

⁴ Кожевников С. О., Калинин Е. Н., Кузнецов В. Б. Устройство для механоактивации коллоидных дисперсных систем. № 2018126097. Патент на полезную модель РФ №184449. МПК B01F 7/16; заявл. 13.07.2018; опубл. 25.10.2018.

⁵ Кожевников С. О., Калинин Е. Н., Кузнецов В. Б. Устройство для механоактивации коллоидных дисперсных систем. № 2018126097. Патент на полезную модель РФ №184449. МПК B01F 7/16; заявл. 13.07.2018; опубл. 25.10.2018; Малов М. С., Кузнецов В. Б., Кожевников С. О. Механоактивация коллоидных систем // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2020): сборник материалов Национальной молодежной научно-технической конференции / под редакцией Е. В. Румянцева, А. Ю. Матрохина. – Иваново: ИВГПУ, 2020. – С. 408–409.

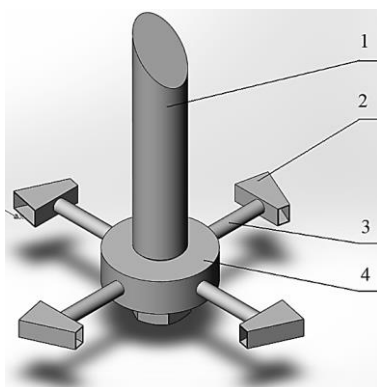


Рис. 1. Устройство для механоактивации коллоидных дисперсных систем: 1 – вал; 2 – рабочий орган; 3 – спица; 4 – ступица

Представим движение жидкости в рабочем органе в цилиндрической системе координат в виде двухпараметрического винтового потока, симметричного относительно оси z^1

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + k^2 \psi = -D, \quad (1)$$

с граничными условиями: $\psi(0, r) = \psi((r_2 - r_1), r) = 0$; $\psi(z, r_1) = \psi(z, r_2) = 0$, где ψ – функция тока, м; r – текущий радиус, м; z – координата по высоте трубки, м; k – постоянная, равная удвоенному отношению модуля угловой скорости вращения частицы к модулю скорости ее перемещения.

Решение уравнения (1), удовлетворяющее указанным граничным условиям, представим в виде ряда Фурье. Для потока, линеаризованного в первом приближении, получим следующие уравнения:

– для определения функции тока:

$$\psi = \frac{4D}{\pi} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n\omega_n^2} \Omega_n(r) \sin \frac{n\pi z}{r_2 - r_1}; \quad (2)$$

– для определения радиальной скорости, м/с:

$$v_r = D \left\{ \frac{1}{r} \left(\frac{r_2 - r_1}{2} - z \right) - \frac{4(r_2 - r_1)}{\pi^2 r_1} \cdot \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot \frac{r_1}{r} [1 - \Omega_n(r)] \cos \omega_n z \right\}; \quad (3)$$

– для определения окружной скорости, м/с:

¹ Кожевников С. О., Малов М. С. Моделирование движения жидкости в рабочих органах механоактиватора с помощью MATLAB // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции (Москва, 27–28 марта 2019 г.). – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – С. 143–149.

$$v_{\varphi} = \left\{ C \left[1 + \frac{4k^2}{\pi} \cdot \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{\pi \omega_n^2} \Omega_n(r) \sin \frac{n\pi z}{r_2 - r_1} \right] \right\} / r; \quad (4)$$

– для определения осевой скорости, м/с:

$$v_z = \frac{4D(r_2 - r_1)}{\pi^2 r_1^2} \cdot \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n^2} \Omega_n^*(r) \sin \omega_n z, \quad (5)$$

где D – коэффициент; n – нечетное число, $n = 1, 3, 5, \dots$; ω_n – пристенная продольная скорость, м/с; Ω_n , Ω_n^* – коэффициенты.

Значение коэффициента D определяется по формуле:

$$D = k \cdot C, \quad (6)$$

где k – коэффициент, м⁻¹; C – коэффициент, зависящий от скорости движения жидкости на входе в трубку переменного сечения, м²/с.

Значение коэффициента k :

$$k = -\frac{\pi}{2(r_2 - r_1)}. \quad (7)$$

Коэффициент, зависящий от скорости движения жидкости на входе в трубку переменного сечения, определяется из уравнения:

$$C = v_{\varphi}^{\text{вход}} \cdot r_2, \quad (8)$$

где $v_{\varphi}^{\text{вход}}$ – окружная скорость на входе в трубку переменного сечения, м/с.

Пристенная продольная скорость:

$$\omega_n = \frac{n \cdot \pi}{r_2 - r_1}. \quad (9)$$

Коэффициенты Ω_n , Ω_n^* определяются из уравнений:

$$\Omega_n = 1 - \frac{r}{r_1} \cdot \frac{B_n I_1(\omega_n r) - C_n K_1(\omega_n r)}{A_n}, \quad (10)$$

$$\Omega_n^* = \frac{B_n I_0(\omega_n r) + C_n K_0(\omega_n r)}{A_n}, \quad (11)$$

где A_n , B_n и C_n – коэффициенты.

Значения коэффициентов A_n , B_n и C_n определяются из уравнений:

$$A_n = I_1(\omega_n r_1) K_1(\omega_n r_2) - I_1(\omega_n r_2) K_1(\omega_n r_1); \quad (12)$$

$$B_n = K_1(\omega_n r_2) - \frac{r_1}{r_2} \cdot K_1(\omega_n r_1); \quad (13)$$

$$C_n = I_1(\omega_n r_2) - \frac{r_1}{r_2} \cdot I_1(\omega_n r_1), \quad (14)$$

где $I_1(x)$; $K_1(x)$; $I_0(x)$; $K_0(x)$ – функции Бесселя.

При практических расчетах значения аргумента бесселевых функций $x = \omega_n r$ оказываются обычно во втором и последующих членах ряда столь большими, что можно воспользоваться асимптотическими представлениями этой функции при $x \rightarrow \infty^1$:

$$I_n(x) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}; \quad K_n(x) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} \cdot e^{-x}. \quad (15)$$

По приведенным уравнениям был составлен алгоритм в виде блок-схемы, представленный на рис. 2.

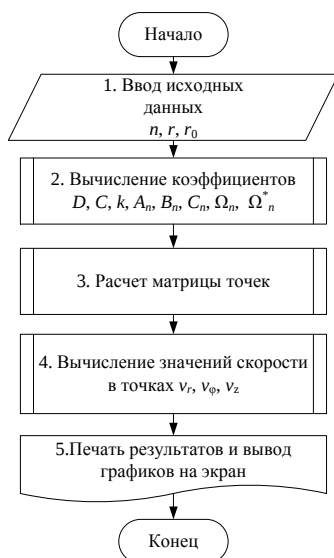


Рис. 2. Блок-схема алгоритма вычисления составляющих скоростей жидкости в рабочем органе

В блоке 1 задаются исходные данные: частота вращения мешалки n , мин^{-1} ; входной размер рабочего органа r , м; радиус крепления рабочего органа от оси вращения r_0 , м; шаг сетки точек, в которых выполняется вычисление скорости жидкости, s , м.

В блоке 2 выполняется вычисление коэффициентов $D, C, k, A_n, B_n, C_n, \Omega_n, \Omega_n^*$.

В блоке 3 определяется число точек, в которых рассчитываются значения скоростей жидкости.

В блоке 4 осуществляется вычисление значений скоростей жидкости v_r, v_ϕ, v_z .

¹ Малов М. С., Кузнецов В. Б., Кожевников С. О. Механоактивация коллоидных систем // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2020): сборник материалов Национальной молодежной научно-технической конференции / под редакцией Е. В. Румянцева, А. Ю. Матрохина. – Иваново: ИВГПУ, 2020. – С. 408–409.

В блоке 5 выводятся на печать (экран) графики скоростей жидкости v_r , v_ϕ , v_z .

По выполненной блок-схеме составлена программа в среде MATLAB и произведен расчет однородного винтового потока в трубке переменного сечения. Расчет потока сделан при следующих параметрах: $r_1 = 0,02$ м, $r_2 = 0,01$ м. Распределение скоростей в трубке переменного сечения приведено на рис. 3 (при $v_\phi^{\text{вход}} = 0,1$ м/с).

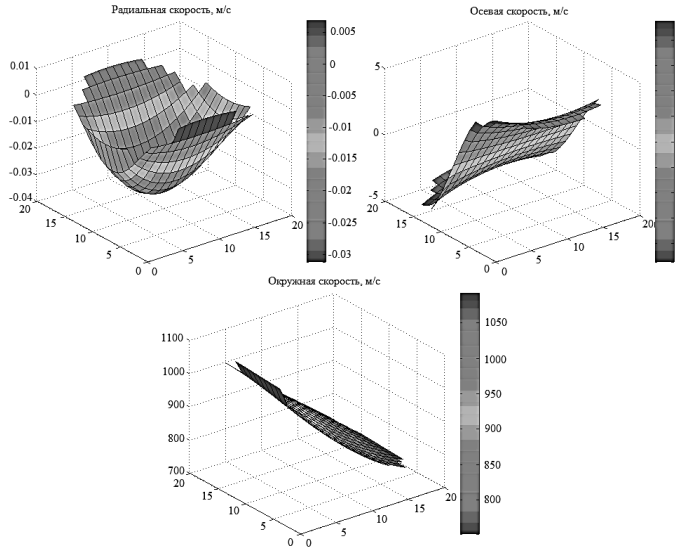


Рис. 3. Профили скоростей в рабочем органе

Следующим этапом моделирования гидродинамики в рабочем органе устройства является применение систем автоматизированного проектирования SolidWorks и FloWorks.

На рис. 4 приведена 3D-модель рабочего органа перемешивающего устройства. Модель выполнена в системе автоматизированного проектирования SolidWorks.

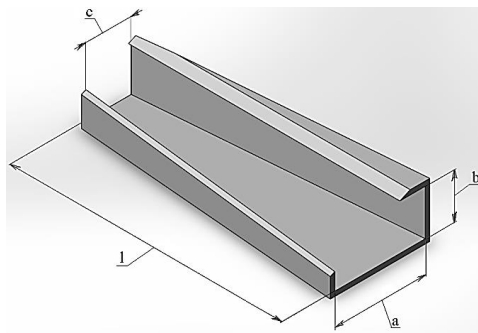


Рис. 4. 3D-модель рабочего органа

Движение жидкости в рабочем органе с учетом вихревого движения жидкости осуществлялось в приложении FloWorks. Расчет выполнялся при следующих исходных данных: $v_r = 5$ м/с, $v_\phi = 3$ м/с, $v_z = 5$ м/с, $a = 20$ мм, $b = 10$ мм, $c = 10$ мм, $l = 60$ мм.

Результаты моделирования вихревого движения жидкости в рабочем органе приведены на рис. 5.

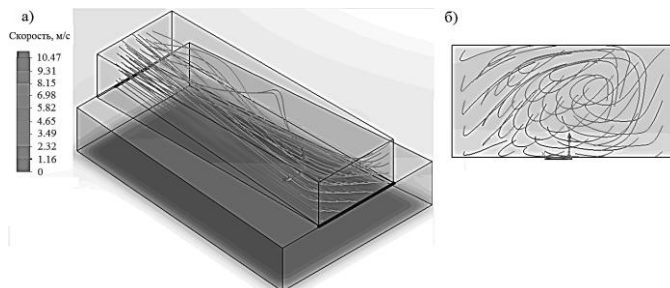


Рис. 5. Траектории потока жидкости:
а) вдоль рабочего органа; б) на выходе из рабочего органа

На рис. 5а видно, что входящий поток жидкости имеет трехмерную структуру и в процессе прохождения через рабочий орган ускоряется. Рабочий орган захватывает жидкость и ускоряет ее вследствие различия размеров входного и выходного отверстий, что приводит к возникновению турбулентных кольцеобразных фрактальных потоков и вихрей Ренкина. Вышеприведенные процессы в дисперсной системе создают высокие напряжения сдвига, приводящие к изменению морфологии твердых и жидких компонентов композиции, равномерности распределения твердой фазы и увеличению суммарной площади контакта фаз; следствием этого служит появление высокоэнергетичной микрогетерогенной системы. Вместе с тем одна из фаз образует непрерывную дисперсионную среду, в объеме которой распределены частицы дисперсной фазы, утратившие в результате механоактивации способность к электростатической коагуляции.

При этом поток жидкости на выходе из трубки получает направленное движение (см. рис. 5б). Встреча со спутным вращающимся потоком жидкости приводит к возникновению градиентов скоростей, вызывающих вихреобразование и интенсивное перемешивание. Максимальная скорость движения жидкости (v) достигает 10,47 м/с, что в два с лишним раза выше начальной скорости.

Как видно на рис. 5, наличие внутренних углов в трубке переменного сечения приводит к образованию отрывных течений и возникновению турбулентности, что будет положительно сказываться на процессе перемешивания и диспергирования.

Выводы

Полученные функциональные зависимости и модели дают возможность определить оптимальный скоростной режим движения жидкости в рабочих органах устройства для механоактивации коллоидных дисперсных сред и, как следствие, решить задачи по его геометрическому и динамическому синтезу.

Литература

- Васильев О. Ф. Основы механики винтовых и циркуляционных потоков. – Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1958. – 144 с.
- Кожевников С. О. Разработка смесителя для перемешивания жидких и гетерогенных сред: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: Ренкид-Центр, 2005. – 138 с.
- Кожевников С. О., Калинин Е. Н., Кузнецов В. Б. Устройство для механоактивации коллоидных дисперсных систем. № 2018126097. Патент на полезную модель РФ № 184449. МПК B01F 7/16; заявл. 13.07.2018; опубл. 25.10.2018.
- Кожевников С. О., Кузнецов В. Б., Малов М. С. Исследование влияния геометрических параметров смесителя на седиментационную устойчивость суспензии // Инженерные и социальные системы: сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ / под редакцией М. В. Таничева. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Вып. 4. – С. 28–31.
- Кожевников С. О., Малов М. С. Исследование устройства для механоактивации водоцементной суспензии // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы Международной научно-практической конференции (Белгород, 17–19 октября 2019 г.). – Белгород: БГТУ, 2019. – С. 93–97.
- Кожевников С. О., Малов М. С. Моделирование движения жидкости в рабочих органах механоактиватора с помощью MATLAB // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции (Москва, 27–28 марта 2019 г.). – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – С. 143–149.
- Малов М. С., Кожевников С. О., Кузнецов В. Б. Моделирование влияния формы конфузора на гидродинамику жидкой системы в среде SolidWorks // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2019): сборник материалов всероссийской (с международным участием) молодежной научно-технической конференции / под редакцией А. Ю. Матрохина, П. Б. Разговорова. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Ч. 1. – С. 293–294.
- Малов М. С., Кожевников С. О., Кузнецов В. Б. Моделирование гидродинамических процессов в рабочих органах устройства для механоактивации коллоидных дисперсных сред // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сборник материалов XXII Международного научно-практического форума «SMARTEX – 2019», 25–27 сентября 2019 г. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Ч. 2. – С. 173–179.
- Малов М. С., Кузнецов В. Б., Кожевников С. О. Механоактивация коллоидных систем // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2020): сборник материалов Национальной молодежной научно-технической конференции / под редакцией Е. В. Румянцев, А. Ю. Матрохина. – Иваново: ИВГПУ, 2020. – С. 408–409.
- Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Ленинград: Химия, 1975. – 384 с.

References

- Vasil'ev O. F. *Osnovy mekhaniki vintovykh i tsirkulatsionnykh potokov* [Fundamentals of helical and circulating flows]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1958. 144 p.
- Kozhevnikov S. O. *Razrabotka smesitelia dlia peremeshivaniia zhidkikh i geterogennykh sred* [Developing a mixer for stirring liquid and heterogeneous media: PhD thesis in Technology]. Ivanovo: Renkid-Tsentr, 2005. 138 p.
- Kozhevnikov S. O., Kalinin E. N., Kuznetsov V. B. *Ustroistvo dlia mekhanoaktivatsii kolloidnykh dispersnykh sistem. № 2018126097. Patent na poleznuiu model' RF № 184449. MPK B01F 7/16; zaiavl. 13.07.2018; opubl. 25.10.2018.* [Device for mechanical activation of colloidal disperse systems. № 2018126097. Utility model patent RF № 184449. IPC B01F 7/16; applied for the patent 13.07.2018; publ. 25.10.2018].

Kozhevnikov S. O., Kuznetsov V. B., Malov M. S. Issledovanie vliianiia geometricheskikh parametrov smesitelia na sedimentatsionnuiu ustoychivost' suspensii [Research on the influence of geometrical parameters of the mixer on the sedimentation stability of the suspension]. *Inzhenernye i sotsial'nye sistemy: sbornik nauchnykh trudov instituta arkhitektury, stroitel'stva i transporta IVGPU* [Engineering and social systems: proceedings of the architecture, construction and transport institute ISPU; ed. by M. V. Tanichev]. Ivanovo: IVGPU, 2019, iss. 4, pp. 28–31.

Kozhevnikov S. O., Malov M. S. Issledovanie ustroystva dlia mekhanoaktivatsii vodotsementnoi suspensii [Research on the device for mechanical activation of the water-cement suspension]. *Energo-resursosberegaiushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoi i stroitel'noi otrasliakh: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Belgorod, 17–19 oktiabria 2019 g.)* [Energy and resource-saving technologies and equipment in the road-building and construction industries: proceedings of the International research and practice conference (Belgorod, 17–19 October 2019)]. Belgorod: BGTU, 2019, pp. 93–97.

Kozhevnikov S. O., Malov M. S. Modelirovanie dvizheniia zhidkosti v rabochikh organakh mekhanoaktivatora s pomoshch'iu MATLAB [Simulation of fluid motion in the working bodies of the mechanical activator using MATLAB]. *Tekhnologii razrabotki i otladki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: sbornik materialov VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Moskva, 27–28 marta 2019 g.)* [Technologies for developing and fine-tuning complex technical systems: proceedings of VI All-Russian research and practice conference (Moscow, 27–28 March 2019)]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2019, pp. 143–149.

Malov M. S., Kozhevnikov S. O., Kuznetsov V. B. Modelirovanie vliianiia formy konfuzora na gidrodinamiku zhidkoi sistemy v srede SolidWorks [Simulating the impact of the contraction shape on the fluid system hydrodynamics within SolidWorks]. *Molodye uchenye – razvitiu Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy (POISK–2019): sbornik materialov vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Young researchers – for the development of The National Technological Initiative (POISK–2019): proceedings of the All-Russian (with international participation) youth research and practice conference; ed. by A. Iu. Matrokhin, P. B. Razgovorov]. Ivanovo: IVGPU, 2019, part 1, pp. 293–294.

Malov M. S., Kozhevnikov S. O., Kuznetsov V. B. Modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov v rabochikh organakh ustroystva dlia mekhanoaktivatsii kolloidnykh dispersnykh sred [Simulation of hydrodynamic processes in the working bodies of a device for mechanical activation of colloidal disperse media]. *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tekhnologii i materialy: sbornik materialov XXII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma “SMARTEX – 2019”, 25–27 sentiabria 2019 g.* [Physics of fiber materials: structure, characteristics, high technologies and materials: proceedings of XXII International research and practice forum “SMARTEX – 2019”, 25–27 September 2019]. Ivanovo: IVGPU, 2019, part 2, pp. 173–179.

Malov M. S., Kuznetsov V. B., Kozhevnikov S. O. Mekhanoaktivatsiia kolloidnykh sistem [Mechanical activation of colloidal systems]. *Molodye uchenye – razvitiu Natsional'noi tekhnologicheskoi initsiativy (POISK–2020): sbornik materialov Natsional'noi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Young researchers – for the development of The National Technological Initiative (POISK–2020): proceedings of the National youth research and practice conference; ed. by E. V. Rumiantsev, A. Iu. Matrokhin]. Ivanovo: IVGPU, 2020, pp. 408–409.

Strenk F. *Peremeshivanie i apparaty s meshalkami* [Mixing and agitator apparatuses]. Leningrad: Khimiia, 1975. 384 p.

Для цитирования: Кожевников С. О., Кузнецов В. Б., Еришов С. В., Малов М. С. Моделирование гидродинамики жидкости в рабочем органе устройства для механоактивации коллоидных дисперсных систем // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6 (99). – С. 11–21. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-1

For citation: Kozhevnikov S. O., Kuznetsov V. B., Ershov S. V., Malov M. S. Simulation of fluid hydrodynamics in the working body of a device for mechanical activation of colloidal disperse systems. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 6 (99), pp. 11–21. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-6-99-1