

СИНТЕЗ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ МЕХАНОАКТИВАЦИИ МНОГОФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ВНЕШНЕМ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ВОЗМУЩЕНИИ

SYNTHESIS OF A SIMULATION MODEL OF MULTIPHASE SYSTEM MECHANICAL ACTIVATION WITH AN EXTERNAL PERIODIC DISTURBANCE

С.О. КОЖЕВНИКОВ¹, Е.Н. КАЛИНИН², Л.В. КОЖЕВНИКОВА², В.Б. КУЗНЕЦОВ²

S.O. KOZHEVNIKOV¹, E.N. KALININ², L.V. KOZHEVNIKOVA², V.B. KUZNETSOV²

¹Ивановский государственный энергетический университет им. Ленина,
²Ивановский государственный политехнический университет)

¹Ivanovo State Power Engineering University,
²Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: kojevnikov_so@mail.ru

Работа посвящена моделированию многофазных жидких сред под воздействием внешнего периодического возмущения. В частности, предложена математическая модель механоактивации многофазных сред с использованием роторных систем, содержащих рабочие органы в виде труб переменного сечения. Получена система уравнений движения многофазной среды и уравнение возмущающего периодического воздействия. На основе математической модели синтезирована имитационная модель, позволяющая выполнить оптимизацию параметров процесса механической активации в зависимости от реологических и физических параметров компонентов многофазной системы. Приведены визуализированные результаты имитационного моделирования для трехфазной системы «несущая жидкость-газ-твердые частицы». Результаты моделирования трехфазной системы позволяют оптимизировать процесс механоактивации путем решения соответствующих уравнений из основной системы уравнений математической модели. Численное решение разработанной имитационной модели по входным параметрам компонентов многофазной системы является основой параметрической и режимной оптимизации механоактиватора.

The work is devoted to modeling multiphase liquid media under the influence of an external periodic disturbance. In particular, a mathematical model of mechanical activation of multiphase media using rotor systems containing working bodies in the form of pipes of variable cross-section is proposed. A system of equations of motion of a multiphase medium and an equation of disturbing periodic action are obtained. Based on the mathematical model, a simulation model has been synthesized allowing optimization of the parameters of the mechanical activation process depending on the rheological and physical parameters of the components of the multiphase system. Visualized results of simulation modeling for a three-phase system “carrying liquid-gas-solid particles” are presented. The results of modeling a three-phase system make it possible to optimize the process of mechanical activation by solving the corresponding equations from the main system of equations of the mathematical model. The numerical solution of the developed simulation model based on the input parameters of the multiphase system components is the basis for the parametric and regime optimization of the mechanical activator.

Ключевые слова: механоактивация, имитационная модель, колебательное возмущение, многофазные среды.

Keywords: mechanical activation, simulation model, oscillatory perturbation, multiphase media.

Потребительские свойства текстильных изделий в значительной степени зависят от качества их заключительной отделки. Одной из операций облагораживания тканей является колорирование текстильных материалов водонерастворимыми красителями (кубовыми, дисперсными, пигментами). Колорирующая композиция на их основе представляет собой классический пример коллоидной дисперсной системы, а качество окраски тканей зависит от степени дисперсности красителя.

Высокая степень дисперсности частиц красителя обеспечивает легкость проникновения его в капиллярно-пористую структуру (КПС) ткани, образующих ее волокон, что обеспечивается использованием процесса механоактивации коллоидной колорирующей системы перед ее применением.

Существенное влияние на качество и агрегативную устойчивость колорирующих композиций оказывает технологическое оборудование для их приготовления [1...3]. Аппаратурное оформление для получения материалов высокой дисперсности характеризуется наличием ограниченного количества энерго- и металлоемких устройств [3].

Как показали собственные исследования, перспективным направлением получения стабильных во времени многофазных сред является применение роторных механоактиваторов, вращающихся в вертикальных заполненных аппаратах [2]. Механоактиватор состоит из ступицы, закрепляемой на вращающемся валу, на которой по периметру расположены стойки с рабочими органами [4]. Рабочие органы представляют собой трубы различной конфигурации.

Во многих технологических процессах, таких как перемешивание и диспергирование, особый интерес представляет определение закономерностей рассматриваемого процесса. Одними из таких закономерностей являются скорость несущей среды и мелкодисперсных фаз, радиусы газовых пу-

зырей, а также внутреннее давление несущей среды [4].

Задача равномерного диспергирования несмешивающихся или плохо смешивающихся компонентов на этапе проектирования технологического процесса и оборудования для его осуществления является перспективной для многофазных сред и, в частности, для трехкомпонентных сред «жидкость-газ-твердая фаза». Получение устойчивых многофазных сред имеет ряд сложностей [5]:

- равномерность распределения в несущей жидкости мелких газовых пузырей усложняется их стремлением группироваться между собой, увеличиваясь в размерах;

- твердые частицы малых размеров, даже заранее равномерно распределенные в объеме жидкости, благодаря своей развитой поверхности имеют тенденцию коагулировать в локальные скопления.

Особый интерес представляет разработка математических моделей для описания процесса механоактивации многофазной жидкой системы роторными устройствами с различными типами рабочих органов. Математические модели позволяют синтезировать имитационную модель процесса механоактивации с целью определения оптимальных режимов работы оборудования с заданными исходными параметрами многофазной среды. В качестве многофазной среды будем рассматривать систему «жидкость-газ-твердая фаза». Возможно рассмотрение и двухфазных сред «жидкость-газ» или «жидкость-твердые частицы» с решением соответствующих уравнений основной системы уравнений математической модели.

Жидкость в многофазной системе является несущей средой, в которой находятся твердые частицы и сферические пузырьки газа. Математическое описание движения базируется на использовании концепции газодинамики взаимопроникающих движе-

ний сжимаемых сред [6, 7]. При этом используется ряд допущений:

- размеры частиц предполагаются меньшими минимального расстояния между ними и взаимодействие между включениями (частицами) отсутствует;

- минимальное расстояние между частицами принимается значительно меньше расстояния, на котором существенно изменяются кинематические и динамические характеристики течения;

- несущая жидкость считается идеальной, ее вязкость учитывается при описании процессов межфазного взаимодействия и свойства сжимаемости. Гидростатическое давление p принимается общим и зависящим лишь от истинной плотности ρ_2^0 несущей среды и скорости звука в ней (условие баротропности);

- в каждой точке пространства системы истинные плотности ρ_i^0 каждой из фаз ($i=1, 2, 3$) определяются по удельным показателям как суммарная масса каждой из фаз. Кроме того, задаются векторы скоростей v_i каждой из фаз, определяемые как отношение количества движения каждой из фаз в единице объема среды к средней плотности соответствующей фазы системы.

С учетом вышесказанного математическое описание для каждой рассматриваемой трехфазной среды многофазной системы уравнения движения должно включать: уравнения неразрывности (сплошности) потока, уравнения сохранения импульса и уравнение возмущающего вибрационного воздействия.

Первое уравнение системы для каждой из трех фаз можно представить в виде системы дифференциальных уравнений неразрывности (сплошности) потока [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 v_1) = 0, \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 v_2) = 0, \\ \frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_3 v_3) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_i – плотность i -й фазы, кг/м^3 ; v_i – скорость i -й фазы, м/с (величины с индексом 1

относятся к фазе газовых пузырей, с индексом 2 – к фазе несущей среды, с индексом 3 – к твердой фазе).

Для установившегося движения сжимаемой жидкости $\operatorname{div}(\rho_2 v_2) = 0$.

Второе уравнение сохранения импульса для каждой фазы представим в виде системы [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_1}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_1^0} \nabla p + \frac{1}{\rho_1} \sum_{j=1}^3 K_{j1} + Q_1, \\ \frac{\partial v_2}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_2^0} \nabla p + \frac{1}{\rho_1} \sum_{j=1}^3 K_{j2} + Q_2, \\ \frac{\partial v_3}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_3^0} \nabla p + \frac{1}{\rho_3} \sum_{j=1}^3 K_{j3} + Q_3, \end{cases} \quad (2)$$

где ρ_i^0 – истинная плотность материала, кг/м^3 ; K_{ji} – функции межфазного взаимодействия, Н ; Q_i – внешняя массовая сила, отнесенная к единице массы i -й фазы, м/с^2 .

Функции межфазного взаимодействия K_{ji} учитывают силовое взаимодействие со стороны j -й фазы на i -ю и также обратные силы, действующие со стороны частиц на несущую среду. Функции K_{ji} можно аппроксимировать, считая, что они представляют собой сумму двух слагаемых: силы трения между фазами системы и силы, обусловленной эффектом присоединенной массы [4]:

$$K_{ji} = F + m_0, \quad (3)$$

где F – сила лобового гидравлического сопротивления частицы (формула Стокса), Н ; m_0 – эффект присоединенных масс, кг .

Сила лобового сопротивления частицы зависит от величины критерия Рейнольдса:

- при ламинарном режиме потока в механоактиваторе или $\operatorname{Re} < 100$

$$F = -6\pi\gamma\mu v, \quad (4)$$

где γ – радиус частицы, м ; μ – динамическая вязкость несущей среды, $\text{Па}\cdot\text{с}$; v – скорость частицы, м/с ;

- при турбулентном режиме в механоактиваторе или $\operatorname{Re} > 100$

$$F = -\frac{c_w \pi r^2 \rho_2 v^2}{2}, \quad (5)$$

где c_w – коэффициент сопротивления; ρ_2 – плотность несущей среды, кг/м³.

Коэффициент сопротивления среды движущейся твердой частице определяется экспериментально и однозначно зависит от значения критерия Re. Формулы для расчета c_w приведены в работе [8].

Эффект присоединенных масс для сферической частицы

$$m_0 = \frac{2}{3} \rho_2 \pi r^3. \quad (6)$$

Окончательно функции межфазного взаимодействия для рассматриваемого нами случая с учетом (4) и (6) примут вид:

$$K_{ji} = -6\pi r_i \mu_2 v_i + \frac{2}{3} \rho_2 \pi r_i^3. \quad (7)$$

Аналогично получают уравнение межфазного взаимодействия для турбулентного режима функционирования механоактиватора, однако вместо формулы (4) целесообразно использовать формулу (5).

Уравнение возмущающего вибрационного воздействия на жидкую систему, содержащую газы, получено в работе [5]:

$$r \cdot \ddot{r} + \frac{3}{2} \dot{r}^2 + \frac{4\gamma \dot{r}}{\rho_2^0 r} = \frac{p_0 - p}{\rho_2^0} + \frac{1}{4} |v_1 - v_2|^2 - \frac{2\sigma}{\rho_2^0 r}. \quad (8)$$

Таким образом, уравнения движения рассматриваемой трехфазной среды могут быть записаны в виде [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i v_i) &= 0; \\ \frac{\partial v_i}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_i^0} \nabla \rho + \frac{1}{\rho_i} \sum_{j=1}^3 K_{ji} + Q_i; \\ r \cdot \ddot{r} + \frac{3}{2} \dot{r}^2 + \frac{4\gamma \dot{r}}{\rho_2^0 r} &= \frac{p_0 - p}{\rho_2^0} + \frac{1}{4} |v_1 - v_2|^2 - \frac{2\sigma}{\rho_2^0 r}, \end{aligned} \right\} (9)$$

где γ – динамическая вязкость несущей среды, Па·с; p_0 – давление внутри пузырьков, Па; σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе несущей жидкости и пузырьков газа, Н/м.

При решении системы уравнений необходимо учесть, что

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\rho_i}{\rho_i^0} = 1, \quad \rho_i^0 r^3 = \text{const}, \quad \rho_3^0 = \text{const}, \quad K_{13} = K_{31} = 0$$

$$p_0 = p_0(\rho_1^0, c_1), \quad p = p(\rho_2^0, c_2), \quad i = 1, 2, 3.$$

Внешние массовые силы Q_i , приложенные к единице массы i -й фазы, обусловлены действием гравитации и внешними периодическими воздействиями, зависящими от времени t . Природа внешних массовых сил представляет собой импульсную реакцию выбрасываемой жидкости из рабочего органа механоактиватора, возникающую при вращении его ротора и вызывающую гармонические колебания компонентов многофазной системы. Закон движения твердой частицы, подвергающейся периодическим возмущением, можно представить в виде уравнения [9]

$$Q_3 = m\ddot{x} + mg + mA\omega^2 \cos \varphi - F_B, \quad (10)$$

где m – масса частицы, кг; x – смещение частицы, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; A – амплитуда колебаний жидкости, м; ω – угловая частота, рад; φ – угол, рад; F_B – выталкивающая сила, Н.

Если твердая частица находится во взвешенном состоянии и $\ddot{x} = 0$, тогда

$$mg + mA\omega^2 \cos \varphi - F_B = 0. \quad (11)$$

Флотация твердой частицы произойдет при определенном соотношении амплитуды, частоты и выталкивающей силы, определить которые можно по уравнению

$$A\omega^2 = -\frac{1}{\cos \varphi} \left(g - \frac{F_B}{m} \right). \quad (12)$$

Поскольку $F_B/m \ll g$, минимальное ускорение, при котором происходит отрыв час-

тицы от дна аппарата, будет при $\cos \varphi = \pm 1$, т. е. в моменты, когда

$$A\omega^2 = \pm g. \quad (13)$$

Выполним синтез математической блочной модели в среде MATLABSimulink, используя уравнения (1)...(13). Общий вид модели приведен на рис. 1.

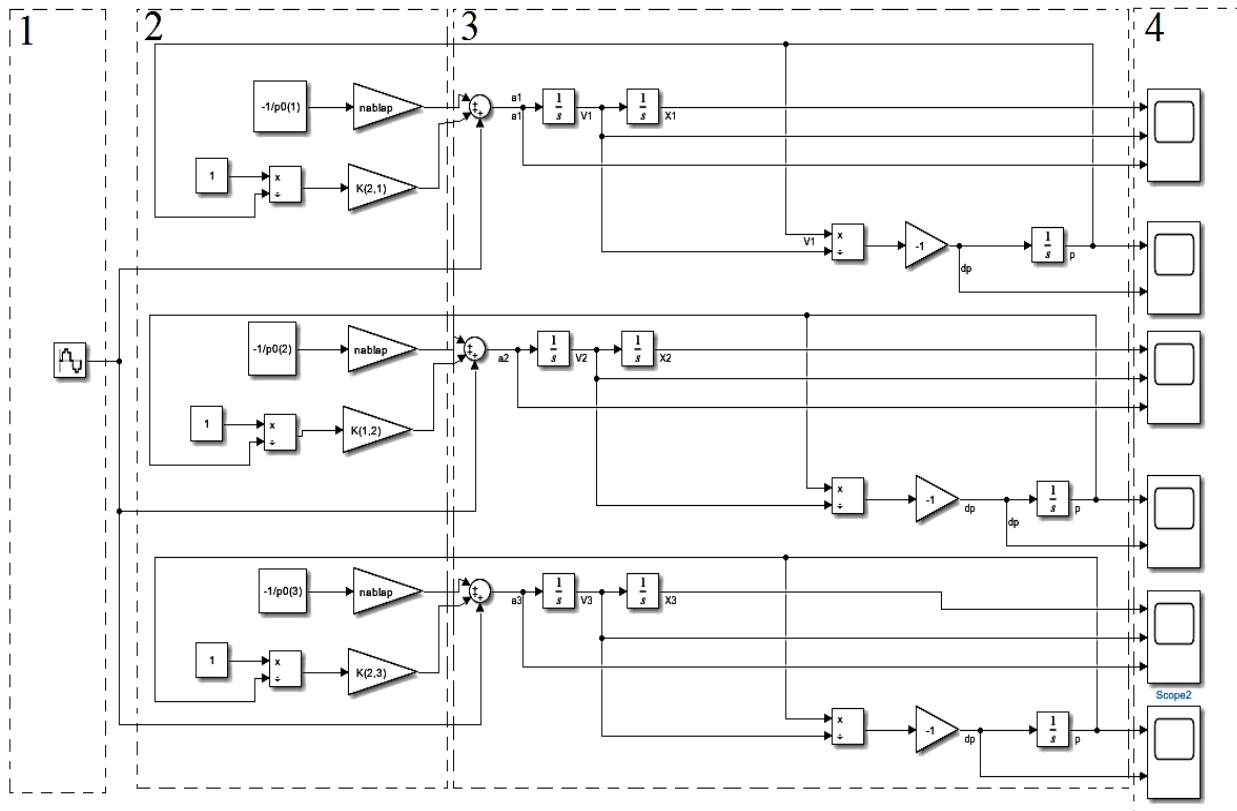


Рис. 1

Функциональные зависимости имитационной модели определяются элементами, входящими в ее структуру, и включают в себя четыре блока. Блок 1 задает периодическое возмущение многофазной среды. С помощью этого блока можно изменять такие параметры системы, как частоту, амплитуду, смещение и фазу колебательного возмущения. В блоке 2 задаются константы и исходные данные процесса механоактивации. Расчеты констант, входящих в систему уравнений (9), выполняются в отдельной подпрограмме и подгружаются в имитационную модель для выполнения вычислений кинематических параметров: скоростей и перемещений несущей фазы, газовых пузырей и твердых частиц.

Блок 3 представляет собой подпрограмму, описываемую алгоритмом для ре-

шения системы уравнений (9). В этом блоке выполняется определение выходных параметров модели системы.

Вывод численных результатов расчета осуществляется в блоке 4 с их визуализацией в виде графических зависимостей во времени. По визуализированным результатам имитационной математической модели в 4 блоке получены зависимости движения сред при периодическом возмущающем воздействии.

В качестве исходных параметров исследуемого процесса задавались следующие величины: $r_1=0,002$ мм, $r_3=0,003$ мм, $\mu=0,00101$ Па·с, $\rho_1=1,27$ кг/м³, $\rho_2=1000$ кг/м³, $\rho_3=1600$ кг/м³.

Визуализированные результаты имитационного моделирования приведены на рис. 2.

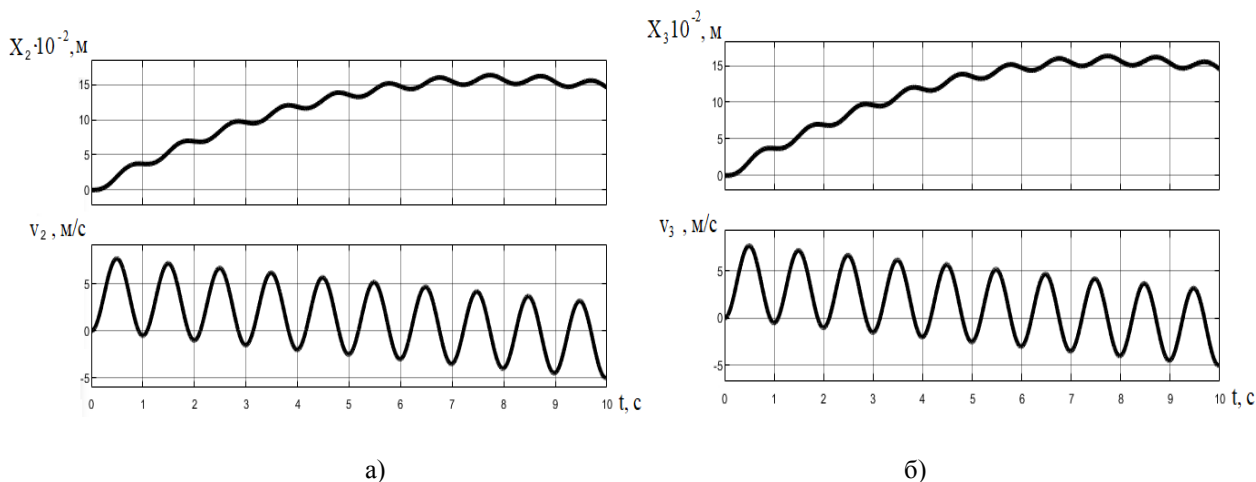


Рис. 2

Из рис. 2 следует, что под воздействием периодических возмущений многофазная система, включающая в себя «несущую жидкость-газовые пузырьки-твердые частицы», совершает гармонические колебательные движения. На рис. 2, а показано колебание свободной поверхности несущей жидкости и ее скорости, а на рис. 2, б – колебательное перемещение твердой фазы и изменение ее скорости. Параметры колебательных движений каждой из сред зависят от физических свойств среды и параметров возмущающего воздействия, оказываемого на многофазную систему. Изменяя амплитуду и частоту периодического возмущения, можно добиться перемещения частиц твердой фазы на определенную высоту в аппарате с дальнейшим их отбором либо осаждением.

По результатам имитационного моделирования сделаны следующие заключения:

- при внешнем периодическом воздействии на многофазную среду компоненты, входящие в ее структуру, совершают колебательные движения;

- амплитуда и скорость компонентов и несущей жидкости зависят от возмущающего воздействия на многофазную систему в целом;

- определение амплитуды, частоты и смещения в уравнении (13) позволит спрогнозировать кинетику поведения компонентов многофазной системы в несущей среде.

ВЫВОДЫ

Синтезированная имитационная модель позволяет выполнить оптимизацию параметров процесса механоактивации двух-, трех- и n-фазных систем путем решения соответствующих уравнений в основной системе уравнений математической модели.

Анализ синтезированной имитационной модели при исходных свойствах компонентов многофазной системы позволяет определить параметры процесса механоактивации как основы параметрической и режимной оптимизации механоактиватора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников С.О., Кузнецов В.Б., Еришов С.В. и др. Моделирование гидродинамики жидкости в рабочем органе устройства для механоактивации коллоидных дисперсных систем // Вестник Череповецкого государственного университета. 2020. №6 (99). С. 11...21.
2. Коновалова Н. И., Мартынов С.И. Моделирование динамики частиц в быстропеременном потоке вязкой жидкости // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2012. Т. 52, № 12. С. 2247.
3. Кожевников С.О., Кузнецов В.Б., Кожевникова Л.В. К постановке задачи моделирования движения жидкой среды в аппарате с мешалкой // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2020): сб. материалов XXIII Междунар. науч.-практ. форума. Иваново: ИВГПУ, 2020. С. 182...187.
4. Иванец В.Н., Бакин И.А., Бородулин Д.М. Новые конструкции центробежных смесителей непре-

рывного действия для переработки дисперсных материалов // Известия вузов. Пищевая технология. 2003. № 4. С. 94...97.

5. Ганиев Р.Ф. Динамика частиц при воздействии вибраций. Киев: Наукова думка, 1975. 168 с.

6. Мазус М.Г., Мальгин А.Д., Моргулис М.Л. Фильтры для улавливания промышленных пылей. М.: Машиностроение. 1985. 240 с.

7. Рахматулин Х.А. Газовая и волновая динамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. 196 с.

8. Коузов П.А., Скрябина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. Л.: Химия, 1983. 143 с.

9. Шульгин А.И., Назарова Л.И., Рехтман В.И. и др. Акустическая технология в обогащении полезных ископаемых. М.: Недра, 1987. 232 с.

REFERENCES

1. Kozhevnikov S.O., Kuznetsov V.B., Ershov S.V. and others. Modeling of fluid hydrodynamics in the working organ of a device for mechanical activation of colloidal dispersed systems // Bulletin of the Cherepovets State University. 2020. No.6 (99). P. 11...21.

2. Konovalova N. I., Martynov S.I. Modeling of particle dynamics in a rapidly alternating viscous fluid flow // Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2012. Vol. 52, No. 12. P. 2247.

3. Kozhevnikov S.O., Kuznetsov V.B., Kozhevnikova L.V. To the formulation of the problem of modeling the movement of a liquid medium in an apparatus

with a stirrer // Physics of fibrous materials: structure, properties, high-tech technologies and materials (SMARTEX-2020): collection of materials XXIII International Scientific-practice forum. Ivanovo: IVSPU, 2020. P.182...187.

4. Ivanets V.N., Bakin I.A., Borodulin D.M. New designs of continuous centrifugal mixers for processing dispersed materials // Izvestiya vuzov. Food technology. 2003. No. 4. P. 94...97.

5. Ganiev R.F. Dynamics of particles under the influence of vibrations. Kiev: Naukova Dumka. 1975, 168 p.

6. Mazus M.G., Malgin A.D., Morgulis M.L. Filters for capturing industrial dusts. M.: Mechanical engineering. 1985. 240 s.

7. Rakhmatulin H.A. Gas and wave dynamics. M.: Publishing House of Moscow State University, 1983. 196 p.

8. Kouzov P.A., Scriabina L.Ya. Methods for determining the physico-chemical properties of industrial dusts. L.: Chemistry, 1983. 143 p.

9. Shulgin A.I., Nazarova L.I., Rehtman V.I. et al. Acoustic technology in the enrichment of minerals. M.: Nedra, 1987. 232 p.

Рекомендована кафедрой электроники и микропроцессорных систем Ивановского энергетического университета им. В.И. Ленина. Поступила 21.02.24.