

С. И. Ханин, Р. В. Зыбин, В. П. Воронов, О. С. Мордовская

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ МАТЕРИАЛОМЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ В БИСЕРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ВИНТОВЫМ УСТРОЙСТВОМ *

Аннотация. Применение бисерных мельниц распространено на промышленных предприятиях для тонкого и сверхтонкого помола различных многокомпонентных суспензий. Показаны целесообразность и возможность их конструктивного совершенствования. Приведено описание винтовых устройств, обеспечивающих повышение эффективности процесса диспергирования материала в корпусе мельницы. Обоснована необходимость в разработке математического описания, характеризующего работу бисерной мельницы разработанной конструкции, для установления ее рациональных параметров. Разработано математическое описание для определения продольной, радиальной и окружной компонент поля скоростей движения материаломелюющей загрузки в корпусе горизонтальной бисерной мельницы с винтовыми устройствами. Проведены исследования влияния шага винта лопасти на величины компонент скорости ее движения, установлены закономерности, характеризующие возможность интенсификации процесса измельчения материала.

Ключевые слова: бисерная мельница, математическое описание, поле скоростей, частота вращения, измельчение.

Для цитирования: Определение поля скоростей материаломелюющей загрузки в бисерной мельнице с винтовым устройством / С. И. Ханин, Р. В. Зыбин, В. П. Воронов, О. С. Мордовская // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 209–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_209.

Введение

Процесс измельчения требует значительных энергозатрат. Тонкое и сверхтонкое измельчение относятся к наиболее энергоемким технологическим процессам. Одним из основных способов получения тонкодисперсных частиц является диспергационный. Часто используемым оборудованием для измельчения в жидкой среде являются бисерные мельницы. Их ключевые преимущества: простота конструкции, относительно высокая производительность при компактных размерах, мал шумность в работе, отсутствие металлического намола от мелющих тел, высокая однородность измельченного продукта и высокий уровень герметизации оборудования.

Благодаря сочетанию высокой эффективности и универсальности бисерные мельницы завоевали широкую популярность в различных отраслях промышленности, включая металлургическую, химическую, фармацевтическую, пищевую, косметическую и другие [1, 2]. Они незаменимы в тех процессах, где необходимо обеспечить интенсивное измельчение и равномерное смешивание материалов. В основном применяются два типа бисерных мельниц – вертикальные и горизонтальные.

В производстве лакокрасочных материалов (ЛКМ) бисерные мельницы выступают ключевым технологическим оборудованием. Процедура их замены на более эффективные аналоги сопряжена с существенными материальными затратами на реконструкцию производственного комплекса, а также с экономическими потерями, вызванными временным прекращением эксплуатации оборудования.

В этой связи разработка инновационных технических решений, ориентированных на повышение производительности и снижение удельного энергопотребления (применительно как к вновь создаваемому, так и к эксплуатируемому оборудованию в рамках плановых ремонтных работ), способствует формированию устойчивых конкурентных преимуществ предприятия.

Значения показателей работы технологических машин зависят от сочетания конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих реализацию протекающих технологических процессов и их качественные и количественные характеристики [3–6].

С целью повышения эффективности процесса измельчения авторами предложена конструкция бисерной мельницы с многозаходными винтовыми лопастями [7]. В работе [8] была установлена целесообразность проведения теоретических и экспериментальных исследований, направленных на исследование

* Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

процесса измельчения материала в бисерной мельнице с многозаходными винтовыми лопастями и определение рациональных конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих повышение эффективности этого процесса

Разработка математического описания процессов, происходящих внутри оборудования, является важным этапом, позволяющим установить рациональные параметры на этапе проектирования оборудования. В бисерной мельнице измельчение преимущественно происходит за счет истирания частиц материала о мелющие тела в материаломелющей загрузке, перемещение которой осуществляется за счет воздействия на нее вращающегося с большой скоростью рабочего органа в виде жестко закрепленных на валу винтовых лопастей. Определение поля скоростей движения мелющей загрузки от их воздействия позволит установить конструктивные и технологические параметры бисерной мельницы, обеспечивающие ее эффективную работу.

Основная часть

На рис. 1 приведена схема предлагаемой конструкция бисерной мельницы с многозаходными винтовыми лопастями, интенсифицирующими процесс измельчения материала [7]. Мельница работает следующим образом: крутящий момент от привода передается валу 3. Вал с жестко закрепленными многозаходными лопастями 4 и выходным сепаратором 5 приводится во вращение. Направление вращения вала со стороны выходного сепаратора противоположно направлению заходов винта приближенных к сепаратору многозаходных лопастей. Предназначенный для помола материал в виде суспензии, подается под давлением через загрузочное отверстие 2 в корпус 1 с мелющей загрузкой в виде мелющих тел.

Материал в виде суспензии с уменьшающимися в результате интенсивного воздействия мелющими телами в размерах частицами под давлением со стороны вновь нагнетаемой через загрузочное отверстие 2 суспензии перемещается к выходному сепаратору 5. Из поступившей в выходной сепаратор 5 суспензии выделяются частицы, размеры которых превышают требуемые, а также попавшие в него мелющие тела, и возвращаются в материаломелющую загрузку, расположенную между многозаходными винтовыми лопастями. Материал, прошедший через разгрузочный патрубок 6, направляется в корпус на повторное измельчение через загрузочный патрубок 2, тем самым образуя замкнутый цикл измельчения, при котором качество помола материала будет определяться кратностью циркуляций.

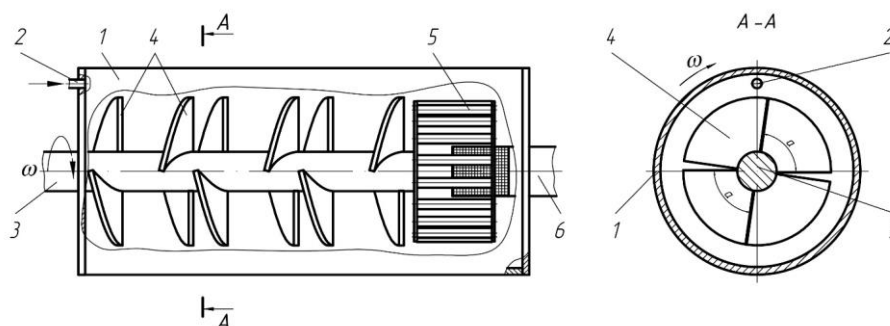


Рис. 1. Схема корпусной части бисерной мельницы:

1 – корпус, 2 – загрузочный патрубок, 3 – лопастной вал, 4 – многозаходная винтовая лопасть, 5 – сепаратор, 6 – разгрузочный патрубок

Для определения поля скоростей материаломелющей загрузки для начала приведем расчетную схему (рис. 2).

Рассмотрение скоростного режима движения вязкой среды, состоящей из жидкости, мелющих тел и твердых частиц материала, при условии, что плотность данной среды является постоянной величиной ($\rho = \text{const}$), можно провести в рамках уравнения непрерывности [9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность рассматриваемой вязкой среды, кг/м³;
 \vec{v} – вектор скорости движения вязкой среды, м/с;
 $\vec{\nabla}$ – дифференциальный оператор Набла.

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \vec{k}, \quad (2)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты в декартовой системе координат по осям x, y, z соответственно.

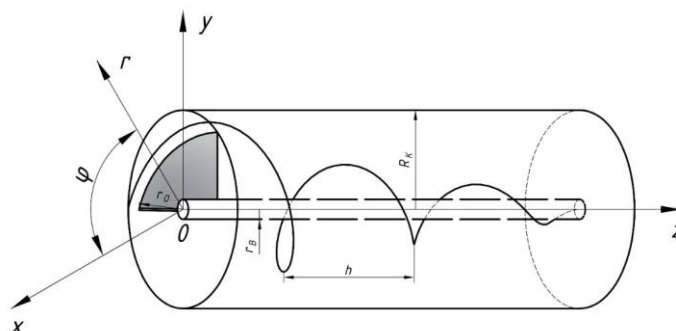


Рис. 2. Схема к расчету

Решение уравнения (1) при условии $\rho = \text{const}$ ищем в следующем виде:

$$\vec{\vartheta} = -\vec{\nabla}\psi, \quad (3)$$

где ψ – скалярная функция, которая в силу аксиальной симметрии цилиндрической камеры зависит только от координат r, z , $\psi = \psi(r, z)$.

$$\vec{\vartheta} = \{\vartheta_r, \vartheta_z, \vartheta_\varphi\}. \quad (4)$$

С учётом (3) уравнение (1) принимает вид:

$$\Delta\psi = 0, \quad (5)$$

где Δ – оператор Лапласа.

$$\Delta = (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (6)$$

В силу того, что корпус рассматриваемой бисерной мельницы обладает осевой симметрией, так как выполнен в виде цилиндра, поэтому математическое описание скорости движения вязкой среды проведем в цилиндрической системе координат r, φ, z (рис. 2), которая с декартовой системой связана соотношениями:

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad (7)$$

$$y = r \cdot \sin \varphi, \quad (8)$$

$$z = z. \quad (9)$$

Поле скоростей материаломелющей загрузки в бисерной мельнице в цилиндрической системе координат представим в следующем виде:

$$\vec{\vartheta} = \vartheta_r \cdot \vec{e}_r + \vartheta_\varphi \cdot \vec{e}_\varphi + \vartheta_z \cdot \vec{e}_z, \quad (10)$$

где $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ – орты цилиндрической системы координат.

На основании сказанного уравнение (5) в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0. \quad (11)$$

Для определения коэффициента μ динамической вязкости среды воспользуемся формулой Эйнштейна:

$$\mu = \mu_0 \left(1 + \frac{5}{2} C_0 \right), \quad (12)$$

где C_0 – объемная доля частиц материала в вязкой среде;
 μ_0 – коэффициент динамической вязкости чистой жидкости.
 Введем следующее обозначение:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{\mu_0 (1 + \frac{5}{2} C_0)}}, \quad (13)$$

где ω – частота вращения вязкой среды, с^{-1} .

Вязкую среду можно представить как квазитвердое тело, частота вращения ω которого будет соответствовать частоте вращения вала с винтовой лопастью.

Решение уравнения (11) ищем в виде:

$$\psi(r, z) = \phi(r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z). \quad (14)$$

Подстановка (14) в (11) дает:

$$\frac{d^2 \phi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\phi}{dr} - \alpha^2 \cdot \phi = 0. \quad (15)$$

Решением уравнения (15), удовлетворяющего условию ограниченности в точке $r = 0$, является функция Бесселя нулевого порядка [10].

Получаем:

$$\psi(r, z) = C_1 \cdot J_0(\alpha \cdot r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (16)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Постоянная величина C_1 находится из начального условия:

$$\vartheta_z(r = r_0, z = 0) = \omega \cdot h, \quad (17)$$

где h – шаг винта, м;

r_0 – радиус винтовой лопасти, м.

Исходя из начального условия (17) находим, что:

$$C_1 = \frac{\omega \cdot h}{\alpha \cdot J_0(\alpha \cdot r_0)}. \quad (18)$$

На основании полученных выше соотношений находим компоненты скоростей:

$$\vartheta_r = \frac{\omega \cdot h}{J_0(\alpha \cdot r_0)} \cdot J_1(\alpha \cdot r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (19)$$

где J_1 – функция Бесселя первого порядка.

$$\vartheta_z = \frac{\omega \cdot h}{J_0(\alpha \cdot r_0)} \cdot J_0(\alpha \cdot r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z). \quad (20)$$

Проекцию окружной скорости ϑ_φ можно представить в виде:

$$\vartheta_\varphi = R(r) \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (21)$$

где $R(r)$ – линейная функция, значение которой можно найти из следующих соображений [11]:

$$r = r_B, z = 0, R(r_B) = \omega \cdot r_B, \quad (22)$$

где r_B – радиус вала, м.

$$r = r_0, z = 0, R(r_0) = \omega \cdot r_0. \quad (23)$$

$$r = R_K, z = 0, R(R_K) = 0, \quad (24)$$

где R_K – радиус помольной камеры, м.

С учетом (18) и (19) и (20) выражение (17) запишем в следующем виде:

$$\vartheta_\varphi = \omega \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \cdot r, \text{ при } r_B \leq r \leq r_0, \quad (25)$$

$$\vartheta_\varphi = \omega \cdot \exp(-\alpha \cdot z) \cdot \frac{r_0 \cdot (R_K - r)}{R_K - r_0}, \text{ при } R_K \geq r \geq r_0. \quad (26)$$

Таким образом, выражения (19), (20), (25) и (26) описывают поле скоростей движения вязкой среды от воздействия винтовой лопасти.

На основании полученных аналитических выражений, определяющих поле скоростей материаломелюющей загрузки в бисерной мельнице, построим графические зависимости.

Используем предложенное математическое описание для установления поля скоростей применительно к камере измельчения бисерной мельницы. Рассмотрим параметры промышленной горизонтальной бисерной мельницы БМ-5 от фирмы ООО «ПромДеталь». Мельница имеет следующие технические характеристики: объем камеры измельчения $V_K = 5$ л; объем мелющих тел (бисера) $V_{MT} = 3,5$ л; размер мелющих тел $d_{MT} = 1,5 \dots 3 \times 10^{-3}$ м; мощность привода мельницы $N_{пр} = 7,5$ кВт; число оборотов ротора $\omega = 1440$ об/мин = 24 с⁻¹; радиус помольной камеры $R_K = 0,066$ м; радиус перемешивающих устройств в виде дисков $r_0 = 0,055$ м; радиус вала $r_B = 0,027$ м. Мельница применяется в производстве ЛКМ.

Для анализа полученных выражений используем вычислительный программный продукт Maple, широко применяемый в научных исследованиях [12].

Рассмотрим камеру измельчения с радиусом $R_K = 0,066$ м с расположенной винтовой лопастью, имеющей шаг винта $h_1 = 0,165$ м, вращающейся с числом оборотов $\omega = 24$ с⁻¹ (вариант 1). Материаломелюющей загрузке, в виде вязкой среды, назначим следующие свойства: плотность вязкой среды $\rho = 1684$ кг/м³, объемная доля частиц материала в вязкой среде $C_0 = 0,3$, коэффициент динамической вязкости чистой жидкости $\mu_0 = 1,005$ МПа·с. Графические зависимости, построенные с использованием полученных выражений, приведены на рис. 3.

Компонента скорости ϑ_r (рис. 3, а) при изменении координаты z в интервале $0 \leq z \leq 0,38$ м экспоненциально убывает, а при изменении r в интервале $0,027 \leq r \leq 0,066$ м линейно возрастает. На указанных интервалах компонента скорости $\vartheta_{r11} = 0,04$ м/с принимает наименьшее значение при $r = 0,027$ м и $z = 0,38$ м и наибольшего значения $\vartheta_{r12} = 0,62$ м/с достигает при $r = 0,066$ м и $z = 0$.

Компонента скорости ϑ_z (рис. 3, б) при изменении координаты z в интервале $0 \leq z \leq 0,38$ м экспоненциально убывает, а при изменении r в интервале $0,027 \leq r \leq 0,066$ м линейно возрастает. На указанных интервалах компонента скорости $\vartheta_{z11} = 0,63$ м/с принимает наименьшее значение при $r = 0,027$ м и $z = 0,38$ м и наибольшее значение $\vartheta_{z12} = 3,99$ м/с достигает при $r = 0,066$ м и $z = 0$.

Компонента скорости ϑ_φ (рис. 3, в) при изменении координаты z в интервале $0 \leq z \leq 0,38$ м экспоненциально убывает, а при изменении r в интервале $0,027 \leq r \leq 0,066$ м характер изменения функции носит нелинейный характер: сначала функция возрастает до экстремума, который возникает при

$r = r_0 = 0,055$ м, т.е. когда движущаяся среда находится как на границе винта, где и возникает наивысшая окружная скорость для винтовой лопасти. После этого компонента скорости ϑ_φ стремится к 0 м/с на стенках помольной камеры.

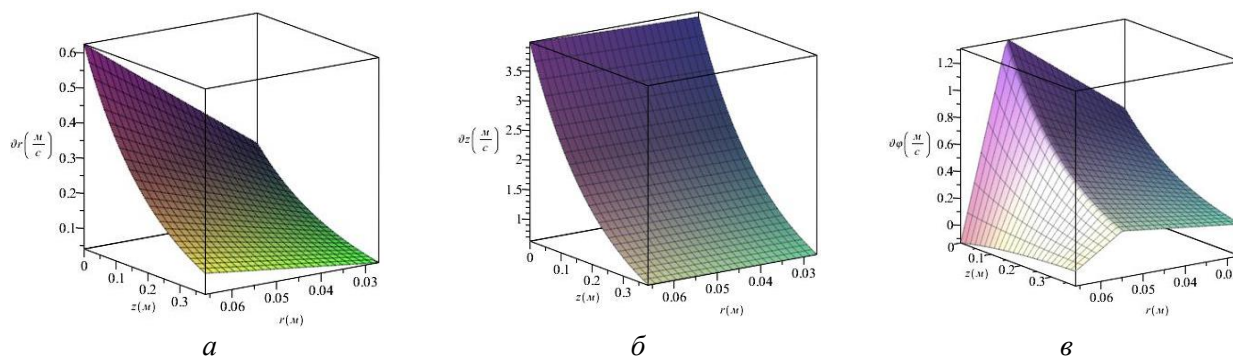


Рис. 3. Графические зависимости изменения компонентов скорости v_r (а), v_z (б), v_ϕ (в) от изменения координат z и r при $h = 0,165$ м

Рассмотрим использование винтовой лопасти с шагами $h_2 = 0,13$ м и $h_3 = 0,2$ м (варианты 2 и 3, соответственно). Исходя из полученных графических зависимостей (рис. 3, в; рис. 4, в; рис. 5, в), можно отметить, что на компоненту скорости v_ϕ на заданном интервале изменение шага h не оказывает никакого влияния.

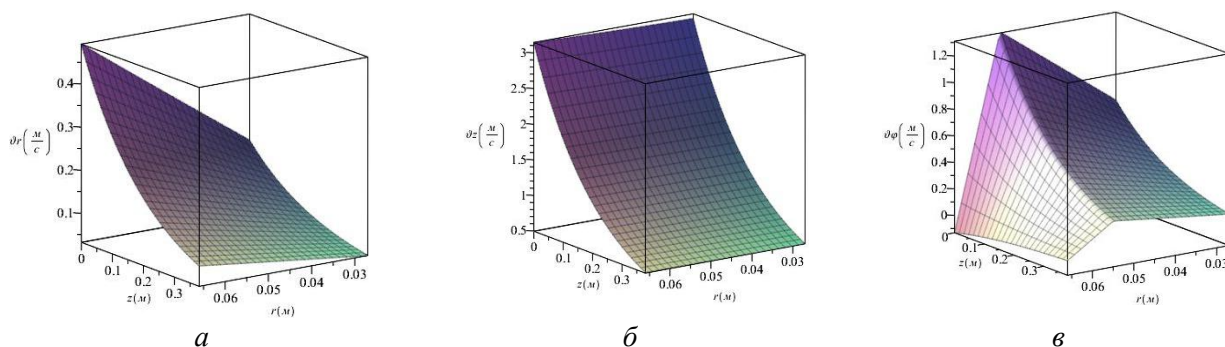


Рис. 4. Графические зависимости изменения компонентов скорости v_r (а), v_z (б), v_ϕ (в) от изменения координат z и r при $h = 0,13$ м

При шаге $h_2 = 0,13$ м компонента скорости v_r (рис. 4, а) на ранее указанных интервалах принимает наименьшее и наибольшее значения $v_{r21} = 0,032$ м/с и $v_{r12} = 0,49$ м/с соответственно. При шаге $h_3 = 0,2$ м компонента скорости v_r (рис. 5, а) принимает наименьшее и наибольшее значения: $v_{r31} = 0,049$ м/с и $v_{r32} = 0,75$ м/с соответственно.

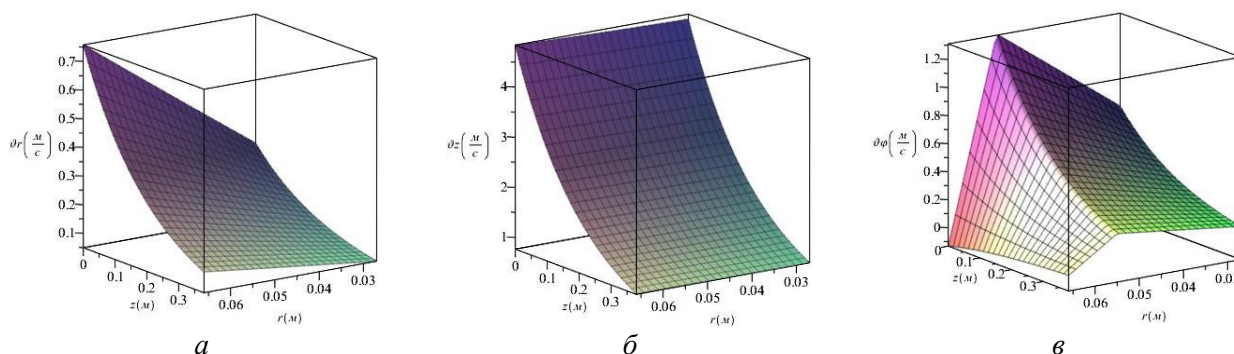


Рис. 5. Графические зависимости изменения компонентов скорости v_r (а), v_z (б), v_ϕ (в) от изменения координат z и r при $h = 0,2$ м

При использовании винтовой лопасти с шагом $h_2 = 0,13$ м (рис.4, б) компонента скорости v_z изменяется с наименьшего $v_{z21} = 0,49$ м/с до наибольшего значения $v_{z22} = 3,14$ м/с на интервалах $0 \leq z \leq 0,38$ м и $0,027 \leq r \leq 0,066$ м. При использовании винтовой лопасти с шагом $h_3 = 0,2$ м компонента скорости v_z (рис. 5, б) варьируется от $v_{z31} = 0,76$ м/с до $v_{z32} = 4,83$ м/с.

Рассмотрим изменения соотношения значений компонент скоростей для $v_{r \min}$, $v_{r \max}$, $v_{z \min}$ и $v_{z \max}$ при изменении шага винта h . В таблице первый числовой индекс у отношений Δ значений пара-

метров для рассматриваемых вариантов указывает на вариант, значение которого в числителе рассматриваемого отношения, а второй – в знаменателе. Так, для $\Delta\vartheta_{r1/2}$ рассматривается отношение значения радиальной компоненты скорости, полученной для первого варианта исполнения винтовой лопасти, к значению радиальной компоненты скорости, полученной для второго варианта ее исполнения.

Значения и отношения параметров для рассмотренных вариантов

Параметр	Значение параметра для рассматриваемого варианта			Значение отношения параметров для рассмотренных вариантов, Δ		
	№ 1	№ 2	№ 3	$\Delta_{3/1}$	$\Delta_{1/2}$	$\Delta_{3/2}$
$\vartheta_{r \min}$, м/с	$\vartheta_{r1} = 0,04$	$\vartheta_{r2} = 0,032$	$\vartheta_{r3} = 0,049$	1,225	1,250	1,531
$\vartheta_{r \max}$, м/с	$\vartheta_{r12} = 0,62$	$\vartheta_{r22} = 0,49$	$\vartheta_{r32} = 0,75$	1,210	1,265	1,530
$\vartheta_{z \min}$, м/с	$\vartheta_{z11} = 0,63$	$\vartheta_{z21} = 0,49$	$\vartheta_{z31} = 0,76$	1,206	1,286	1,551
$\vartheta_{z \max}$, м/с	$\vartheta_{z12} = 3,99$	$\vartheta_{z22} = 3,14$	$\vartheta_{z32} = 4,83$	1,211	1,271	1,538
h , м	$h_{11} = 0,165$	$h_{12} = 0,13$	$h_{13} = 0,2$	1,212	1,269	1,538

Исходя из полученных значений, необходимо отметить, что увеличение шага винта h лопасти приводит к значительному увеличению скоростных параметров материаломелющей загрузки как в радиальном, так и в продольном направлениях. При этом значения отношений компонент скоростей достаточно близко к отношению значений шага винта h рассматриваемых вариантов исполнения лопастей. Так, отношения параметров, полученных по варианту 3 к полученным по варианту 2 для $\vartheta_{r \min}$, $\vartheta_{r \max}$, $\vartheta_{z \min}$ и $\vartheta_{z \max}$ и h , соответственно составят: 1,531, 1,530, 1,551, 1,538 и 1,538. Повышение значений скоростных параметров материаломелющей загрузки приведет к интенсификации процесса измельчения материала.

Выражения (19), (20), (25) и (26) позволяют получить математические описания абсолютной и средней скоростей движения вязкой среды от воздействия винтовой лопасти, представляющие собой предпосылки для математического описания процесса измельчения материала в корпусе бисерной мельницы с рассматриваемыми винтовыми устройствами, мощности, затрачиваемой на реализацию этого процесса и установления рациональных основных конструктивно-технологических параметров мельницы. Это является предметом дальнейших исследований.

Выводы

1 Рассмотрены целесообразность и возможность конструктивного совершенствования распространенных в промышленности бисерных мельниц. Обоснована необходимость разработки математического описания для поиска рациональных параметров, характеризующих работу бисерной мельницы разработанной конструкции.

2 Разработан метод математического описания, и на его основе найдены компоненты вектора скорости. С использованием вычислительного пакета Maple исследовано изменение компонент поля скоростей движения материаломелющей загрузки по приведенному математическому описанию для камеры измельчения с радиусом $R_k = 0,066$ м в продольном ($0 \leq z \leq 0,38$ м) и радиальном ($0,027 \leq r \leq 0,066$ м) направлениях при варьировании шага винта h лопасти. Установлено значительное влияние значений шага винта лопасти на величины продольной и радиальной компонент скорости ее движения, что характеризует возможность интенсификации процесса измельчения материала в корпусе мельницы.

3 Приведенное математическое описание поля скоростей движения материаломелющей загрузки от воздействия винтовой лопасти целесообразно использовать для математического описания абсолютной и средней скоростей ее движения, процесса измельчения материала, мощности, затрачиваемой на реализацию этого процесса и установления рациональных основных конструктивно-технологических параметров мельницы.

Список литературы

1 Использование бисерных мельниц в фармацевтической биотехнологии / О. Запорожец, К. Р. Грининг, О. О. Губеня, Ю. С. Телечкун // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: Материалы 17-го

References

1 Use of bead mills in pharmaceutical biotechnology / O. Zaporozhets, K. R. Grining, O. O. Gubeny, Yu. S. Telechkun // Global economy and business administration of small and medium-sized enterprises : Proceedings of the 17th Inter-

Международного научного семинара, проводимого в рамках 19-й международной научно-технической конференции, Минск, 25–26 марта 2021 года. – Минск : Право и экономика, 2021. – С. 183–185.

2 **Ермилов, П. И.** Диспергирование пигментов: (Физико-химические основы) / П. И. Ермилов. – Москва : Химия, 1971. – 299 с.

3 A novel approach for modelling of physical interactions between slurry, grinding media and mill structure in wet stirred media mills / S. B. Larsson, B. I. Pålsson, M. Parian, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.1016/j.mineng.2019.106180.

4 **Rule, C.** IsaMill™ design improvements and operational performance at Angle Platinum, in Proceedings Metplant / C. Rule, H. De Waal // The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – Melbourne, 2011. – P. 176–192.

5 **Baigereyev, S.** The Experimental Investigation of a New Design of Stirred Media Mill / S. Baigereyev // BULLETIN of L. N. Gumilyov ENU. Technical Science and Technology Series. – 2023. – No. 1 (142). – P. 32–43. – DOI 10.32523/2616-7263-2022-142-1-32-43.

6 A Novel Particle-Based Approach for Modeling a Wet Vertical Stirred Media Mill / S. Larsson, J. M. Rodríguez Prieto, H. Heiskari, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.3390/min11010055.

7 **Патент № 2813177 C1 Российская Федерация, МПК В02С 17/16.** Мельница-мешалка / С. И. Ханнин, Р. В. Зыбин, О. С. Мордовская; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2023121803; заявл. 21.08.2023; опубл. 07.02.2024.

8 Исследование влияния многозаходных винтовых лопастей на энергетическое состояние мелющих тел в бисерной мельнице / С. И. Ханнин, Р. В. Зыбин, О. С. Мордовская, В. А. Чалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2024. – № 2. – С. 80–89. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-2-80-89.

9 **Жуковский, Н. Е.** Теоретическая механика / Н. Е. Жуковский. – 2-е изд. – Москва; Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. – 811 с.

10 **Тихонов, А. Н.** Уравнения математической физики : учебник для физико-математических специальностей / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Издательство Московского университета; Наука, 2004. – 798 с.

national scientific seminar held within the framework of the 19th international scientific and technical conference, Minsk, March 25–26, 2021. – Minsk : Law and Economics, 2021. – P. 183–185.

2 **Ermilov, P. I.** Dispersion of pigments: (Physical and chemical principles) / P. I. Ermilov. – Moscow : Chemistry, 1971. – 299 p.

3 A novel approach for modelling of physical interactions between slurry, grinding media and mill structure in wet stirred media mills / S. B. Larsson, B. I. Pålsson, M. Parian, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.1016/j.mineng.2019.106180.

4 **Rule, C.** IsaMill™ design improvements and operational performance at Angle Platinum, in Proceedings Metplant / C. Rule, H. De Waal // The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. – Melbourne, 2011. – P. 176–192.

5 **Baigereyev, S.** The Experimental Investigation of a New Design of Stirred Media Mill / S. Baigereyev // BULLETIN of L. N. Gumilyov ENU. Technical Science and Technology Series. – 2023. – No. 1 (142). – P. 32–43. – DOI 10.32523/2616-7263-2022-142-1-32-43.

6 A Novel Particle-Based Approach for Modeling a Wet Vertical Stirred Media Mill / S. Larsson, J. M. Rodríguez Prieto, H. Heiskari, P. Jonsén // Minerals. – 2021. – Vol. 11, No. 55. – DOI 10.3390/min11010055.

7 **Patent No. 2813177 C1 Russian Federation, IPC B02C 17/16.** Mixer mill / S. I. Khanin, R. V. Zybin, O. S. Mordovskaya; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov". – No. 2023121803; declared 21.08.2023; published 07.02.2024.

8 Study of the influence of multi-start screw blades on the energy state of grinding media in a bead mill / S. I. Khanin, R. V. Zybin, O. S. Mordovskaya, V. A. Chalov // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. – 2024. – No. 2. – P. 80–89. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-2-80-89.

9 **Zhukovsky, N.E.** Theoretical Mechanics / N. E. Zhukovsky. – 2nd ed. – Moscow; Leningrad : State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1952. – 811 p.

10 **Tikhonov, A. N.** Equations of mathematical physics : a textbook for physicomathematical specialties / A. N. Tikhonov, A. A. Samarsky. – Moscow : Moscow University Publishing House; Nauka, 2004. – 798 p.

11 **Stender, H. H.** Einfluss von Größe und Bauart auf die Zerkleinerung in Rührwerkskugelmöhlen, Dissertation, TU Braunschweig. – 2002. – ISBN 9783736903876.

12 **Говорухин, В.** Компьютер в математическом исследовании / В. Говорухин, Б. Цибулин. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 624 с.

11 **Stender, H. H.** Influence of size and design on comminution in ball mills with stirring, Dissertation, TU Braunschweig. – 2002. – ISBN 9783736903876.

12 **Govorukhin, V.** Computer in mathematical research / V. Govorukhin, B. Tsibulin. – Saint Petersburg : Piter, 2001. – 624 p.

S. I. Khanin, R. V. Zybin, V. P. Voronov, O. S. Mordovskaya

DETERMINATION OF THE VELOCITY FIELD OF THE MATERIAL GRINDING LOADING IN A BEAD MILL WITH A SCREW DEVICE

Abstract. The use of bead mills is widespread in industrial enterprises for fine and ultrafine grinding of various multicomponent suspensions. The expediency and possibility of their constructive improvement are shown. The description of screw devices providing an increase in the efficiency of the material dispersion process in the mill body is given. The necessity of developing a mathematical description characterizing the operation of the bead mill of the developed design is substantiated in order to establish its rational parameters. A mathematical description has been developed for determining the longitudinal, radial and circumferential components of the velocity field of the material-grinding load in the body of a horizontal bead mill with screw devices. Studies have been conducted on the effect of the pitch of the blade screw on the values of the components of its speed, and patterns have been established that characterize the possibility of intensifying the grinding process.

Keywords: bead mill, mathematical description, velocity field, rotation frequency, grinding.

For citation: Determination of the velocity field of the material grinding loading in a bead mill with a screw device / S. I. Khanin, R. V. Zybin, V. P. Voronov, O. S. Mordovskaya // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 209–218. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_209.

Сведения об авторах

Ханин Сергей Иванович

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), кафедра механического оборудования, доктор технических наук, профессор, e-mail: sergiykhani@gmail.com

Зыбин Роман Владимирович

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), кафедра механического оборудования, аспирант, e-mail: zybin.roman97@yandex.ru

Воронов Виталий Павлович

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ им. В. Г. Шухова), кафедра механического оборудования, кандидат физико-математических наук, профессор, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

Мордовская Ольга Сергеевна

Белгородский государственный национальный исследовательский

Information about the authors

Khanin Sergey Ivanovich

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Chair of Mechanical Equipment, Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: sergiykhani@gmail.com

Zybin Roman Vladimirovich

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Chair of Mechanical Equipment, Postgraduate Student, e-mail: zybin.roman97@yandex.ru

Voronov Vitaly Pavlovich

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU named after V. G. Shukhov), Chair of Mechanical Equipment, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Professor, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

Mordovskaya Olga Sergeevna

Belgorod State National Research University named after V. G. Shukhov

университет» (НИУ «БелГУ»),
кафедра прикладной информатики и
информационных технологий,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: unique.ox@gmail.com

(BSTU named after V. G. Shukhov),
Chair of Applied Informatics and Information
Technologies,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: unique.ox@gmail.com