УДК 534-8
DOI: 10.17277/vestnik.2026.03.pp.525-530

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЗЛА МЕЛЮЩЕГО АППАРАТА ПОГРУЖНОГО ТИПА

© В. А. Тихомиров[1], А. В. Ермолов[1], А. Б. Капранова[1] ✉

[1] *Кафедра «Теоретическая и прикладная механика», kapranova_anna@mail.ru; ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация*

Ключевые слова: бисер; корзина; мельница; параметрическая модель; разгонный элемент.

Аннотация: Проектирование физической модели разгонного элемента, как узла мелющего аппарата для диспергирования твердого осадка, выполнено с помощью параметрического моделирования. Исследование позволило установить факторы влияния из набора конструктивных параметров мельницы с погружной корзиной на технологический процесс с совмещением измельчения твердого осадка и смешения составляющих лакокрасочного продукта. Проектирование мелющего оборудования указанного типа способствует выявлению особенностей протекания данной технологической операции на примере его визуализации.

Введение

Разработка методик расчета аппаратов для диспергирования является актуальной проблемой развития лакокрасочной промышленности. Процесс диспергирования в бисерных мельницах погружного типа заключается в измельчении твердых включений с помощью бисера и перемешивании измельченных компонентов для получения суспензий [1].

При этом проектирование специального оборудование сопряжено с рядом затруднений различного характера, в том числе с оценкой параметров совмещенных процессов, влиянием физико-химических свойств рабочих материалов и т.п. Например, цветовая гамма лаков и красок, получаемых при диспергировании компонентов-пигментов, существенным образом может зависеть от площади контактных металлических поверхностей внутри рабочего объема мельницы.

Создание физической модели лабораторной установки на основе 3D-модели способствует не только визуализации совмещенных технологических процессов измельчения твердых осадков смешения компонентов в жидкой среде для получения конечного лакокрасочного продукта, демонстрации работы мелющего устройства, но и проведению реальных экспериментальных исследований со сменными элементами мелющего оборудования. Авторами предложена конструкция погружной корзины данного мелющего аппарата [2], проектирование которой требует выбора рациональных интервалов изменения конструктивных параметров с учетом целевого назначения данного устройства.

Цель работы – разработка параметрической модели узла мелющего аппарата погружного типа для создания физической модели соответствующих элементов лабораторного оборудования на основе конструктивного решения [2].

Результаты параметрической модели узла мелющего аппарата

Конкретизируем результаты параметрического проектирования узла мелющего аппарата. Уточним элементы условной классификации конструкций мелющих аппаратов [1], согласно которой различают два типа мельниц – механические и электромагнитные. Конструктивные особенности данных устройств для диспергирования твердых осадков в жидкости зависят от конкретного назначения оборудования и отличаются, как правило, типами сепаратора, ротора и ориентацией в пространстве рабочей зоны (вертикальной или горизонтальной). В настоящей работе внимание уделено проектированию аппарата погружного типа.

Согласно сформулированной цели работы определим две основные задачи, необходимые для решения: выявление особенностей перспективного направления проектирования (для достижения равномерного разбрасывания мелющего бисера по рабочей зоне с замкнутым движением жидкой среды и т.п.) и значимых факторов эффективности процесса диспергирования твердого осадка.

Учитывая выявленные ранее направления совершенствования конструкции мельницы погружного типа [1] и опыт прототипирования элементов аппарата [3], обратимся к параметрическому моделированию объекта – узла мелющего аппарата [2] (рис. 1 и 2).

Совмещенные технологические процессы измельчения и смешения реализуются при ударном взаимодействии с бисером различной конфигурации [4], чаще всего – шарами, предпочтительно стеклянными, циркониевыми или керамическими, то есть материалами с заданными показателями твердости, истираемости, химической нейтральности, ударно-вязкими свойствами и т.п. [5].

Кратко остановимся на особенностях схемы проектируемого узла мелющего аппарата (см. рис. 1). Движение бисера *5* в рабочей зоне мельницы [2] внутри размольной камеры *1* (с вертикальным валом *2* и закрепленными на нем лопатками *6* при наличии перфорацией на боковых поверхностях стенки) происходит за счет вращения разгонных элементов/ротора *3*, напротив которых имеется фиксация кольцевого разделителя *4* на внутренней части отсека камеры *1*.

Параметрическому проектированию узла мелющего аппарата предшествует выявление его значимых конструктивных параметров.

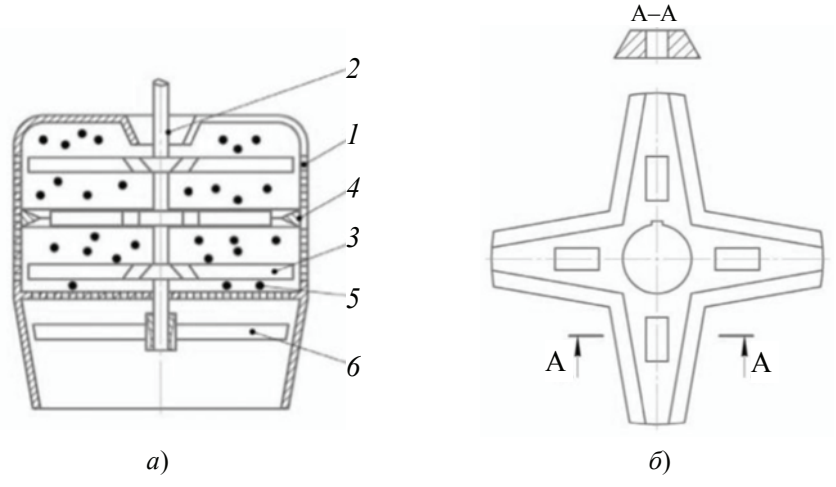

Рис. 1. Схема узла мелющего аппарата [2]:
а – корзина аппарата; *б* – конфигурация разгонных элементов

В таблице 1 приведены сведения о глобальных переменных имитационной модели (см. рис. 2) для узла мелющего аппарата (см. рис. 1) для создания лабораторного прототипа, как физической модели. Входными параметрами параметрического проектирования служат: V – требуемый объем корзины, P – мощность, N – частота вращения привода и др.

Расчет значений конструктивных характеристик корзины мелющего аппарата [2] выполняется в системе КОМПАС 3Д [6, 7] в рамках приведенных ограничений, представленных в табл. 1, в том числе допускаемых напряжений при кручении, предельных значений высоты корзины, диаметра ее рабочей области, высоты рабочей части ротора, диаметра вала. При этом значения некоторых конструктивных параметров зафиксированы: угол между пальцами ротора, количество рядов этих пальцев и т.п.

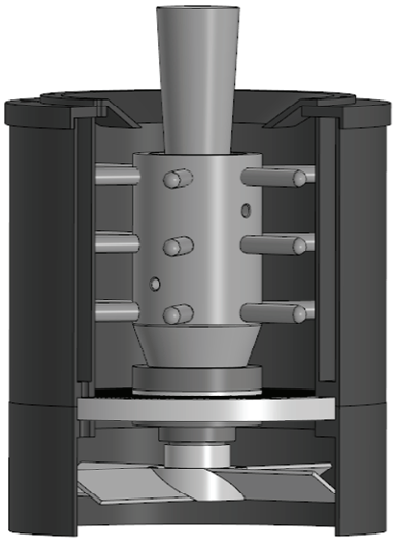

Рис. 2. Схема роторной корзины бисерной мельницы погружного типа

Таблица 1

Параметры моделирования роторной корзины бисерной мельницы погружного типа

Глобальные переменные	Обозначение/уравнение	Значение
Мощность двигателя, кВт	P	3
Частота вращения двигателя, мин$^{-1}$	N	3000
Крутящий момент двигателя, Н·м	$M = 9555P/N$	9,55
Допускаемое напряжение при кручении, МПа	$[\tau_{кр}]$	30
Объем корзины, м^3	V	0,004
Высота корзины, мм	$h \geq 1{,}25D$	200
Диаметр рабочей области корзины, мм	$D = \text{int}\sqrt[2]{\frac{4v}{h\pi}}$	160
Наружный диаметр корзины, мм	$D_1 = 1{,}5D$	240
Диаметр вала, мм	$d = \sqrt[3]{\frac{16M}{\pi[\tau_{кр}]}}$	35
Диаметр втулки ротора, мм	d_1	60
Длина рабочей части пальца ротора, мм	$l = (0{,}8d - d_2)/2$	34
Диаметр пальца ротора, мм	$d_2 \geq 0{,}2d$	8
Высота рабочей части ротора, мм	$h_1 = 1{,}5d_1$	90
Угол между пальцами, °	a	60
Число рядов пальцев ротора	n	3
Высота между рядами пальцев ротора, мм	$h_2 = h_1/n$	30

Заключение

Таким образом, сформирована имитационная модель нового узла мелющего аппарата [2] при ограничениях на входные параметры технологического процесса с перспективой разработки физической модели соответствующих элементов лабораторного оборудования специального назначения. В частности, данная модель актуальна для визуализации совмещенных технологических процессов измельчения твердых осадков смешения компонентов в жидкой среде для получения конечного лакокрасочного продукта и демонстрации работы мелющего устройства [8, 9].

Список литературы

1. Ермолов, А. В. Анализ разновидностей современного диспергирующего оборудования / А. В. Ермолов, С. Л. Мазуровский, А. Б. Капранова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2023. – № 6(52). – С. 116–124. doi: 10.25699/SSSB.2023.52.6.015

2. Патент № 2836345 C1 Российская Федерация, МПК B02C 17/00 (2006.01). Корзина погружной бисерной мельницы : № 2024126920 : заявл. 12.09.2024 : опубл. 13.03.2025 / Ермолов А. В., Мазуровский С. Л., Капранова А. Б. ; заявитель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – Бюл. № 8. – 5 с.

3. Совершенствование процесса диспергирования твердого осадка в бисерной мельнице погружного типа с элементами прототипирования конструкции / В. А. Тихомиров, А. В. Ермолов, Д. Д. Бахаева, А. Б. Капранова // ПАХТ-2025 : Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения Ю. И. Дытнерского, Москва, 10–11 апреля 2025 г. – Москва, 2025. – С. 250–254.

4. Cherje, T. W. Relationship between microsructure, hardness, Impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations / T. W. Cherje, D. J. Simbi, E. Navara // Materials and Design. – 2004. – Vol. 25, No. 1. – P. 11–18. doi: 10.1016 /S0261-3069(03)00168-7

5. Matsanga, N. Grinding Media in Ball Mills-A Review / N. Matsanga, W. Nheta, N. Chimwani // Posted: 24 April 2023. doi: 10.20944/preprints202304.0811.v1. – URL : https://www.resear chgate.net/publication/370233290_Grinding _Media_in_ Ball_Mills-A_Review (дата обращения: 13.05.2026).

6. Баянов, Е. В. Моделирование в системе КОМПАС-3Д. Базовый уровень : учебное пособие / Е. В. Баянов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – 88 с.

7. Ганков, М. С. Обзор свободно распространяемых программ для параметрического моделирования элементов энергетических установок / М. С. Ганков, В. Ю. Ильичев // Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе : Региональная научно-техническая конференция, Калуга, 19–20 апреля 2022 г. – Москва, 2022. – Том 1. – С. 138–140.

8. Тихомиров, В. А. Параметрическое проектирование узла мелющего аппарата погружного типа / В. А. Тихомиров, А. В. Ермолов, А. Б. Капранова // Математические методы в технологиях и технике. – 2025. – № 12-13. – С. 77–80.

9. Тихомиров, В. А. Параметрическая модель пальчикового ротора бисерной мельницы / В. А. Тихомиров, А. В. Ермолов, А. Б. Капранова // Технологии, дизайн, искусство – традиции и инновации : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, приуроченной к 105-летию РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, 13 мая 2026 г. – Москва, 2026. – Часть 3. – С. 118–123.

Parametric Model of a Submersible Grinding Machine Unit

© V. A. Tikhomirov[1], A. V. Ermolov[1], A. B. Kapranova[1] ✉

[1] *Department of Theoretical and Applied Mechanics, kapranova_anna@mail.ru; Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation*

Keywords: beads; basket; mill; parametric model; accelerating element.

Abstract: The design of the physical model of the accelerating element as a unit of the grinding apparatus for dispersing solid sediment was carried out using parametric modeling. The study made it possible to establish the influence factors from a set of design parameters of a mill with a submersible basket on the technological process combining grinding of solid sediment and mixing the components of a paint and varnish product. The design of grinding equipment of this type helps to identify the peculiarities of a given technological operation using the example of its visualization.

References

1. Ermolov A.V., Mazurovsky S.L., Kapranova A.B. [Analysis of Types of Modern Dispersing Equipment], *South Siberian Scientific Bulletin*, 2023, no 6(52), pp. 116-124. doi: 10.25699/SSSB.2023.52.6.015 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Ermolov A.V., Mazurovsky S.L., Kapranova A.B. *Korzina pogruzhnoy bisernoy mel'nitsy* [Submersible bead mill basket], Russian Federation, 2025, Pat. 2836345 C1 (In Russ.)

3. Tikhomirov V.A., Ermolov A.V., Bakhaeva D.D., Kapranova A.B. [Improving the process of solid sediment dispersion in a submersible bead mill with design prototyping elements], *PAKHT-2025: Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy seminar, posvyashchennyy 100-letiyu so dnya rozhdeniya Yu.I. Dytnerskogo, Moskva, 10-11 April 2025* [PAHT-2025: International scientific and practical seminar dedicated to the 100th anniversary of the birth of Yu. I. Dytnersky, Moscow, April 10-11, 2025], Moscow, 2025, pp. 250-254. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Cherje T.W., Simbi D.J., Navara E. Relationship between microsructure, hardness, Impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations, *Materials and Design*, 2004, vol. 25, no 1, pp. 11-18. doi: 10.1016 /S0261-3069(03)00168-7

5. available at: https://www.resear chgate.net/publication/370233290_Grinding_ Media_in_Ball_Mills-A_Review (accessed 13 May 2026).

6. Bayanov Ye.V. *Modelirovaniye v sisteme KOMPAS-3D. Bazovyy uroven': uchebnoye posobiye* [Modeling in the KOMPAS-3D system. Basic level: a tutorial], Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2020, 88 p. (In Russ.)

7. Gankov M.S. *Naukoyemkiye tekhnologii v priboro- i mashinostroyenii i razvitiye innovatsionnoy deyatel'nosti v vuze: Ryegional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [High-tech technologies in instrument-making and mechanical engineering and development of innovative activities in universities: Regional scientific and technical conference], Kaluga, April 19-20, 2022, Moscow, 2022, vol. 1, pp. 138-140. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Tikhomirov V.A., Ermolov A.V., Kapranova A.B. *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technology and engineering], 2025, no 12-13, pp. 77-80. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Tikhomirov V.A., Ermolov A.V., Kapranova A.B. *Tekhnologii, dizayn, iskusstvo – traditsii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarod-noy nauchno-*

prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 105-letiyu RGU im. A.N. Kosygina [Technologies, design, art - traditions and innovations: Collection of scientific papers of the International scientific and practical conference dedicated to the 105th anniversary of the A.N. Kosygin Russian State University, Moscow, May 13, 2026), 2026, Part 3, pp. 118-123. (In Russ., abstract in Eng.)

Parametrisches Knotenmodell der Tauchmahlanlage

Zusammenfassung: Die Konstruktion eines physikalischen Modells des Beschleunigungselements als Komponente einer Mahlanlage zur Dispergierung fester Rückstände ist mittels parametrischer Modellierung erfolgt. Diese Studie ermöglichte die Identifizierung von Faktoren aus den Konstruktionsparametern einer Tauchkorbmühle, die den technologischen Prozess der Kombination von Feststoffmahlung und Farb- und Lackmischung beeinflussen. Die Konstruktion dieser Mahlanlage erleichtert die Identifizierung der Prozessmerkmale dieses technologischen Vorgangs anhand seiner Visualisierung.

Modèle de noeud paramétrique rectifieuse submersible

Résumé: Est réalisée la conception d'un modèle physique de l'élément de dispersion en tant qu'unité de broyage pour disperser un précipité solide à l'aide d'une simulation paramétrique. L'étude a permis d'établir les facteurs d'influence des paramètres de la conception du moulage à panier immergé sur le processus technologique combinant le broyage des résidus solides et le mélange des composants du produit de peinture. La conception d'équipements moulants de ce type contribue à identifier les particularités du déroulement de cette opération technologique comme en témoigne de son illustration.

Авторы: ***Тихомиров Вячеслав Александрович*** – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Ермолов Алексей Вениаминович*** – старший преподаватель кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; ***Капранова Анна Борисовна*** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация.