

## ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СМЕСИТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА ДЛЯ СЫПУЧЕГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Д. В. Федорова<sup>1</sup>, Д. В. Стенько<sup>1</sup>, Д. Д. Бахаева<sup>2</sup>, А. Б. Капранова<sup>1</sup>

*Кафедры: «Теоретическая и прикладная механика» (1), kapranova\_anna@mail.ru;  
«Информационные системы и технологии» (2), ФГБОУ ВО «Ярославский  
государственный технический университет», Ярославль, Россия*

**Ключевые слова:** вторичное сырье; параметризация; параметры; процесс; смешение; центробежный смеситель; 3D-модель.

**Аннотация:** В рамках САПР выполнено проектирование центробежного смесителя для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем в зависимости от установленного набора информационных переменных. Учет набора параметров процесса смешения сыпучих компонентов аргументирует целесообразность подготовки платформы для использования киберфизических систем промышленного производства. Проанализированы основные этапы работы смесительного оборудования и преимущества аппаратов центробежного типа для осуществления процесса смешения дисперсных компонентов, в том числе вторичного сырья. Предложен условный алгоритм реализации 3D-модели и ее параметризации.

---

### Введение

Решение проблем экологического характера, в том числе связанных с утилизацией промышленных отходов и их вторичным использованием в химической промышленности, строительной индустрии, относится к актуальным вопросам глобального уровня.

Основным аргументом при этом является, с одной стороны, постоянно расширяющийся объем техногенных продуктов, отработавших свой цикл на производстве. С другой стороны, ужесточения требований по экологической безопасности к проведению технологических операций в различных отраслях промышленности в сочетании с возможностью разработки новых материалов на базе вторичных техногенных сред обозначают перспективу совершенствования процессов их переработки. Результатом такого энергоэффективного подхода становится проектирование нового оборудования специального назначения, в том числе смесителей твердых дисперсных материалов различных типов. Заметим, что зачастую для достижения указанных целей применяется не одна технологическая операция смешения, а целый комплекс предварительных этапов переработки, в частности, измельчение вязущих компонентов и наполнителей готового строительного продукта.

В частности, получение строительных смесей с заданными свойствами предполагает использование совокупности модифицирующих добавок функционального назначения в зависимости от конкретных условий применения данного сыпучего продукта. Достижение регламентной степени однородности данных дисперсных смесей является главным фактором их качества [1 – 3]. При этом для

получения смесей требуемого состава и прочностных характеристик параллельно с выбором категории добавок необходимо решить задачу определения способа дозирования и разбавления транспортируемого компонента ключевым в регламентном соотношении [4]. В качестве примеров указанных добавок строительных смесей приведем следующие материалы: метилцеллюлоза, технические полиакриламиды, известковая пыль и т.п.

Цель работы – проектирование центробежного смесителя для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем при использовании методов САПР.

### Выбор информационных переменных

Учет множества параметров процесса смешения сыпучих компонентов аргументирует целесообразность подготовки платформы для использования киберфизических систем промышленного производства. Очевидно, что физико-механические свойства смешиваемых компонентов и параметры процесса смешения должны быть учтены на каждом этапе проектирования нового смесительного оборудования [4 – 6]. Сущность процесса смешения твердых дисперсных материалов заключается в перемешивании данных компонентов до заданной степени однородности [1 – 3]. Разрыв связей при указанном перемешивании между частицами дисперсных компонентов в сопровождении явления макродиффузии [7, 8] происходит вследствие соответствующего сдвигового напора после передачи макросистеме необходимой для этого энергии. Основными этапами работы смесительного оборудования являются следующие:

– подача питателем-дозатором смешиваемых материалов ( $i = \overline{1, 2}$ ) в рабочую камеру смесителя [4 – 6];

– изменение положения частиц, составляющих компоненты, в том числе турбулентного характера, с разрывом связей между данными частицами и явлением макродиффузии [7, 8] за счет возрастания площади поверхности сдвига при подаче макросистеме энергии;

– удаление из рабочей камеры готовой смеси с регламентным значением степени однородности [4 – 6].

Указанные этапы процесса сопровождаются варьированием информационных переменных

$$Z_m(t) = \{X(t), Y(t), Q_n, k_1 = \text{const}, G_{\vartheta}, k_2 = \text{const}\}, m = \overline{1, n_0} \quad (1)$$

данной технологической операции в целях обеспечения ее управления для достижения конечной цели – заданного качества готовой дисперсной смеси.

В выражении (1) обозначены наборы параметров:

– входные

$$X(t) = \{c_{Vi}, W_{Vi}\} \quad (2)$$

при смешении дисперсных компонентов  $i = \overline{1, 2}$ ;

– выходные

$$Y(t) = \{X(t), \Delta V_C, V_C^r\}; \quad (3)$$

– конструктивные

$$\{Q_n, k_1 = \text{const}\} = \{R, H, r_0, r_1, r_2, H_1, H_2, \delta, l, \psi, N\}, k_1 = 11; \quad (4)$$

– режимные

$$\{G_{\vartheta}, k_2 = \text{const}\} = \{\omega\}, k_2 = 1. \quad (5)$$

Выражения (2) – (5) содержат следующее позиционирование:  $c_{Vi}$  – объемные доли смешиваемых дисперсных материалов;  $W_{Vi}$  – их расход по объему;  $\Delta V_C$  – погрешность абсолютная при расчете коэффициента неоднородности смеси  $V_C$ ;  $V_C^r$  – регламент по коэффициенту неоднородности. В частности, в случае аппарата центробежного типа имеем:  $R, H$  – радиус и толщина внешней цилиндрической поверхности корпуса;  $r_0$  – радиус скругления;  $r_1, r_2$  – радиусы внутренних цилиндрических поверхностей;  $H_1, H_2$  – их толщина;  $\delta, l$  – толщина и длина лопатки;  $\psi$  – характеристический угол установки лопатки;  $N$  – число лопаток;  $\omega$  – угловая скорость вращения рабочего элемента.

К преимуществам центробежных устройств для смешения сыпучих материалов [4 – 6] относятся:

- возможность эффективного смешения увлажненных дисперсных компонентов или материалов с повышенными адгезионными характеристиками за счет ударных взаимодействий с рабочими органами аппарата, предотвращающими налипание на рабочие поверхности;
- снижение потребляемой мощности благодаря уменьшению сил внутреннего трения смешиваемых материалов между их слоями вследствие фактического перемешивания частиц компонентов в разреженных потоках или при движении в тонких слоях;
- достаточно высокая производительность;
- относительно кратковременный цикл процесса получения готовой смеси.

### Условный алгоритм реализации 3D-модели

При реализации 3D-моделирования следует учитывать общие принципы программирования (описание имени переменной, присвоение значения из заданного диапазона изменения, соответствие иерархии введения переменных и т.п.) при работе с условным алгоритмом соответствующей 3D-модели и ее параметризации (рис. 1). Для повышения производительности центробежного смесителя и снижения мощности его привода проводится многократный анализ диапазонов изменения значений конструктивных параметров для выявления наиболее значимых факторов согласно предлагаемому алгоритму.

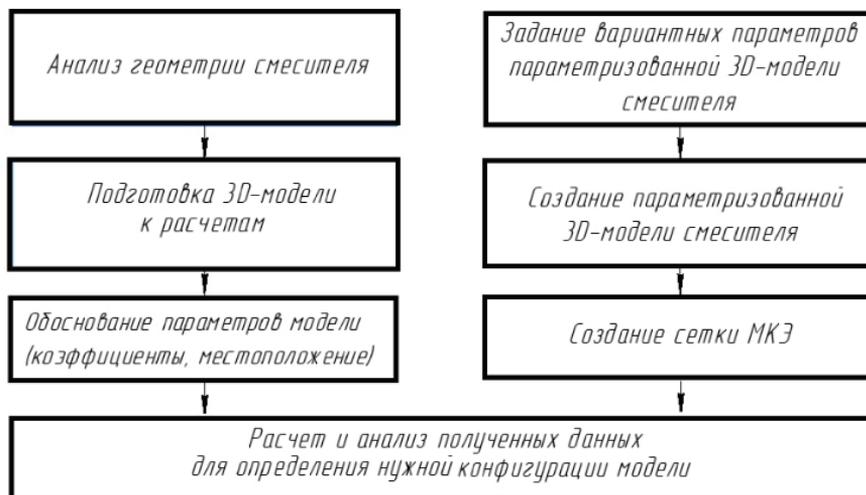
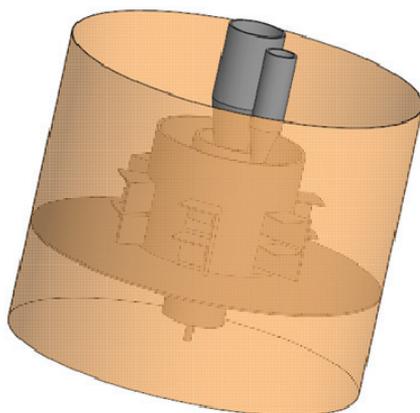


Рис. 1. Условный алгоритм реализации 3D-модели и ее параметризации методом конечных элементов (МКЭ)

Используемое 3D-моделирование, включая параметризацию профиля (рис. 2) и атрибуты трехмерной операции (выдавливание, вращение), при указанном наборе информационных переменных  $Z_m(t)$  позволяет провести анализ:

- выбора конструктивных параметров устройства [9] в целом из набора  $\{Q_{n, k_1} = \text{const}\}$  из формулы (4);
- выбора конструктивных параметров для отдельных узлов конструкции аппарата;
- механизма поведения рабочей среды в условиях реализации детерминированных или индетерминированных процессов [7, 8, 10].

Проектируемая имитационная модель позволяет автоматизировано перестраивать элементы аппарата в заданном интервале (табл. 1). На основе выявленных зависимостей проведен параметрический подбор размеров основных элементов центробежного смесителя [9, 11, 12].



**Рис. 2. Имитационная 3D-модель центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем**

Таблица 1

**Диапазоны изменения и значения конструктивных параметров центробежного смесителя**

Параметр	Диапазон изменения/значение
Радиус внешней цилиндрической поверхности корпуса, $10^{-2}$ м	2,0...2,6
Угол для закрепления лопатки, град	25...30
Радиус внутренней цилиндрической поверхности камеры компонента, $10^{-2}$ м:	
первого	8,0...9,5
второго	4,0...4,5
Толщина цилиндрических поверхностей, $10^{-3}$ м	4,0...5,0
Радиус скругления, $10^{-3}$ м	2,0
Толщина лопатки, $10^{-3}$ м	3,0...4,0
Длина лопатки, $10^{-1}$ м	1,0...1,5
Число лопаток, шт.	6

Конструктивно указанные выше преимущества центробежных смесителей реализуются при установке конусных отражателей на одном или нескольких дисках [4 – 6]. В настоящей работе применение САПР проводится при разработке конструкции центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем (см. рис. 2). Заметим, что представленная установка камер с распылительными элементами позволяет организовать получение смеси в пересекающихся разреженных потоках зернистых компонентов.

### Заключение

Таким образом, в работе получена имитационная 3D-модель центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем с учетом набора информационных переменных данной технологической операции согласно разработанному условному алгоритму реализации 3D-модели и ее параметризации. Результаты работы использованы при проектировании соответствующего смесительного оборудования в рамках системно-структурного анализа изучаемого процесса смешения.

### Список литературы

1. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // Теоретические основы хим. технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707 – 721. doi: 10.1134/S0040357118050044
2. Исследование качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А. Б. Капранова, И. И. Верлока, П. А. Яковлев, Д. Д. Бахаева // Российский хим. журнал. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 48 – 50.
3. Капранова, А. Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 3 – 9.
4. Зайцев, А. И. Методы расчета и опытные испытания новых центробежных устройств по переработке твердых дисперсных сред : монография / А. И. Зайцев, А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев. – Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2015. – 124 с.
5. Капранова, А. Б. Исследование процессов переработки дисперсных материалов : монография / А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев, М. Ю. Таршис. – Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2017. – 172 с.
6. Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет : монография / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова [и др.]. – Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2017. – 176 с.
7. Капранова, А. Б. Метод определения коэффициента макродиффузии в процессе смешения твердых дисперсных сред в центробежном аппарате / А. Б. Капранова // Математическое моделирование. – 2009. – Т. 21, № 3. – С. 83 – 94.
8. Капранова, А. Б. Определение диффузионного параметра при смешении сыпучих сред в центробежном аппарате с криволинейными лопатками / А. Б. Капранова // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2008. – Т. 51, № 4. – С. 66 – 68.
9. Пат. 2757814 Российская Федерация, МПК В01F 7/8, В01/04. Агрегат для смешения сыпучих материалов / А. Е. Лебедев, А. Б. Капранова, Д. В. Федорова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2020143438 ; заявл. 25.12.2020 ; опубл. 21.10.2021, Бюл. № 30. – 8 с.

10. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, А. И. Верлока, А. И. Зайцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 296 – 304. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304

11. Федорова, Д. В. Параметрическое проектирование центробежного смесителя зернистых сред с вторичным сырьем / Д. В. Федорова, Д. В. Стенько, Д. Д. Бахаева // XV Ежегодная науч. сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской науч. конф., 23 ноября 2021 г., Вологда. – Вологда, 2021. – Т. 1. – С. 121 – 125.

12. Применение САПР при разработке центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем / Д. В. Федорова, Д. В. Стенько, Д. Д. Бахаева, А. Б. Капранова // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 11. – С. 59 – 62. doi: 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2021\_11\_59

---

## Parametric Modeling in the Design of a Centrifugal Mixer for Bulk Secondary Raw Materials

D. V. Fedorova<sup>1</sup>, D. V. Stenko<sup>1</sup>, D. D. Bakhaeva<sup>2</sup>, A. B. Kapranova<sup>1</sup>

*Department of Theoretical and Applied Mechanics (1), kapranova\_anna@mail.ru;  
Department of Information Systems and Technologies (2),  
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

**Keywords:** secondary raw materials; parameterization; options; process; mixing; centrifugal mixer; 3D model.

**Abstract:** Using CAD, a centrifugal mixer was designed for mixing bulk materials with secondary raw materials, depending on the established set of information variables. Accounting for a set of parameters for the process of mixing bulk components argues for the expediency of preparing a platform for the use of industrial production cyber-physical systems. The main stages of the operation of mixing equipment and the advantages of centrifugal type apparatuses for the process of mixing dispersed components, including secondary raw materials, are analyzed. A conditional algorithm for the implementation of a 3D model and its parameterization is proposed.

### References

1. Kapranova A.B., Verloka I.I. [Stochastic description of the process of formation of flows of bulk components in apparatuses with brush elements], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2018, vol. 52, no. 6, pp. 707-721, doi: 10.1134/S0040357118050044 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kapranova A.B., Verloka I.I., Yakovlev P.A., Bakhayeva D.D. [Study of the quality of the mixture at the first stage of operation of a gravity-type apparatus], *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Journal of Chemistry], 2018, vol. 62, no. 4, pp. 48-50. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. [Modeling of the mixture quality criterion in the volume of a drum-tape device], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 5, pp. 3-9. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Lebedev A.Ye. *Metody rascheta i opytnyye ispytaniya novykh tsentrobezhnykh ustroystv po pererabotke tverdykh dispersnykh sred: monografiya* [Methods of calculation and experimental testing of new centrifugal devices for the processing of solid dispersed media: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2015, 124 p. (In Russ.)

5. Kapranova A.B., Lebedev A.Ye., Tarshis M.Yu. *Issledovaniye protsessov pererabotki dispersnykh materialov: monografiya* [Study of the processing of dispersed materials: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2017, 172 p. (In Russ.)

6. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Vatagin A.A., Suid S. *Apparaty dlya pererabotki dispersnykh sred. Teoriya i raschet: monografiya* [Apparatus for processing dispersed media. Theory and calculation: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2017, 176 p. (In Russ.)

7. Kapranova A.B. [Method for determining the macrodiffusion coefficient in the process of mixing solid dispersed media in a centrifugal apparatus], *Matematicheskoye modelirovaniye* [Mathematical Modeling], 2009, vol. 21, no. 3, pp. 83-94. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Kapranova A.B. [Determination of the diffusion parameter when mixing granular media in a centrifugal apparatus with curved blades], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2008, vol. 51, no. 4, pp. 66-68. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Lebedev A.Ye., Kapranova A.B., Fedorova D.V. *Agregat dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Unit for mixing bulk materials], Russian Federation, 2021, Pat. 2757814. (In Russ.)

10. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka A.I., Zaytsev A.I. [Methods for describing the motion of solid dispersed media in different planes for mixing drum sections], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 296-304, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Fedorova D.V., Sten'ko D.V., Bakhayeva D.D. *XV Yezhegodnaya nauchnaya sessiya aspirantov i molodykh uchenykh* [XV Annual scientific session of graduate students and young scientists], Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, 23 November, 2021, Vologda, 2021, vol. 1, pp. 121-125. (In Russ.)

12. Fedorova D.V., Sten'ko D.V., Bakhayeva D.D., Kapranova A.B. [Application of CAD in the development of a centrifugal apparatus for mixing bulk materials with secondary raw materials], *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering], 2021, no. 11, pp. 59-62, doi: 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2021\_11\_59 (In Russ., abstract in Eng.)

---

## Parametrische Modellierung bei der Projektierung eines Zentrifugalmischers für sekundäres Schüttgut

**Zusammenfassung:** Im Rahmen von CAD ist ein Zentrifugalmischer zum Mischen von Schüttgütern mit Sekundärrohstoffen in Abhängigkeit von einem festgelegten Satz von Informationsvariablen entworfen. Die Berücksichtigung einer Reihe von Parametern für den Prozess des Mischens von Massenkomponenten spricht für die Zweckmäßigkeit, eine Plattform für den Einsatz von cyber-physikalischen Systemen für die industrielle Produktion vorzubereiten. Analysiert sind die Hauptphasen des Betriebs von Mischanlagen und die Vorteile von Zentrifugalapparaten für den Prozess des Mischens dispergierter Komponenten, einschließlich sekundärer Rohstoffe. Ein bedingter Algorithmus zur Implementierung des 3D-Modells und seiner Parametrisierung ist vorgeschlagen.

## Modélisation paramétrique dans la conception d'un mélangeur centrifuge pour le recyclage en vrac

**Résumé:** Dans le cadre de la CAO, est conçu un mélangeur centrifuge pour mélanger des matériaux en vrac avec des matières premières secondaires en fonction d'un ensemble établi de variables d'information. La prise en compte d'un ensemble des paramètres de processus de mélange de composants en vrac justifie la préparation d'une plate-forme pour l'utilisation des systèmes de la production industrielle cyberphysique. Sont analysées les principales étapes du fonctionnement de l'équipement de mélange et les avantages des appareils de type centrifuge pour la mise en œuvre du processus de mélange des composants dispersés, y compris les matières premières secondaires, Est proposé un algorithme pour la mise en œuvre du modèle 3D ainsi que son paramétrisation.

---

**Авторы:** *Федорова Дарья Владимировна* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Стенько Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Бахаева Дарья Дмитриевна* – старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», *Капанова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.