

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В КАСКАДНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ

**В. Я. Борщев, Т. А. Сухорукова, Х. Фарур, В. С. Макаров**

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
borschov@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** каскадный гравитационный смеситель; метод дискретных элементов; процесс смешивания; сыпучий материал.

**Аннотация:** Исследован процесс смешивания частиц сыпучих материалов в каскадном гравитационном смесителе. Прогнозирование поведения частиц в смесителе выполнено с использованием метода дискретных элементов. Проведено компьютерное моделирование взаимодействия частиц смешиваемых компонентов в смесителе. С помощью программы Altair EDEM получены графические зависимости основных характеристик взаимодействия частиц смешиваемых материалов.

---

### Введение

Гравитационное смешивание сыпучих материалов в настоящее время широко распространено в различных отраслях промышленности. Для его реализации используются смесители, в которых смешиваемые компоненты перемещаются под действием силы тяжести вдоль корпуса и многократно циркулируют и перераспределяются в общем объеме смеси. Достоинства гравитационных смесителей – простота устройства и эксплуатации, отсутствие движущихся частей и низкие энергозатраты. В целях интенсификации процесса смешивания в гравитационных смесителях используют также дополнительное воздействие на сыпучий материал в виде распыления, наложения слоев смешиваемых частиц, неравномерности движения частиц, удара струи сыпучего материала о рабочий орган смесителя и т.д. [1].

Механизм процесса смешивания сыпучих материалов является очень сложным и зависит от большого числа факторов, основными из которых являются конструктивные особенности смесителя и режим его работы. Как правило, процесс смешивания сыпучих материалов реализуется в результате активного взаимодействия частиц. Качество готовой смеси в значительной степени зависит от взаимного столкновения частиц друг с другом, с корпусом смесителя и его рабочими элементами [2 – 5].

### Компьютерное моделирование процесса взаимодействия частиц сыпучих материалов в гравитационном смесителе

Для разработки эффективных конструкций смесителей необходимо располагать данными об изменении кинетических и динамических характеристик частиц сыпучих материалов в процессе их взаимодействия в смесителе. Однако такие данные в некоторых случаях либо трудно определить путем проведения прямого

эксперимента, либо вообще невозможно получить. В таких случаях в исследовательской практике достаточно широко применяется вычислительный эксперимент, отличающийся высокими прогностическими возможностями.

В настоящей работе проведено исследование процесса взаимодействия частиц сыпучих материалов в гравитационном смесителе с помощью компьютерного моделирования.

В работе [6] разработан смеситель для сыпучих материалов, в котором смесь требуемого качества формируется в процессе интенсивного перемещения перемешиваемого материала по вертикальному цилиндрическому корпусу. Существенное повышение эффективности процесса смешивания обеспечивается за счет использования устройств, установленных друг над другом по высоте корпуса (рис. 1). В качестве таких устройств применяются разрыхлители потока сыпучего материала, с помощью которых в смесителе организуются множество параллельных разрыхленных потоков материала. Интенсификации перемешивания параллельных потоков материала способствуют также наклонные кронштейны, установленные каскадами с противоположными углами наклона в зазоре между пересыпными воронками и корпусом смесителя. В результате обеспечивается интенсивное взаимопроникновение частиц сыпучего материала и улучшается качество готового продукта за счет однородного объемного распределения частиц материала в корпусе смесителя.



**Рис. 1.** 3D-модель каскадного гравитационного смесителя сыпучего материала

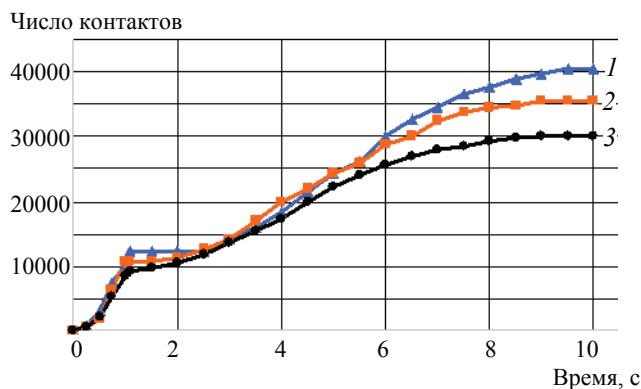
Исследование взаимодействия частиц сыпучих материалов в разработанной конструкции смесителя проведено с использованием метода дискретных элементов, позволяющего отслеживать траекторию движения каждой частицы с учетом взаимных столкновений частиц, а также их контакта со стенками оборудования [7 – 10].

Компьютерное моделирование с помощью метода дискретных элементов реализовано в программе Altair EDEM. На первом этапе в программу импортирован чертеж разработанного устройства для смешивания сыпучих материалов из Autodesk Fusion 360. Затем в программу введены исходные данные, описывающие работу смесителя, заданы тип и основные свойства частиц сыпучего материала для анализа поведения частиц в смесителе в активном гидродинамическом режиме в программе Altair EDEM. Для наглядного графического представления движения частиц материала, перемешиваемых в устройстве, им присваиваются различные цвета. Программа выдает видеофайл, иллюстрирующий движение частиц сыпучего материала в корпусе смесителя.

### Результаты моделирования и обсуждение

Исследование взаимодействия частиц сыпучего материала в смесителе проведено при различных соотношениях смешиваемых компонентов: 1 : 1, 1 : 3 и 1 : 5. В качестве модельных материалов использованы частицы полиэтилена и полистирола. В процессе смешивания в корпусе смесителя наблюдается активное взаимодействие частиц, приводящее к изменению количества их взаимных контактов. При движении вдоль корпуса смесителя частицы вступают во взаимодействие с соседними частицами и поверхностями рабочих элементов установки, хаотически меняют свою скорость и направление движения, импульс. Метод дискретных элементов позволяет учитывать положение и направление движения каждой частицы и проводить перерасчет ее кинематических и динамических параметров через определенный промежуток времени с учетом взаимодействия с другими частицами.

Зависимости изменения числа контактов частиц в процессе их смешивания представлены на рис. 2. Как следует из рисунка, с течением времени процесса смешивания сыпучих материалов наблюдается более интенсивное взаимодействие частиц. Кроме того, в процессе исследования установлено, что при практически одинаковом ходе полученных графических зависимостей при разном соотношении компонентов смеси имеет место различная интенсивность взаимодействия частиц.



**Рис. 2. Число контактов частиц во времени при соотношениях смешиваемых компонентов: 1 – 1 : 1; 2 – 1 : 3; 3 – 1 : 5**

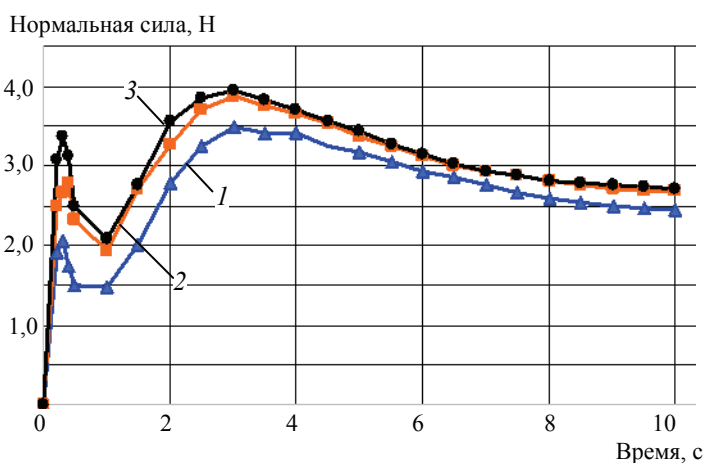
При большем соотношении смешиваемых компонентов с течением времени количество контактов несколько уменьшается (см. рис. 2, кривые 2 и 3), что обусловлено взаимодействием частиц в более стесненных условиях. Следует отметить, что приведенные графические зависимости отражают все контакты и перекрытия между частицами (перекрытие двух контактирующих частиц оценивается как деформация, необходимая для того, чтобы они физически могли находиться в их фактической конфигурации).

На рисунке 3 представлено изменение во времени нормальной силы, действующей на частицу. Под нормальной понимается сила, возникающая при непосредственном контакте частиц друг с другом в корпусе смесителя. В начальный момент времени наблюдается быстрое увеличение, а затем уменьшение силового воздействия на частицу, которое через некоторое время практически стабилизируется на определенном уровне. Это свидетельствует о достаточно стабильном силовом воздействии на частицы в рабочей камере смесителя. Причем величина нормальной силы незначительно зависит от соотношения смешиваемых компонентов. В то же время следует отметить, что при соотношении смешиваемых компонентов 1 : 1 (см. рис. 3, кривая 1) величина нормальной силы, действующей на частицы, несколько меньше по сравнению с другими соотношениями.

Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что в разработанной конструкции каскадного смесителя частицы компонентов смеси активно взаимодействуют друг с другом при различном их соотношении.

Увеличение скорости взаимодействия потоков смешиваемых частиц, как правило, вызывает возрастание скорости процесса смешивания и приводит к повышению однородности смеси. Вследствие этого большой практический интерес имеет возможность прогнозирования кинетических характеристик частиц смешиваемых материалов, таких как скорость движения частиц и их кинетическая энергия.

Известно, что качество смешивания в значительной мере зависит от кратности перемещения в смесителе объема смешиваемых материалов. Кратность перемещения частиц в свою очередь в значительной степени определяется скоростью их перемещения. На рисунке 4, а, представлены зависимости изменения скорости движения частиц материала, участвующих в процессе смешивания. Очевидно, что скорость движения частиц на одной ступени перемешивания в каскадном гравитационном смесителе с течением времени существенно меняется от максимального значения на входе до минимального на выходе.



**Рис. 3. Изменение нормальной силы, действующей на частицы, во времени при соотношениях смешиваемых компонентов:**  
1 – 1 : 1; 2 – 1 : 3; 3 – 1 : 5

Это обусловлено увеличением числа контактов частиц в процессе их движения вдоль корпуса смесителя и, соответственно, роста сопротивления, вызываемого взаимодействием с окружающими частицами. Вследствие этого для повышения эффективности процесса смешивания необходимы дополнительные воздействия на поток материала с помощью разрыхлителей, обеспечивающих условия для более интенсивного перераспределения частиц в смешиваемом объеме.

Степень активности взаимных перемещений частиц сыпучего материала определяет интенсивность протекания в нем процесса перемешивания. Следовательно, для интенсификации процесса смешивания необходимо обеспечивать такие условия взаимодействия частиц, которые способствуют повышению энергии их взаимных перемещений. Поэтому значительный практический интерес представляет прогнозирование значений кинетической и полной (сумма кинетической энергии, кинетической энергии вращения и потенциальной энергии частицы) энергии частиц сыпучего материала в процессе смешивания [11, 12].

В процессе взаимодействия частицы изменяют свою кинетическую энергию (см. рис. 4, б), что обусловлено их активным взаимодействием как с окружающими частицами, так и с рабочими органами смесителя в процессе смешивания. Причем величина кинетической энергии частиц при равном соотношении смешиваемых компонентов больше, чем при других условиях перемешивания. Это обусловлено более высокой скоростью частиц в менее стесненных условиях взаимодействия.

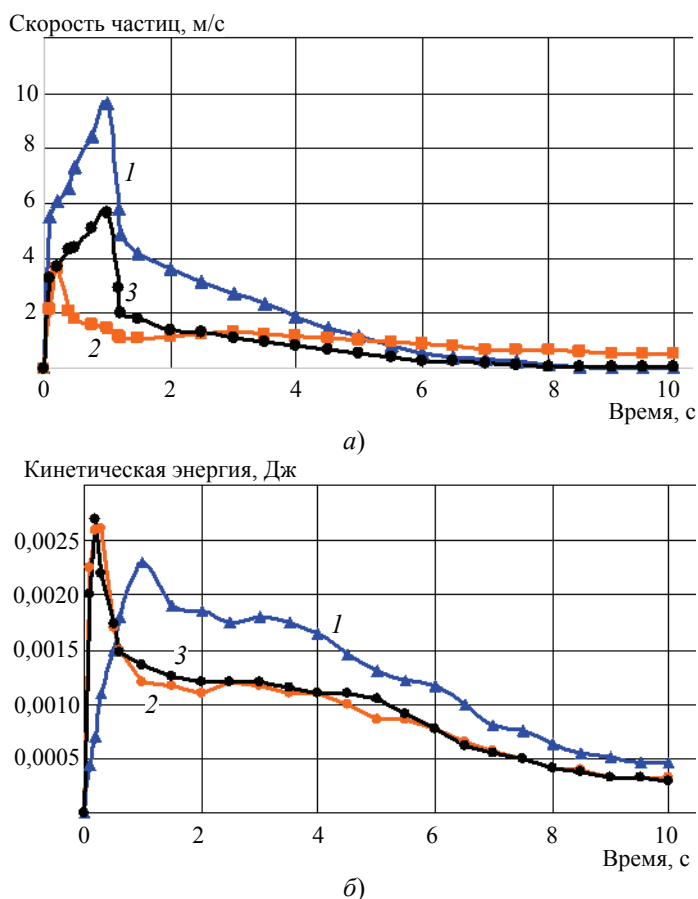


Рис. 4. Зависимости скорости (а) и кинетической энергии (б) частиц во времени при соотношениях смешиваемых компонентов:

1 – 1 : 1; 2 – 1 : 3; 3 – 1 : 5

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в разработанной конструкции каскадного гравитационного смесителя, характеризующейся активным гидродинамическим режимом, обеспечиваются достаточно стабильные условия взаимодействия частиц сыпучих материалов, а также имеются хорошие возможности для интенсификации процесса смешивания.

### Заключение

EDEM-моделирование позволяет изучить поведение среды, состоящей из частиц, движущихся независимо друг от друга и взаимодействующих с другими частицами в точках их контакта. Проведено компьютерное моделирование взаимодействия частиц сыпучих материалов с помощью метода дискретных элементов. Получены графические зависимости основных характеристик взаимодействия частиц смешиваемых материалов в программе Altair EDEM. Показана возможность прогнозирования поведения частиц сыпучих материалов при их взаимодействии в каскадном гравитационном смесителе. Полученные результаты моделирования могут быть использованы при проектировании гравитационных смесителей.

### Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Основные тенденции совершенствования отечественного, оборудования для смешивания сыпучих материалов / Ю. И. Макаров, Г. Д. Сальникова // Нефтяное и химическое машиностроение. – 1993. – № 10. – С. 5 – 8.
2. Верлока, И. И. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов / И. И. Верлока, А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4. – 10 с. URL: [www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599) (дата обращения: 10.03.2024).
3. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
4. Демин, О. В. Пути повышения эффективности смешивания сыпучих материалов / О. В. Демин, М. М. Свиридов, В. Ф. Першин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 1. – С. 97 – 99.
5. Борщев, В. Я. Пути повышения эффективности смешивания сыпучих материалов в смесителях гравитационного типа / В. Я. Борщев, Х. Фарур, В. С. Макаров, Г. В. Кокунов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 4. – С. 653 – 665. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665.
6. Пат. 195175 Российская Федерация, МПК В01F 7/18 (2006.01). Усреднитель сыпучих материалов / В. Я. Борщев, Т. А. Сухорукова, Ю. А. Феоклистов, В. В. Матюкин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2019135016 ; заявл. 31.10.2019 ; опубл. 16.01.2020, Бюл. № 2. – 6 с.
7. Cundall, P. A. A discrete numerical model for granular assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // Geotechnique. – 1979. – Vol. 29, No. 1. – P. 47 – 65. doi:10.1680/geot.1979.29.1.47
8. Алиев, Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
9. Клишин, С. В. Применение метода дискретных элементов при анализе гравитационного движения гранулированного материала в сходящемся канале / С. В. Клишин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 12. – С. 273 – 277.
10. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки природных и техногенных материалов / В. А. Арсентьев [и др.] // Обогащение руд. – 2010. – № 1. – С. 30 – 35.

11. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности сегрегации при быстром гравитационном течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, А. А. Уколов, О. О. Иванов // Теоретические основы химической технологии. – 2006. – Т. 40, № 4. – С. 423 – 425.

12. Долгунин, В. Н. «Температура» зернистой среды и физические эффекты взаимодействия частиц при быстром сдвиговом течении зернистых материалов / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 8. – С. 78 – 82.

---

## A Study of the Interaction of Bulk Material Particles in a Cascade Gravitational Mixer

V. Ya. Borshchev, T. A. Sukhorukova, H. Faarour, V. S. Makarov

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,  
borschov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** cascade gravitational mixer; discrete element method; mixing process; bulk material.

**Abstract:** The process of mixing particles of bulk materials in a cascade gravitational mixer has been studied. Prediction of the behavior of particles in the mixer was carried out using the discrete element method. A computer simulation of the interaction of particles of mixed components in a mixer was carried out. Using the Altair EDEM program, graphical dependences of the main characteristics of the interaction of particles of mixed materials were obtained.

### *References*

1. Makarov Yu.I., Sal'nikova G.D. [Main trends in improving domestic equipment for mixing bulk materials], *Neftyanoye i khimicheskoye mashinostroyeniye* [Oil and chemical engineering], 1993, no. 10, pp. 5-8. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Verloka I.I., Kapranova A.B., Lebedev A.Ye. [Modern continuous gravitational devices for mixing bulk components], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2014, no. 4, 10 p. available at: [www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599) (accessed 04 March 2024). (In Russ.)

3. Makarov Yu. I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatuses for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)

4. Demin O.V., Sviridov M.M., Pershin V.F. [Ways to increase the efficiency of mixing bulk materials], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of universities. Chemistry and chemical technology], 2010, vol. 53, no. 1, pp. 97-99. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Borshchev V. Ya., Farur Kh., Makarov V.S., Kokunov G.V. [Ways to increase the efficiency of mixing bulk materials in gravity-type mixers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 4, pp. 653-665. doi: 10.17277/vestnik.2023.04. pp.653-665 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Borshchev V.Ya., Sukhorukova T.A., Feoklistov Yu.A., Matyukin V.V. *Usrednitel' sypuchikh materialov* [Bulk materials homogenizer], Russian Federation, 2020, Pat. 195175 (In Russ.)

7. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, 1979, vol. 29, no. 1, pp. 47-65. doi:10.1680/geot.1979.29.1.47

8. Aliyev T.I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of modeling discrete systems], St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2009, 363 p. (In Russ.)

9. Klishin C.B. [Application of the discrete element method in the analysis of gravitational movement of granular material in a converging channel], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2009, no. 12, pp. 273-277. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Arsent'yev V.A. [et al.], [Methods of dynamics of particles and discrete elements as a tool for research and optimization of processes of processing natural and man-made materials], *Obogashcheniye rud* [Ore enrichment.], 2010, no. 1, pp. 30-35. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Dolgunin V.N., Ukolov A.A., Ivanov O.O. [Kinetic patterns of segregation during rapid gravitational flow of granular materials], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology.], 2006, vol. 40, no. 4, pp. 423-425. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya. [“Temperature” of a granular medium and physical effects of particle interaction during rapid shear flow of granular materials], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of universities. Chemistry and chemical technology], 2007, vol. 50, no. 8, pp. 78-82 (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Untersuchung der Partikelinteraktion von Schüttgütern in einem Kaskaden-Gravitationsmischer**

**Zusammenfassung:** Der Prozess des Mischens von Schüttgutpartikeln in einem Kaskaden-Gravitationsmischer ist untersucht. Die Vorhersage des Verhaltens von Partikeln im Mischer ist mit der Methode der diskreten Elemente erfüllt. Es ist eine Computermodellierung der Interaktion von Partikeln aus gemischten Bestandteilen im Mischer durchgeführt. Unter Verwendung des Altair EDEM-Programms sind grafische Abhängigkeiten der Hauptmerkmale der Wechselwirkung zwischen den Partikeln der gemischten Materialien ermittelt.

---

### **Étude de l'interaction des particules de matériaux en vrac dans un mélangeur gravitationnel en cascade**

**Résumé:** Est étudié le processus de mélange des particules en vrac dans un mélangeur à gravité en cascade. Est réalisé le pronostique du comportement des particules dans le mélangeur en utilisant la méthode des éléments discrets. Est réalisée une simulation informatique de l'interaction des particules des composants mélangés dans le mélangeur. A l'aide du logiciel Altair EDEM sont obtenues les dépendances graphiques des principales caractéristiques d'interaction des particules des matériaux mélangés.

---

**Авторы:** *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Сухорукова Татьяна Александровна* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Фарур Хамза* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Макаров Вадим Сергеевич* – студент, ФГБОУ ВО «ПГТУ», Тамбов, Россия.