

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В КАСКАДНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ СМЕСИТЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ALTAIR EDEM

© Хамза Фарур¹✉, В. Я. Борщев¹, Г. А. Титов¹

¹ Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
hamza.faarour@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация

Ключевые слова: каскадный гравитационный смеситель; качество смеси; компьютерное моделирование; коэффициент заполнения; коэффициент неоднородности; процесс смешивания; система Altair EDEM; сыпучий материал.

Аннотация: С помощью метода дискретных элементов (DEM) от Altair EDEM software исследовано влияние коэффициента заполнения смесителя на качество смешивания сыпучих материалов в каскадном гравитационном смесителе. Проведена серия компьютерных симуляций с различным коэффициентом заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом, при этом конструкция смесителя, свойства материала и распределение частиц по размерам оставались неизменными. Качество смешивания с течением времени оценивали с помощью коэффициента неоднородности. Отмечено, что полученные результаты могут быть использованы для совершенствования конструкции и функциональности гравитационных смесителей в отраслях промышленности, где используются зернистые сыпучие материалы.

Введение

В различных отраслях промышленности, в том числе пищевой, фармацевтической, химической, строительной и других, процесс приготовления однородных смесей из сыпучих материалов имеет решающее значение [1 – 7]. Для получения необходимых свойств готовой продукции твердые частицы различных размеров, форм и плотностей смешивают в барабанных, гравитационных, ленточных, шнековых, плужных и других смесителях [8 – 16].

Для смешивания хорошо сыпучих материалов широко применяются каскадные гравитационные смесители, которые обычно используются для тщательного смешивания зернистых сыпучих материалов, что позволяет обеспечить достаточно высокое качество конечного продукта [7, 10, 11]. Однако существующие конструкции каскадных смесителей зачастую характеризуются неравномерностью перемешивания, что может привести к различиям в составе смеси при работе с материалами, имеющими разные физические свойства. Другая проблема этих смесителей заключается в том, что их достаточно сложно обслуживать, что может замедлить производственный процесс [10]. В настоящей работе исследуется разработанная авторами конструкция каскадного гравитационного смесителя для гранулированных сыпучих материалов [17]. Разработанный смеситель позволяет

получать высококачественные смеси сыпучих материалов за счет организации перекрестных потоков, многократного их перераспределения и обеспечения равномерного распределения смешиваемых компонентов как в поперечном, так и в продольном сечениях смесителя.

Основными техническими характеристиками смесителей сыпучих материалов являются их производительность и качество приготовленной смеси [1]. В свою очередь, эффективность работы смесителя определяется его конструктивными параметрами и коэффициентом заполнения сыпучим материалом.

Эффективная работа смесителей сыпучих материалов в значительной степени зависит от коэффициента его заполнения материалом. Для смесителей имеет место минимальный и максимальный коэффициент заполнения, в пределах которого его работа характеризуется максимальной эффективностью и при этом достигается оптимальное качество получаемой смеси. При небольшом и слишком большом коэффициентах заполнения частицы сыпучих материалов перемешиваются, как правило, неэффективно. При этом смесители характеризуются большим временем смешивания и низкой производительностью.

Для гравитационных смесителей непрерывного действия коэффициент заполнения находится в пределах 0,15...0,35. При оптимальной величине коэффициента заполнения частицы движутся по траектории, которая оставляет свободное пространство для их эффективного перемещения в процессе смешивания.

Цель работы – исследование влияния коэффициента заполнения сыпучего материала на эффективность процесса смешивания в каскадном гравитационном смесителе.

Анализ процесса смешивания частиц сыпучего материала в многоступенчатом гравитационном смесителе и моделирование процесса в данном исследовании проведены с использованием программного обеспечения Altair EDEM [18 – 21]. Компьютерное моделирование широко применяется для проектирования различных типов смесителей [22, 23]. Эти инструменты моделирования могут предоставить как пространственную, так и временную информацию для всех частиц в расчетной области.

Компьютерное моделирование процесса смешивания в многоступенчатом гравитационном смесителе

Проведено исследование влияния коэффициента заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом на эффективность смешивания в гравитационном каскадном смесителе с шестью ступенями смешивания при одинаковой массовой доле содержания крупных и мелких частиц в исходном материале. Для моделирования влияния коэффициента заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом на коэффициент неоднородности смеси в настоящей работе проведена цифровая выборка с использованием программного обеспечения EDEM в каскадном гравитационном смесителе. При моделировании использовался 21-секундный интервал работы смесителя, обеспечивающий выход процесса смешивания на устойчивый режим. В настоящем исследовании метод дискретных элементов использован с программным обеспечением Altair EDEM для создания модели смешивания частиц сыпучего материала в каскадном гравитационном смесителе непрерывного действия. С помощью моделирования проведено исследование влияния коэффициента заполнения смесителя сыпучим материалом на распределение частиц в корпусе и их смешивания, то есть на качество смеси.

С помощью SolidWorks создана 3D-модель многоступенчатого гравитационного смесителя, которая затем была импортирована в EDEM для моделирования (рис. 1). Конструкция смесителя, выполненная в SolidWorks, состоит из вертикального

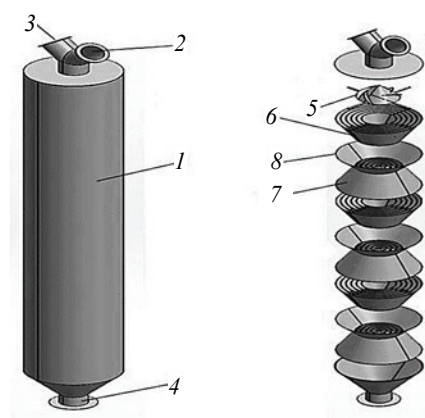


Рис. 1. Каскадный гравитационный смеситель сыпучих материалов

цилиндра 1, двух верхних загрузочных штуцеров 2, 3 и нижнего выпускного штуцера 4. Равномерное распределение исходных компонентов по поперечному сечению смесителя в верхней части корпуса обеспечивается с помощью распределителя потока 5.

Смесительные секции в виде верхних 6 и нижних 7 пересыпных воронок расположены в корпусе смесителя каскадом, образуя многоступенчатую систему перемешивания (рис. 2). Направляющие воронки 8, расположенные над нижними пересыпными воронками, служат для подачи частиц исходных компонентов в зоны наиболее эффективного перемешивания. Длинные 9 и короткие 10 перевернутые усеченные конусы, расположенные с чередованием, образуют верхние пересыпные воронки. Перекрещивающиеся траектории движения частиц создаются за счет расположения в зазорах между конусами изогнутых лопаток 11 с противоположным наклоном в смежных зазорах между этими конусами. Нижние воронки также состоят из установленных с чередованием длинных 12 и коротких 13 усеченных конусов, но ориентированных широкими основаниями вниз. Между ними установлены дополнительные изогнутые лопасти 14, которые создают вихревые движения, способствующие более равномерному перемешиванию частиц в зоне между пересыпными воронками. Такое расположение пересыпных элементов способствует более эффективному перераспределению частиц материала в корпусе смесителя и, соответственно, более эффективному их смешиванию.

Во всех проведенных сериях вычислительных экспериментов скорость подачи частиц исходных компонентов поддерживалась постоянной и составляла

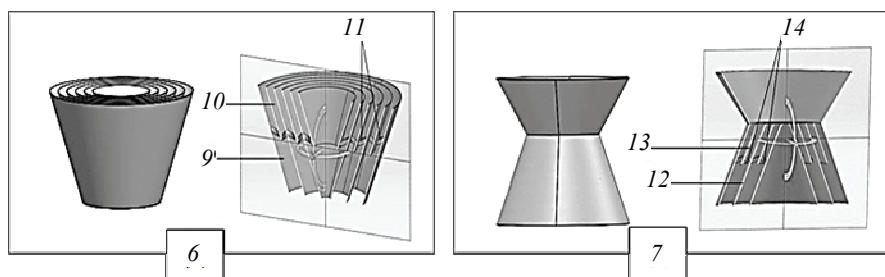


Рис. 2. Внутреннее устройство пересыпных воронок 6 и 7 в каскадном гравитационном смесителе

30 000 частиц/с. Физические и механические параметры исходных компонентов, использованных при моделировании в расчетах в программной среде Altair EDEM:

Плотность.....	950 кг/м ³
Модуль Юнга.....	$8,76 \times 10^7$ Па
Модуль сдвига.....	$3,0 \times 10^7$ Па
Коэффициент Пуассона.....	0,46
Коэффициент восстановления.....	0,55
Коэффициент трения покоя.....	0,40
Коэффициент трения качения.....	0,25

Для учета гравитационного воздействия начальную поступательную скорость частиц задавали равной – 15 м/с, а угловую скорость равной – 15 рад/с. При этом обе величины направлены по отрицательному направлению оси *Y*. Ускорение свободного падения в расчетах принимали равным – 10 м/с² и также направленным по оси *Y*. Расчет выполняли при *t* = 0 с, при этом в смесителе сыпучий материал отсутствовал.

Настройки и параметры моделирования для Altair EDEM:

Решатель.....	Герц-Миндлин (без скольжения) со стандартным сопротивлением качению
Время интегрирования.....	Эйлеров метод
Шаг по времени Рэлея.....	$2,7866 \times 10^{-5}$ с
Процент Рэлея.....	40 %
Текущий шаг по времени.....	$1,11464 \times 10^{-5}$ с
Время моделирования.....	21 с
Интервал сохранения данных.....	0,1 с
Размер ячейки расчетной сетки.....	3,75 мм
Оценочное количество ячеек сетки.....	2247264
Используемое количество ядер процессора.....	12
Время моделирования одного эксперимента.....	≈ 2–3 суток

Эти параметры определяют методику расчета, временные интервалы, количество частиц и другие важные элементы, которые влияют на вычислительную эффективность и корректность моделирования. Все настройки были тщательно подобраны, чтобы обеспечить наилучший баланс между производительностью и точностью расчета.

Моделирование процесса смешивания в программной среде Altair EDEM проведено при следующих допущениях.

Модель контакта Герца–Миндлина, которая предполагает отсутствие скольжения между частицами, использовали наряду с обычным трением при качении, чтобы показать, как частицы контактируют и движутся относительно друг друга. Адгезионные и электрические свойства при моделировании не учитывали, поскольку полиэтилен обладает низкой поверхностной энергией и используется в сухих условиях. Вязкое демпфирование и другие диссипативные эффекты, приписанные формуле Герца–Миндлина, явно не моделировались, а непрерывную жидкую фазу (например, воздух) не учитывали, так как в сухих гранулированных потоках преобладают механические контакты.

Частицы были смоделированы в виде идеальных сфер с использованием встроенных геометрических инструментов EDEM без сложного импорта сетки (например, STL-файлов). Эта методологическая основа позволила детально наблюдать за динамическим процессом перемешивания и оценить влияние количества частиц в корпусе смесителя на пространственное распределение частиц и однородность смеси.

Смешивание является одним из важнейших технологических процессов, поскольку от однородности смеси из исходных компонентов в дальнейшем зависит качество готовых изделий и конструкций. Существует несколько факторов, влияющих на качество смеси в процессе смешивания, таких как состояние и концентрация компонентов смеси, конструкция смесителя (форма рабочего органа, форма смесительной камеры и варианты загрузки смешиваемых компонентов), а также технологический режим процесса смешивания. В любом объеме идеальной однородной смеси с феноменологической точки зрения должны присутствовать частицы всех компонентов в количествах, определяемых их заданным соотношением. Однако в действительности такого идеального расположения частиц в объеме смеси не наблюдается. В случайно выбранных объемах смеси может быть большое количество комбинаций частиц компонентов, то есть их случайное распределение в смеси, что приводит к использованию статистического подхода [24] для оценки качества смеси. Наиболее распространенным и часто используемым критерием оценки качества смеси является коэффициент неоднородности [1]

$$V_c = \frac{100}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где $\bar{C}$ – среднеарифметическая концентрация исследуемого ключевого компонента, рассчитанная по совокупности проб; C_i – значение концентрации ключевого компонента в i -й пробе; n – количество проб, включенных в анализ.

Для исследования параметров неоднородности смеси в работе использовано программное обеспечение EDEM, которое позволяет выбирать широкий спектр физических свойств смешиваемых материалов, таких как моделирование любого типа и формы материала: крупных кусков или мелких порошков, сухих или влажных материалов. Все это позволяет моделировать процессы и делать выводы о том, как различные сыпучие и влажные материалы будут взаимодействовать друг с другом, а также с элементами проектируемого оборудования при различных технологических условиях [25]. Метод дискретных элементов (МДЭ) – это численный метод, используемый для моделирования движения частиц, взаимодействующих друг с другом посредством столкновения. Фактически, EDEM моделирует динамику каждой частицы индивидуально и численно интегрирует их ускорения, которые зависят от суммы всех сил, включая контактные и гравитационные. Положение каждой частицы фиксируется, а их взаимодействия оцениваются на каждом временном шаге. Затем рассчитываются все силы, действующие на каждую частицу, и используется второй закон Ньютона для определения ускорений, чтобы найти скорость и положение частицы в каждый момент времени. Этот процесс повторяется до конца симуляции [18, 19]. Таким образом, МЭД является надежным и высокопроизводительным инструментом для моделирования различных процессов с сыпучими и влажными материалами; в частности, этот метод широко используется для моделирования процессов, происходящих в различных типах смесителей [26], для получения качественных строительных материалов, изделий и конструкций.

Результаты и обсуждения

Полное численное исследование коэффициента неоднородности проведено с помощью программного обеспечения Altair EDEM и модуля Analyst для каскадного гравитационного смесителя сыпучих материалов. Исследование охватывало весь процесс смешивания: от начального момента ($t = 0$ с) и до конца моделирования ($t = 21$ с), что позволило детально проследить за временной эволюцией однородности смеси.

Для количественной оценки пространственного распределения компонентов смеси объем камеры смешивания делили на контрольные ячейки отбора проб с применением сеточного пространственного разбиения, реализованных в модуле Analyst программного комплекса EDEM. Данный метод позволил эффективно отслеживать динамику распределения компонентов в камере смешивания с высокой временной разрешающей способностью на протяжении всего моделирования.

На рисунке 3 показано пространственно-массовое распределение исходных компонентов А и В в трехмерном пространстве в корпусе каскадного гравитационного смесителя к концу процесса смешивания ($t = 21$ с). Каждая проекция на рисунке показывает расположение частиц в соответствии с осью, что обеспечивает более точную оценку пространственного распределения сыпучего материала после завершения моделирования. Кроме того, на каждом изображении представлена цветовая шкала, отражающая градиент концентрации частиц в корпусе смесителя, что позволяет визуально оценивать равномерность распределения частиц сыпучего материала. Данные получены с помощью модуля Analyst в Altair EDEM и использованием метода GridBin. При этом расчетная область была разделена на обычную сетку из кубических ячеек размером $5 \times 30 \times 5$ вдоль осей X , Y и Z . Затем в каждой кубической ячейке определяли общую массу частиц А и В. Цвета показывают, как распределена общая масса частиц А и В (в кг) в каждой ячейке, и дают понять, насколько однородна смесь.

Таким образом, представленные на рис. 3 результаты наглядно демонстрируют установившееся конечное распределение частиц компонентов А и В в корпусе смесителя с использованием различных пространственных проекций, что позволяет детально анализировать положение каждого типа частиц в смеси после завершения моделирования. Такое представление данных, основанное на массе частиц смешиваемых компонентов, позволяет связать полученную качественную картину с количественными параметрами смеси, характеризующими процесс смешивания. Данные о распределении массы в каждой ячейке необходимы для расчета коэффициента неоднородности, позволяющего объективно оценить качество получаемой смеси, то есть насколько хорошо произошло распределение частиц исходных компонентов в объеме смесителя.

Далее полученные в программе EDEM временные массивы данных экспортированы и обработаны с использованием программного пакета Microsoft Excel. На основе этих данных рассчитан цифровой коэффициент неоднородности в соответствии с уравнением (1) для последовательных временных интервалов от начала до конца процесса смешивания. Этот метод позволил количественно охарактеризовать развитие однородности смеси и оценить эффективность процесса смешивания на различных стадиях его протекания в корпусе смесителя.

На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента неоднородности V_c , %, от времени для процесса смешивания при различных значениях коэффициента заполнения, которые соответствуют разным уровням загрузки смесителя. На начальной стадии процесса смешивания (0...3 с) все кривые характеризуются высокими значениями коэффициента неоднородности, что указывает на неравномерное распределение частиц в рабочем объеме. В этот период частицы находятся на стадии начальной загрузки, и эффективные механизмы взаимодействия и диффузионного перераспределения еще не сформированы.

По мере увеличения времени коэффициент неоднородности резко снижается, что свидетельствует о формировании основных механизмов смешивания, таких как многократные столкновения, относительное скольжение и пространственная переориентация частиц. При этом режимы с большим коэффициентом заполнения (кривые 4 – 6) демонстрируют более высокую скорость снижения коэффициента неоднородности и более низкие его предельные значения по сравнению с режимами с меньшим коэффициентом заполнения, что указывает на повышение эффективности смешивания при увеличении численной плотности частиц.

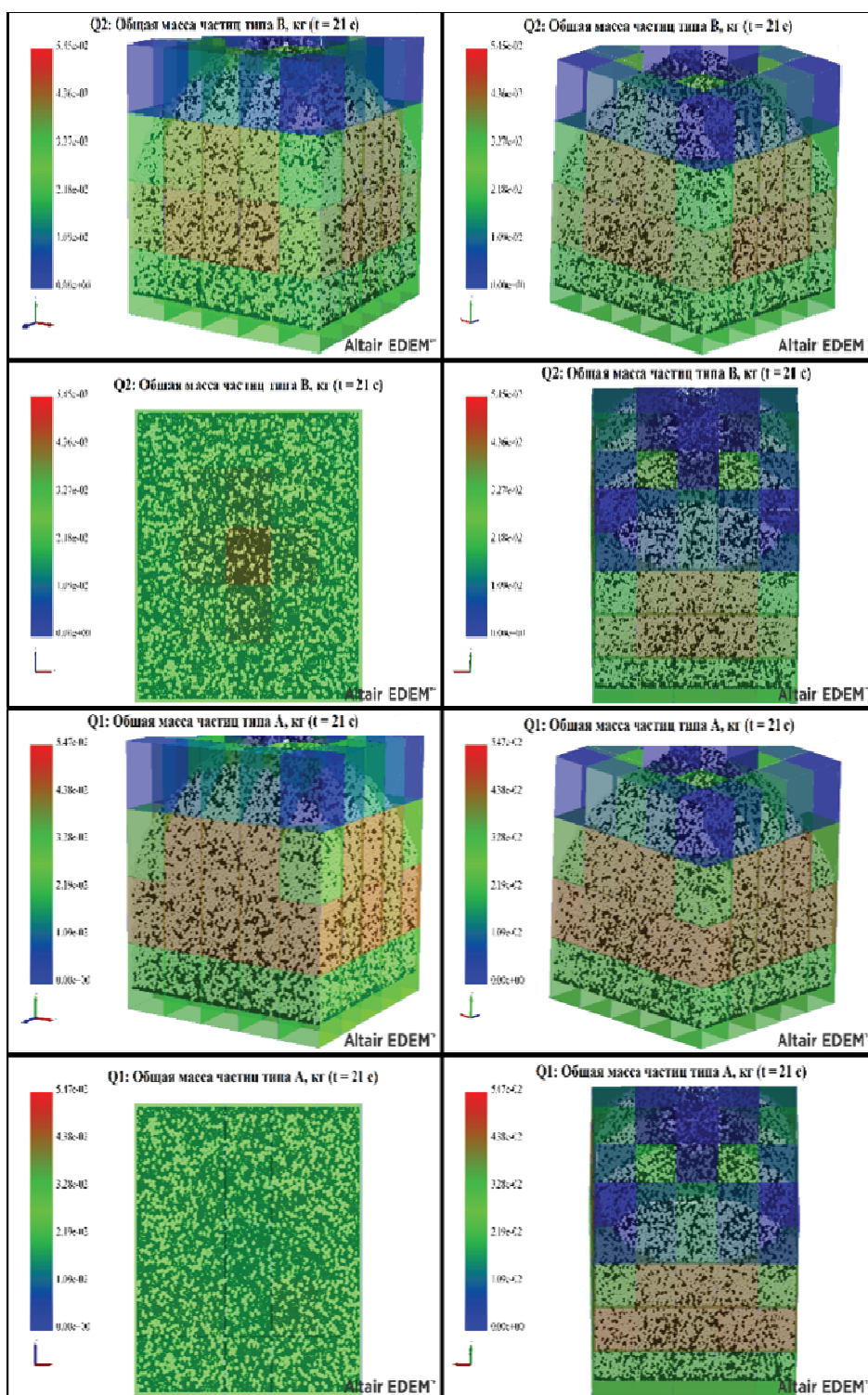


Рис. 3. Установившееся пространственное и количественное распределение частиц сыпучих материалов на выходе из смесителя при различных коэффициентах заполнения при $t = 21$ с

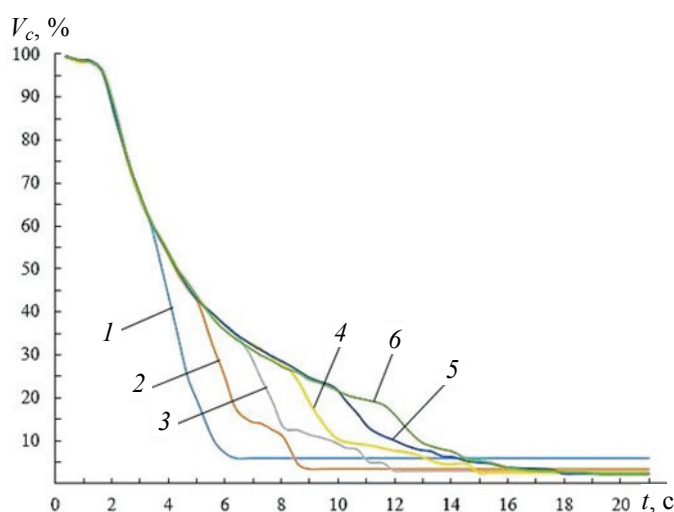


Рис. 4. Зависимость коэффициента неоднородности от времени смешивания при различных значениях коэффициента заполнения смесителя сыпучим материалом:
 1 – $\varphi = 0,061$; 2 – $\varphi = 0,091$; 3 – $\varphi = 0,122$; 4 – $\varphi = 0,152$; 5 – $\varphi = 0,183$; 6 – $\varphi = 0,213$

Начиная примерно с 10...12 с, все кривые выходят на стадию стабилизации и приближаются к низким квазипостоянным значениям коэффициента неоднородности. Такое поведение указывает на достижение квазистационарного состояния смешивания, которое соответствует моменту получения конечной смеси при выходе материала из смесителя. На данной стадии смесь поступает в приемную емкость, где активные механизмы смешивания прекращаются, влияние времени становится незначительным, а пространственное распределение частиц сохраняет достигнутую степень однородности без заметных изменений, что свидетельствует о стабильности конечной смеси в емкости.

Следует отметить, что увеличение коэффициента заполнения смесителя сыпучим материалом приводит к ускорению достижения однородного состояния смеси и, соответственно, снижению конечных значений коэффициента неоднородности. Это объясняется ростом числа контактов и взаимодействий между частицами, что усиливает механизмы диффузии и снижает вероятность формирования локальных неоднородных зон.

На основании полученных результатов EDEM-моделирования на рис. 5 представлена зависимость коэффициента неоднородности V_c , %, от коэффициента заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом. В результате выполненных расчетов установлено, что коэффициент заполнения существенно влияет на перераспределение частиц исходных компонентов в корпусе смесителя, то есть на качество готовой смеси. С увеличением коэффициента заполнения качество смеси улучшается, то есть ее неоднородность уменьшается. И, наоборот, при небольшом коэффициенте заполнения качество смеси ухудшается, что подтверждается большим значением коэффициента неоднородности (см. рис. 5).

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при малом коэффициенте заполнения перемешивание протекает неэффективно и частицы распределены по объему смесителя неравномерно. Причиной этого является низкая интенсивность взаимодействия частиц друг с другом. Вследствие этого недостаточность контактов между ними не способствует эффективному перераспределению частиц в объеме смесителя. При увеличении степени заполнения коэффициент неоднородности ощутимо снижается, то есть смесь становится заметно однороднее. Это обусловлено возрастающей частотой столкновения и более интенсивным

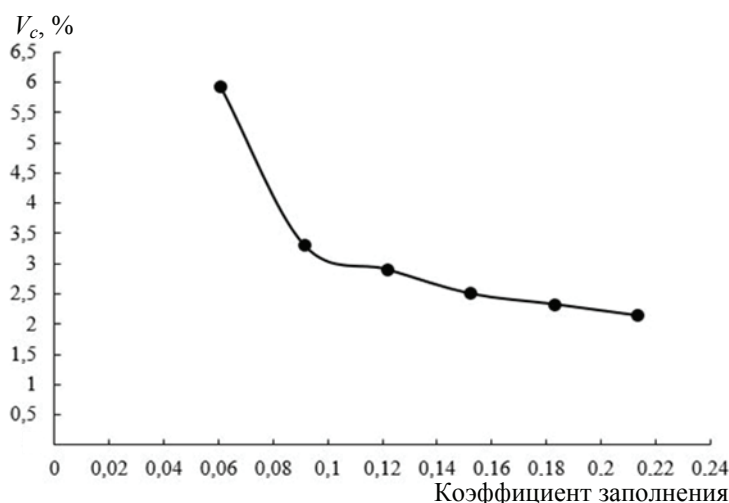


Рис. 5. Зависимость коэффициент неоднородности от коэффициента заполнения смесителя при $t = 21$ с

взаимодействием частиц под действием конвективных потоков, а также за счет их сдвиговых перемещений. Вследствие этого частицы исходных компонентов распределяются по объему смесителя более равномерно.

Однако при достаточно большом коэффициенте заполнения корпуса смесителя сыпучим материалом наблюдается так называемый эффект стесненного движения частиц, когда движение отдельных частиц ограничено соседними частицами. В моделировании методом EDEM это обычно проявляется в резком снижении кинетической энергии системы: частицы преимущественно находятся в тесном контакте друг с другом без относительного перемещения, то есть без перемешивания [27].

Следовательно, подтверждается факт наличия оптимальной величины коэффициента заполнения, при котором наблюдается взаимное эффективное перемещение частиц в корпусе смесителя, то есть перемешивание сыпучего материала.

Заключение

Проведены анализ процесса смешивания частиц сыпучего материала в многоступенчатом гравитационном смесителе и моделирование смешивания с использованием программного обеспечения Altair EDEM. Установлено, что для исследуемой конструкции каскадного гравитационного смесителя имеется определенный диапазон коэффициента заполнения, при котором смесь характеризуется высокой однородностью и стабильностью.

Полученные результаты дают полезную информацию для повышения эффективности перемешивания сыпучих материалов в многоступенчатом гравитационном смесителе, производительности и совершенствования конструкции гравитационного смесителя.

Список литературы

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – Москва : Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Баранцева, Е. А. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет / Е. А. Баранцева, В. Е. Мизонов, Ю. В. Хохлова. – Иваново : Изд-во Ивановского государственного энергетического университета им. В. И. Ленина, 2008. – 116 с.

3. Static Mixers in the Process Industries – A Review / R. K. Thakur, C. Vial, K. D. P. Nigam, E. B. Nauman, G. Djelveh // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2003. – Vol. 81, No. 7. – P. 787–826. doi: 10.1205/026387603322302968
4. Машиностроение = Mechanical engineering : Энциклопедия : в 40 томах / Редсовет: Фролов К. В., пред., гл. ред. [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1994. Т. IV-12 : Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Расчет и конструирование машин / ред.-сост. М. Б. Генералов. – Москва : Машиностроение, 2004. – 829 с.
5. Portillo, P. M. Characterization of continuous convective powder mixing processes / P. M. Portillo, M. G. Ierapetritou, F. J. Muzzio // *Powder Technology*. – 2008. – Vol. 182, No. 3. – P. 368–378. doi: 10.1016/j.powtec.2007.06.024
6. Nienow, A. W. Mixing in the Process Industries / A. W. Nienow, M. F. Edwards, N. Harnby. – Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p.
7. 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. – № 4-1(31). – 10 с. – URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23282444_34236886.pdf (дата обращения: 20.05.2026).
8. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолюк, С. В. Першина. – Москва : Машиностроение, 2009. – 220 с.
9. 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.
10. 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
11. Гвоздев, А. В. Обзор и анализ конструкций гравитационных смесителей / А. В. Гвоздев, С. В. Огуй // *Технико-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе : материалы IV Международной научно-практической конференции*. – Мелитополь, 2025. – С. 121–125.
12. Сухорукова, Т. А. Современные технологии и оборудование для приготовления смесей сыпучих материалов / Т. А. Сухорукова, В. Г. Божко, В. Я. Борщев // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 3. – С. 152–162. doi: 10.24412/2071-6168-2023-3-152-163
13. Борщев, В. Я. Анализ конструкций лопастных смесителей для смешивания склонных к сегрегации сыпучих материалов / В. Я. Борщев, Н. Ц. Гатапова, Г. А. Титов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2025. – Т. 29, № 3. – С. 482–496. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665
14. Кикин, Н. О. Совершенствование процесса смешивания материалов в горизонтальном лопастном смесителе со стержневыми элементами : дис. ... канд. техн. наук : 2.5.21 / Н. О. Кикин. – Белгород, 2023. – 198 с.
15. Мансур, В. Агрегаты для приготовления смеси из компонентов, склонных к сегрегации: современное состояние и перспективы. Часть II / В. Мансур, В. Ф. Першин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 139 – 152. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.139-152
16. Бражник, Ю. В. Совершенствование конструкции и процесса смешивания в лопастном смесителе с высокоскоростным режимом работы : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Ю. В. Бражник. – Белгород, 2017. – 200 с.
17. Патент № 2821456 Российская Федерация, МПК B01F 23/60 (2022.01). Гравитационный смеситель сыпучих материалов : № 2024109721 : заявл.

10.04.2024 : опубл. 24.06.2024 / Борщев В. Я., Фарур Х., Макаров В. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Бюл. № 18. – 11 с.

18. Alian, M. Analysis of the mixing of solid particles in a plowshare mixer via discrete element method (DEM) / M. Alian, F. Ein-Mozaffari, S. R. Upreti // Powder Technology. – 2015. – Vol. 274. – P. 77–87. doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.012

19. Chen, J. Discrete Element Simulation and Validation of a Mixing Process of Granular Materials / J. Chen, M. Furuichi, D. Nishiura // Materials. – 2020. – Vol. 13, No. 5. – P. 1208. doi: 10.3390/ma13051208

20. Krenzer, K. Simulating mixing processes of fresh concrete using the discrete elementmethod (DEM) under consideration of water addition and changes inmoisture distribution / K. Krenzer, V. Mechtcherine, U. Palzer // Cement and Concrete Research. – 2018. – Vol. 115, No. 2. – P. 274–282. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.012

21. Dhanasekharan, K. Analysis of particle mixing in rotating drums using discrete element method / K. Dhanasekharan, J. Chen // Powder Technology. – 2006. – Vol. 165, No. 1. – P. 45–53.

22. Leveraging Numerical Simulation Technology to Advance Drug Preparation: A Comprehensive Review of Application Scenarios and Cases / Q. Gu, H. Wu, X. Sui, X. Zhang, Y. Liu, W. Feng, R. Zhou, S. Du // Pharmaceutics. – 2024. – Vol. 16, No. 10. – P. 1304. doi: 10.3390/pharmaceutics16101304

23. Zuo, Z. Numerical investigation of granular mixing in an intensive mixer: Effect of process and structural parameters on mixing performance and power consumption / Z. Zuo, S. Gong, G. Xie // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 32, No. 4. – P. 241–252. doi: 10.1016/j.cjche.2020.10.036

24. Лозовой, Н. М. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента неоднородности смеси от технологических параметров в смесителе с изменяющейся рабочей камерой / Н. М. Лозовой, Л. И. Радинская, С. Ю. Лозовая // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S(13). – С. 33. – URL : https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40999989_23635079.pdf (дата обращения: 20.05.2026).

25. Программное обеспечение EDEM. 08.06.2020. – URL : <https://www.edemsimulation.com> (дата обращения: 20.05.2026).

26. Connelly, R. K. Examination of the mixing ability of single and twin-screwMixers using 2D finite element method simulation with particle tracking / R. K. Connelly, J. L. Kokini // Journal of Food Engineering. – 2007. – Vol. 79, No. 3. – P. 956–969. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.03.017

27. 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.

Studying the Efficiency of Mixing Bulk Materials in a Cascade Gravity Mixer Using Mathematical Modeling in the Altair EDEM Software Environment

© Hamza Farour¹✉, V. Ya. Borshchev¹, G. A. Titov¹

¹ *Department of Technological Processes, Equipment, and Technosphere Safety,
hamza.faarour@gmail.com; TSTU, Tambov, Russian Federation*

Keywords: cascade gravity mixer; mix quality; computer modeling; filling factor; nonuniformity coefficient; mixing process; Altair EDEM system; bulk material.

Abstract: Using the discrete element method (DEM) from Altair EDEM software, the effect of mixer fill factor on the mixing quality of bulk materials in a cascade gravity mixer was studied. A series of computer simulations was conducted with varying fill factors of the mixer body with bulk material, while the mixer design, material properties, and particle size distribution remained unchanged. Mixing quality over time was assessed using the nonuniformity coefficient. It is noted that the obtained results can be used to improve the design and functionality of gravity mixers in industries that handle granular bulk materials.

References

1. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for Mixing Bulk Materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
2. Barantseva Ye.A., Mizonov V.Ye., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovaniye, optimizatsiya, raschet* [Processes of Mixing Bulk Materials: Modeling, Optimization, Calculation], Ivanovo: Izdatel'stvo Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta im. V. I. Lenina, 2008, 116 p. (In Russ.)
3. Thakur R.K., Vial C., Nigam K.D.P., Nauman E.B., Djelveh G. Static Mixers in the Process Industries – A Review, *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, vol. 81, no. 7, pp. 787-826. doi: 10.1205/026387603322302968
4. Generalov M.B. [Comp.] *Mechanical engineering*: Entsiklopediya: in 40 vols., Moscow: Mashinostroyeniye, 1994, vol. IV-12: *Mashiny i apparaty khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv. Raschet i konstruirovaniye mashin* [Mechanical engineering: Encyclopedia: in 40 volumes, vol. IV-12: Machines and apparatus for chemical and petrochemical production. Calculation and design of machines], Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 829 p. (In Russ.)
5. Portillo P.M., Ierapetritou M.G., Muzzio F.J. Characterization of continuous convective powder mixing processes, *Powder Technology*, 2008, vol. 182, no. 3, pp. 368-378. doi: 10.1016/j.powtec.2007.06.024
6. Nienow, A. W. Mixing in the Process Industries / A. W. Nienow, M. F. Edwards, N. Harnby. – Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p.
7. Verloka I.I., Kapranova A.B., Lebedev A.Ye. [Modern continuous gravity devices for mixing bulk components], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2014, no. 4-1(31), 10 p. available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23282444_34236886.pdf (accessed 20 May 2026). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Pershin V.F., Odnol'ko V.G., Pershina S.V. *Pererabotka sypuchikh materialov v mashinakh barabannogo tipa* [Processing of bulk materials in drum-type machines], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 220 p. (In Russ.)
9. Demin O.V., Sviridov M.M., Pershin V.F. [Ways to improve the efficiency of mixing bulk materials], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Bulletin of universities. Chemistry and chemical technology], 2010, vol. 53, no. 1, pp. 97-99. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Borshchev V.Ya., Farur Kh., Makarov V.S., Kokunov G.V. [Ways to improve the efficiency of mixing bulk materials in gravity 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.)
11. Gvozdev A.V., Oguy S.V. *Tekhniko-tekhnologicheskoye obespecheniye innovatsiy v agropromyshlennom komplekse : materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technical and technological support for innovations in the

agro-industrial complex: Proceedings of the IV International scientific and practical conference], Melitopol, 2025, pp. 121-125. (In Russ.)

12. Sukhorukova T.A., Bozhko V.G., Borshchev V.Ya. [Modern technologies and equipment for the preparation of mixtures of bulk materials], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of Tula State University. Technical sciences], 2023, no. 3, pp. 152-162. doi: 10.24412/2071-6168-2023-3-152-163 (In Russ., abstract in Eng.)

13. Borshchev V.Ya., Gatapova N.Ts., Titov G.A. [Analysis of paddle mixer designs for mixing bulk materials prone to segregation], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 482-496. doi: 10.17277/vestnik.2023.04.pp.653-665 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Kikin N.O. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Belgorod, 2023, 198 p. (In Russ.)

15. Mansur V., Pershin V.F. [Units for preparing a mixture of components prone to segregation: current status and prospects. Part II], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 139-152. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.139-152 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Brazhnik Yu.V. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Belgorod, 2017, 200 p. (In Russ.)

17. Borshchev V.Ya., Farur Kh., Makarov V.S. *Gravitatsionnyy smesitel' syuchikh materialov* [Gravity mixer for bulk materials], Russian Federation, 2024, Pat. 2821456 (In Russ.)

18. Alian M., Ein-Mozaffari F., Upreti S.R. Analysis of the mixing of solid particles in a plowshare mixer via discrete element method (DEM), *Powder Technology*, 2015, vol. 274, pp. 77-87. doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.012

19. Chen J., Furuichi M., Nishiura D. Discrete Element Simulation and Validation of a Mixing Process of Granular Materials, *Materials*, 2020, vol. 13, no. 5, pp. 1208. doi: 10.3390/ma13051208

20. Krenzer K., Mechtcherine V., Palzer U. Simulating mixing processes of fresh concrete using the discrete elementmethod (DEM) under consideration of water addition and changes inmoisture distribution, *Cement and Concrete Research*, 2018, vol. 115, no. 2, pp. 274-282. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.012

21. Dhanasekharan K., Chen J. Analysis of particle mixing in rotating drums using discrete element method, *Powder Technology*, 2006, vol. 165, no. 1, pp. 45-53.

22. Gu Q., Wu H., Sui X., Zhang X., Liu Y., Feng W., Zhou R., Du S. Leveraging Numerical Simulation Technology to Advance Drug Preparation: A Comprehensive Review of Application Scenarios and Cases, *Pharmaceutics*, 2024, vol. 16, no. 10, pp. 1304. doi: 10.3390/pharmaceutics16101304

23. Zuo Z., Gong S., Xie G. Numerical investigation of granular mixing in an intensive mixer: Effect of process and structural parameters on mixing performance and power consumption, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021, vol. 32, no. 4, pp. 241-252. doi: 10.1016/j.cjche.2020.10.036

24. Lozovoy N.M., Radinskaya L.I., Lozovaya S.Yu. [Experimental studies of the dependence of the mixture heterogeneity coefficient on process parameters in a mixer with a variable working chamber], *Tekhnika i tekhnologiya transporta* [Transport engineering and technology], 2019, no. S(13), pp. 33. available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40999989_23635079.pdf (accessed 20 May 2026). (In Russ., abstract in Eng.)

25. Available at: <https://www.edemsimulation.com> (accessed 20 May 2026).

26. Connelly R.K., Kokini J.L. Examination of the mixing ability of single and twin-screwMixers using 2D finite element method simulation with particle tracking,

Journal of Food Engineering, 2007, vol. 79, no. 3, pp. 956-969. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.03.017

27. Dolgunin V.N., Ukolov A.A., Ivanov O.O. [Kinetic regularities 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.)

Untersuchung der Effizienz des Mischens von Schüttgütern in einem Kaskaden-Schwerkraftmischer mittels mathematischer Modellierung in der Softwareumgebung Altair EDEM

Zusammenfassung: Mithilfe der Diskrete-Elemente-Methode (DEM) der Software Altair EDEM ist der Einfluss des Füllgrades eines Schwerkraftmischers auf die Mischqualität von Schüttgütern untersucht. Es sind Computersimulationen mit unterschiedlichen Füllgraden des Mischerkörpers durchgeführt, wobei die Mischerkonstruktion, die Materialeigenschaften und die Partikelgrößenverteilung unverändert blieben. Die zeitliche Entwicklung der Mischqualität wurde anhand des Ungleichförmigkeitskoeffizienten bewertet. Die Ergebnisse können zur Verbesserung der Konstruktion und Funktionalität von Schwerkraftmischern in Branchen, die mit körnigen Schüttgütern arbeiten, beitragen.

Étude de l'efficacité du mélange des matériaux en vrac dans un mélangeur à gravité en cascade à l'aide de simulations mathématiques dans l'environnement logiciel altair edem

Résumé: A l'aide de la méthode des éléments discrets (DEM) d'Altair EDEM software est étudié l'effet du facteur de remplissage du mélangeur sur la qualité du mélange des matériaux en vrac dans un mélangeur gravitationnel en cascade. Est réalisée une série des simulations informatiques avec différents facteurs de remplissage du corps du mélangeur en vrac, la conception du mélangeur, les propriétés du matériau et la distribution granulométrique des particules étant inchangées. La qualité du mélange au fil du temps est évaluée à l'aide d'un coefficient d'hétérogénéité. Il est à noter que les résultats obtenus peuvent être utilisés pour améliorer la conception et la fonction des mélangeurs à gravité dans les industries utilisant des matériaux granulaires en vrac.

Авторы: *Фарур Хамза* – аспирант кафедры « Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Борицев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры « Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Титов Георгий Анатольевич* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Российская Федерация.