

УДК 621.745.5

## ДВИЖЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ СМЕСИТЕЛЯХ

**С. Л. РОВИН**

*УП «Технолит», г. Минск, Республика Беларусь*

**Л. Е. РОВИН, В. А. ЖАРАНОВ, О. В. ГЕРАСИМОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

**Ключевые слова:** дисперсные материалы, массоперенос, перемешивание, ротационные печи, компьютерное моделирование.

### Введение

В последнее время все более широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе металлургии, химии, производстве строительных материалов и др. получают вращающиеся (ротационные) агрегаты, предназначенные для физико-химической обработки дисперсных (сыпучих) материалов: сушки, нагрева, охлаждения, обжига, прокатки и других видов термической обработки материала, процессов твердофазного восстановления железа, а также для плавки металлов и сплавов [1]. Особое место среди них занимают смесители с цилиндрическим корпусом и горизонтальной или наклонной осью вращения. Популярность вращающихся печей объясняется высокой интенсивностью и соответственно эффективностью процессов теплопереноса в динамических слоях по сравнению со стационарным неподвижным слоем. Так, теплопроводность стационарного слоя  $\lambda_{сл}$  сравнима с теплоизоляционными материалами, как правило, она меньше теплопроводности материала  $\lambda_m$  на два порядка и более. Смешивание частиц неподвижного слоя производится скребками или катками. При этом энергозатраты значительно выше, а эффективность – ниже, чем самопроизвольное смешивание в динамических слоях.

Последние исследования, выполненные в натуральных условиях и путем компьютерного моделирования [2], [3], позволили получить адекватное представление о течении газов и теплообмене внутри рабочего пространства ротационных наклоняющихся печей (РНП).

Определенные представления о движении дисперсного материала были получены с помощью имитационного моделирования [4]. Было установлено, что материал совершает в таких печах возвратно-поступательное винтовое движение, причем скорость вращения материала превышает скорость вращения самой печи и различна по длине печи, выявлена взаимосвязь расположения и формы слоя с режимом движения и адгезионными свойствами частиц и т. п.

Вместе с тем характер и количественные характеристики движения частиц в динамических слоях такого рода, как и сама структура слоя, изучены недостаточно. Это связано со сложностью исследований подвижного слоя материала внутри вращающейся установки.

Создание устройств, обеспечивающих получение смесей высокого качества и высокую эффективность при нагреве, требует разработки надежных инженерных

методов проектирования и расчета, которые базируются на изучении механики движения сыпучего материала во вращающихся агрегатах-смесителях.

Цель работы – подготовка и проведение исследований движения дисперсных материалов путем компьютерного моделирования с использованием ППП CD-Adapco Star CCM+, Prometech ParticleWorks и метода DEM, дополненные натурными и имитационными экспериментами.

### **Движение дисперсного материала**

В ряде работ, посвященных движению дисперсных материалов, представления базируются на моделях, в которых исследуются монодисперсные материалы при изотермических условиях без учета сил аутогезии и аэродинамического давления [5]–[7]. Использование уравнений, описывающих движение материала как сплошной среды, также не вполне правомерно, так как свойства полидисперсных материалов, используемых в технологии, существенно отличаются от характеристик частиц, составляющих по условию сплошную среду [8].

Рядом исследователей предпринимались попытки описания процесса смешивания и соответственно структуры слоя, распределения нагрузок, устойчивости и т. п. на основе положений механики грунтов: работы Н. Н. Васильева, Г. А. Гениева, Э. В. Дженике и др. [9]–[11].

В основном они сводятся к упрощенной модели слоя, состоящего из двух зон: транспортирования, где смешивания не происходит, а материал движется как плотное тело, и зоны активного смешивания или обрушения. Последняя зона располагается над линией обрушения, которая соединяет точки касания слоя материала в моменты захвата и отрыва от стенки печи.

В реальных условиях движение слоя и частиц в слое, в частности, перемешивание, определяются силами межчастичных связей (аутогезии) и внутреннего трения в слое, силами трения на границе «дисперсный материал – стенка» (адгезии), силами инерции, центробежными силами, силой тяжести и моментами сил. Кроме того, на верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют аэродинамические силы скоростного потока газов. При контакте движущихся частиц необходимо учитывать и силы упругости.

Также не дает удовлетворительных результатов использование математической модели, описывающей поведение шаров, помещенных во вращающийся барабан.

При движении сыпучих материалов помимо гравитационных и центробежных сил необходимо учитывать дополнительные силы, включая силы адгезии и аутогезии.

Последние определяют угол внутреннего трения, отличающийся от угла естественного откоса в сторону увеличения, силы бокового давления, определяемые также высотой слоя, удельной плотностью материала и коэффициентом Пуассона, а также особый пульсационный (перманентно-дискретный) режим движения слоя, в котором при разгрузке образуются динамически неустойчивые своды, создающие дополнительные горизонтальные силы, поджимающие частицы к стенке печи.

Боковое давление на стенки емкости, в которой находится дисперсный сыпучий материал, достаточно хорошо известно на практике при эксплуатации бункеров, в том числе с песком или окатышами, в технике шахтных печей и т. п. [12]. В реальных условиях разрушение (разгрузка) слоя в верхней точке сектора подъема (120–145°) происходит при изменении баланса комплекса сил. Далее, после естественного торможения, вызванного силами аутогезии, что приводит к утолщению в верхней части слоя, происходит обрушение и ускорение скольжения частиц во встречном направлении по отношению к «транспортной» зоне. В сечении динамический слой приобретает чечевицеобразную форму, что хорошо заметно в натуральных условиях.

В сечении, перпендикулярном оси вращения, перемещение материала к днищу печи приводит к образованию в зоне, прилегающей к нему, придонного вала – области, приподнятой над уровнем свободной поверхности материала. При увеличении его высоты частички, находящиеся на вершине, соскальзывают под действием силы тяжести в направлении горловины печи. Это формирует встречное движение материала в продольном направлении. В результате движение становится винтовым возвратно-поступательным, обеспечивающим активное перемешивание материала, как в радиальном, так и в осевом направлении. Это объясняет более высокую эффективность печей и смесителей с наклонной осью вращения. В качестве объекта – представителя таких агрегатов при компьютерном моделировании – была выбрана ротационная наклоняющаяся печь РНП.

### **Компьютерное моделирование движения дисперсных материалов во вращающихся агрегатах**

Для определения количественных характеристик движения частиц в динамических слоях было проведено компьютерное моделирование движения дисперсных материалов в РНП с использованием ППП CD-Adapco Star CCM+, Prometech ParticleWorks и метода DEM [12], [13]. Для исследования движения твердых частиц доступны модель многофазности Лагранжа и метод дискретных (конечных) элементов Discrete Element Method (DEM). Помимо инструментов визуализации, STAR-CCM+ и ParticleWorks имеют набор инструментов для постпроцессинга решения и анализа данных.

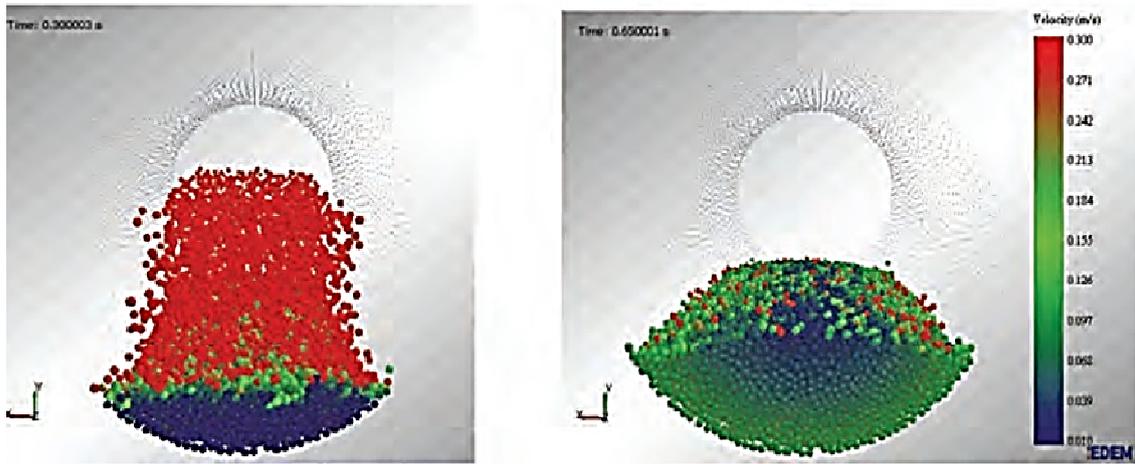
Для решения проблемы столкновения частиц ParticleWorks использует метод штрафа, который учитывает обрушение поверхностей частиц и силу отталкивания в соответствии с количеством обрушения. Взаимодействие между частицами рассматривается на основе моделей жесткой пружины, вязкого демпфера и модели ползуна соответственно.

Метод дискретных элементов очень требователен к вычислительным ресурсам ЭВМ, что в определенной степени привело к ограничениям при проведении компьютерных исследований: уменьшению уровня загрузки материала, размеров и количества частиц, длительности процесса смешивания. Тем не менее, полученные результаты достаточно точно соответствуют реальным параметрам, что подтвердила проверка на их адекватность на промышленной печи РНП-05 (верификация) (рис. 1).

Начальные значения основных параметров: диаметр рабочего пространства  $D = 300$  мм, длина рабочего пространства  $L = 450$  мм, угол наклона печи  $\alpha_n = 15^\circ$ , сила межчастичных связей (аутогезия) – 0,9, внутреннего трения в слое – 0,85, скорость вращения печи  $v_n = 0,5$  об/мин, диаметр частиц  $d_0 = 3-4$  мм, плотность частиц  $\rho = 2700,2800$  кг/м<sup>3</sup>, сила трения на границе «дисперсный материал – футеровка» (аггезия)  $F_{тр} = 0,85$ , температурный режим – изотермический.

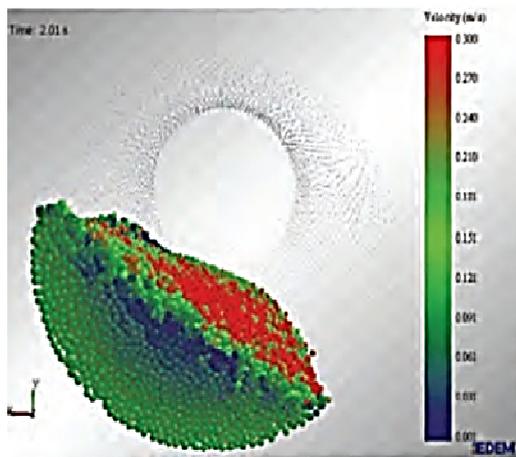
На представленных иллюстрациях хорошо видно поведение материалов и структура слоя от загрузки до состояния, достигаемого после трех оборотов (конец расчетов). Цвет частиц соответствует их скорости. Расчетные данные по сечениям слоев, расположенных по длине рабочего пространства РНП, свидетельствуют об ускорении, которое получают частички, перемещающиеся от горловины печи к ее днищу (рис. 2).

Методика позволяет вычислить необходимую продолжительность процесса (число оборотов) для получения заданного качества смешивания или однородности (рис. 3).

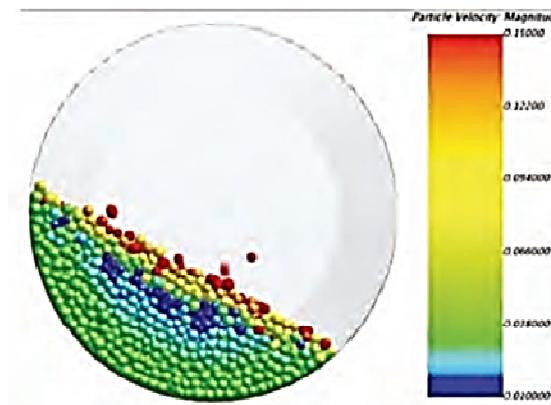


а)

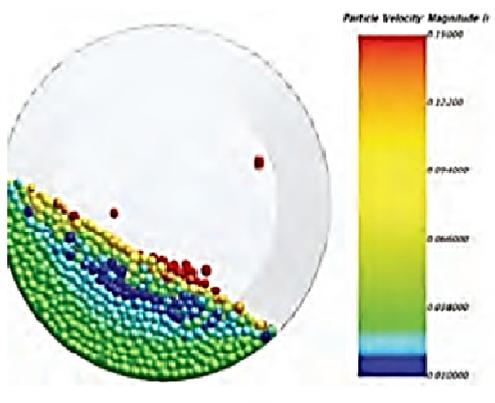
б)



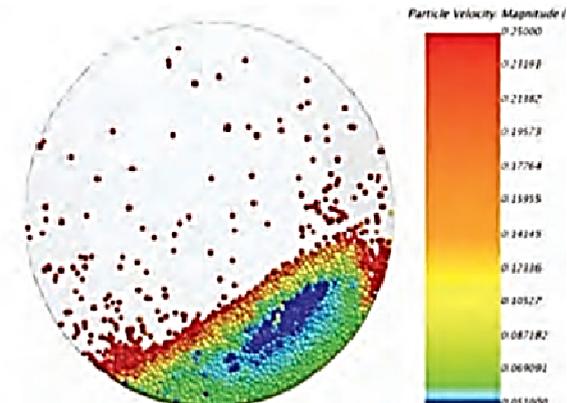
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Движение дисперсного материала в РНП (стенки условно убраны):  
 а, б – начало работы, загрузка в печь; в – начало движения поверхностного слоя (соскальзывание); г – движение материала при снижении аутогезионных сил, что соответствует нагретым стружке и окалине; д – установившееся движение; е – движение материала при качании печи при минимальных аутогезионных силах – после высокотемпературного нагрева; а-в – вид со стороны днища печи; г-е – вид со стороны горловины печи

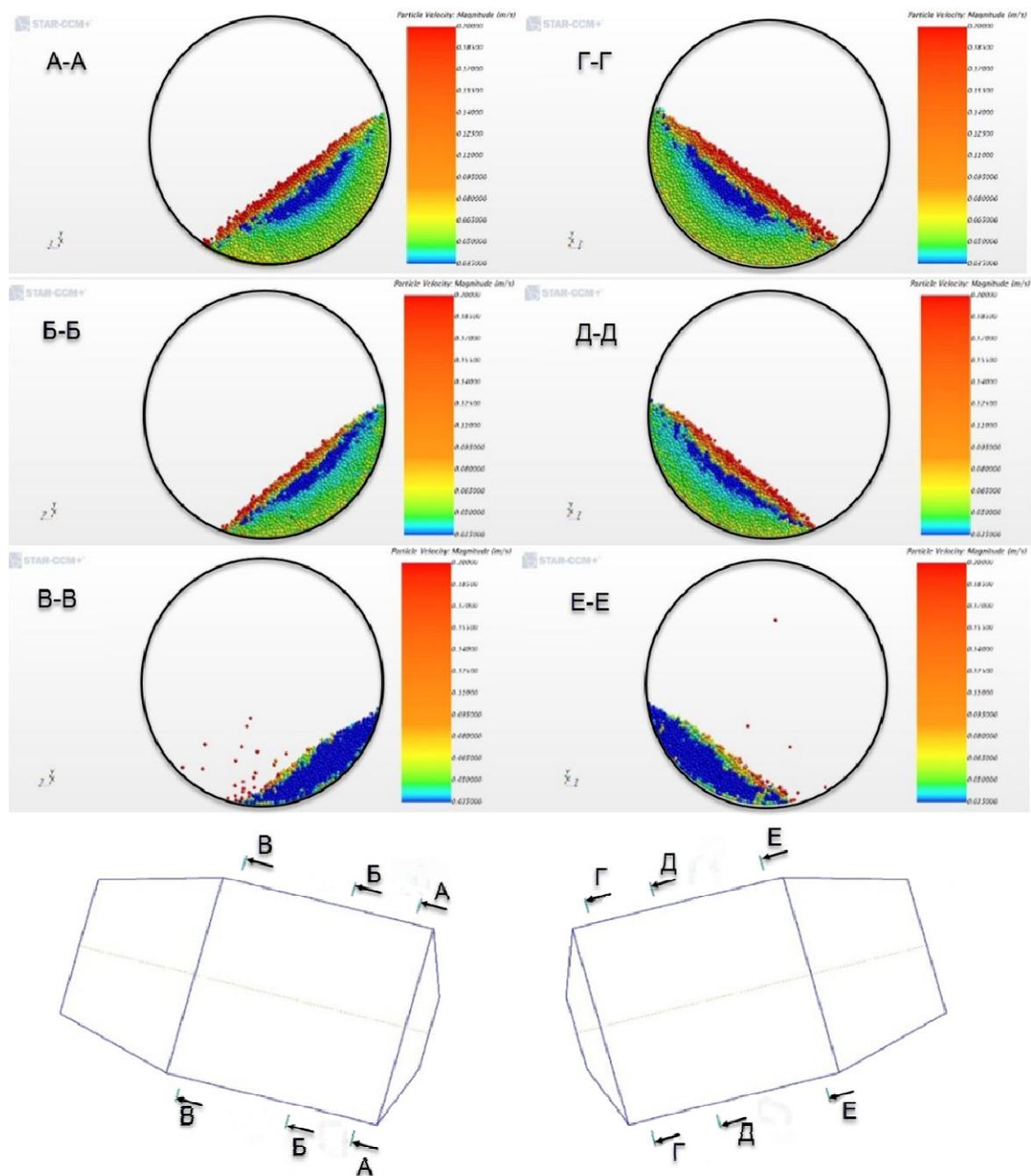


Рис. 2. Распределение скоростей дисперсных частиц в слое по поперечным разрезам:  
 А-А-Д-Д – вид со стороны днища печи; Е-Е-Л-Л – вид со стороны горловины печи.  
 Вращение печи – по часовой стрелке

Наглядное представление о характере движения частиц в динамическом слое дает расчет траектории отдельной частички. На рис. 4–6 представлены примеры расчета движения частиц в рабочем пространстве по длине печи, а также в пристеночной зоне вблизи днища. Хорошо заметно сходство траектории с расчетными данными, полученными при имитационном моделировании, что повышает достоверность полученных расчетных результатов. Частицы дисперсного материала активно взаимодействуют друг с другом, обмениваясь кинетической и тепловой энергией, что в конечном счете и определяет эффективность тепловой работы печи.

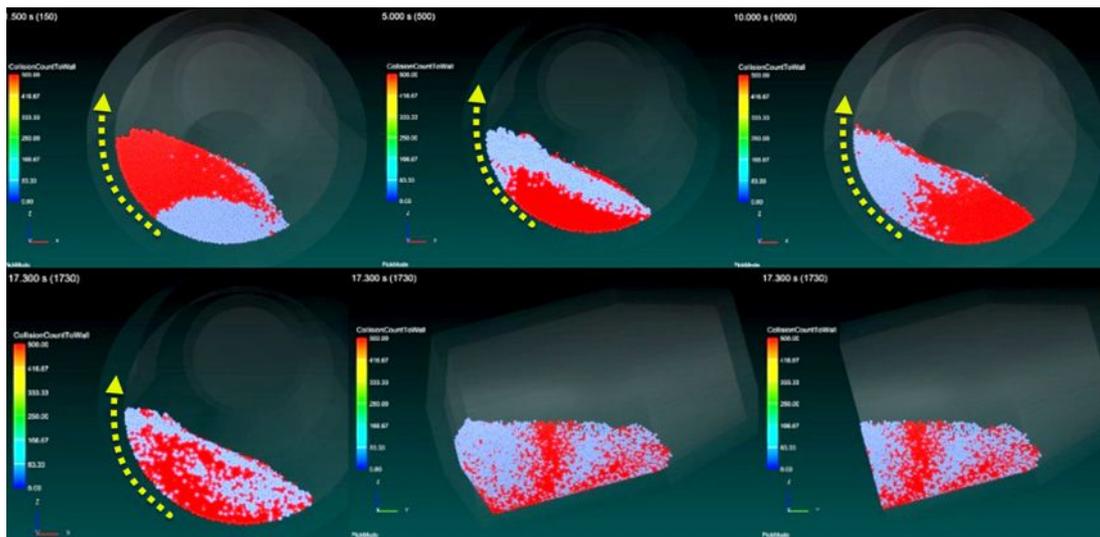


Рис. 3. Степень перемешивания дисперсных частиц в разрезах слоя по сечениям при скорости вращения 5 об/мин

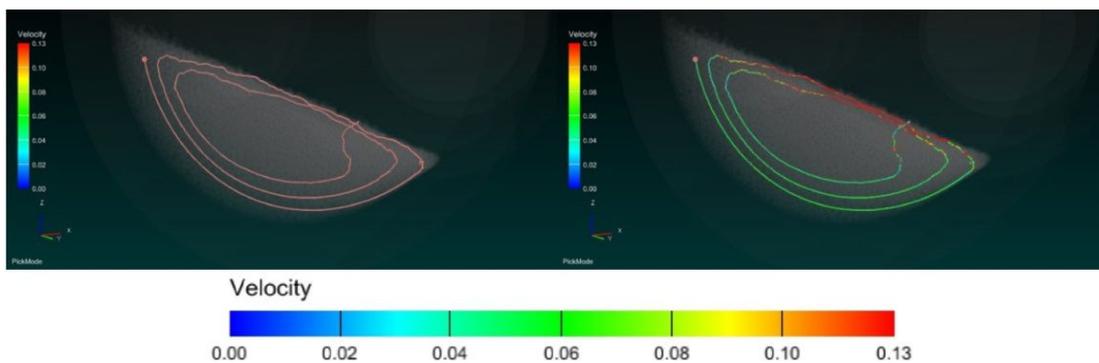


Рис. 4. Движение частицы дисперсного материала в РНП (движение по часовой стрелке, точка характеризует окончание движения): слева – траектория частицы

Достаточно хорошо видно, что реальное движение сильно отличается от традиционных представлений о спокойном течении или скольжении частиц по неподвижной поверхности транспортного слоя. Движение может быть characterized как пульсационное.

Продолжительность контакта частиц со стенками футеровки рассчитывается по количеству итераций, когда частица имела связь со стенкой. Частицы, окрашенные в красный цвет, находились в контакте со стенками 5 с и более. Это суммарный показатель позволяет не только оценить подвижность частицы (как часто она перемещается из скользящего слоя вглубь транспортной зоны), но и позволяет рассчитать количество тепла, получаемого частицами от стенок.

При скорости вращения печи 5 об/мин период одного оборота отдельно взятой частицы в слое составляет 6 с, что в 2 раза меньше, чем время одного оборота ротационной печи. Расчетные значения объемного коэффициента теплопередачи в слое для условий эксперимента составляют  $\alpha_v = 2750\text{--}3100 \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}$ .

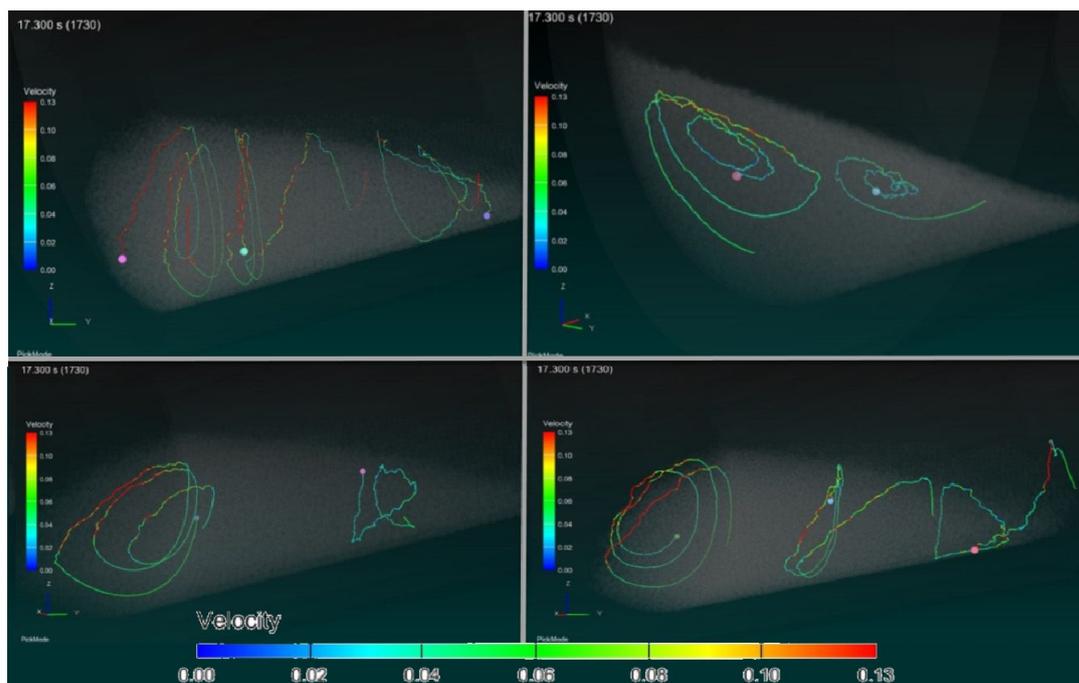


Рис. 5. Траектории движения частиц дисперсного материала в РНП (движение по часовой стрелке, точка соответствует окончанию движения)

В целом скорость вращения материала в печи в 3–4 раза выше, чем скорость вращения самой печи: 6–10 против 2–3 об/мин. Это различие обусловлено высокими адгезионными силами, увлекающими в синхронное вращение прилегающие к футеровке слои нагреваемого материала. Скорость этого обратного движения больше линейной скорости частиц, лежащих на поверхности футеровки печи в 6–8 раз и более. Сталкиваясь с нижележащими слоями частиц, «скоростные» частицы выбивают из них и увлекают с собой более медленные частицы.

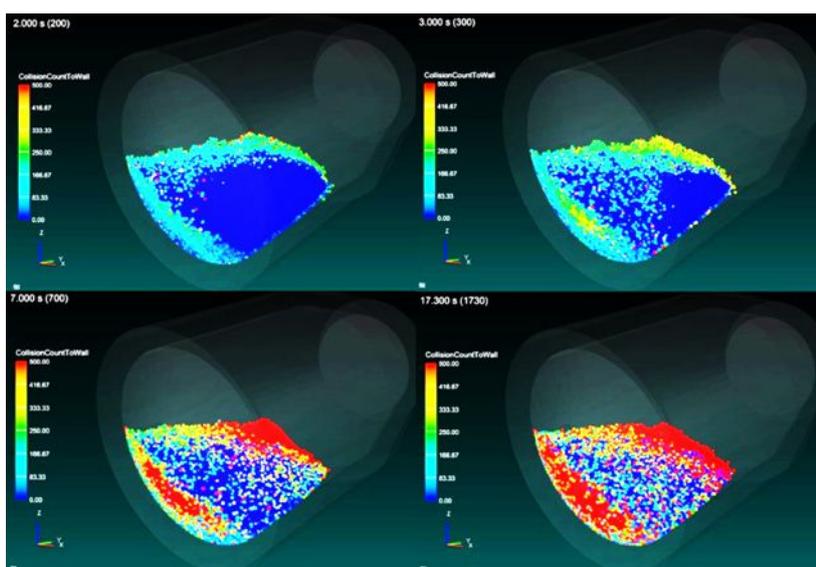


Рис. 6. Продолжительность контакта частиц с футеровкой

Интенсивное перемешивание материала является необходимым условием сохранения сплошности слоя. Большое значение имеет соотношение сил адгезии и трения материала о подложку и сил аутогезии. Представленные данные показывают, что в сечениях, лежащих вблизи загрузочного отверстия (горловины), нижний слой мало участвует во вращательном движении, а соскальзывает с поверхности футеровки печи. Только при достижении достаточной толщины слоя и возрастании давления вышележащих слоев происходит увлечение материала, прилегающего к стенке печи. Это свидетельствует о целесообразности максимальной загрузки вращающихся печей.

Неблагоприятной зоной в РНП может считаться ядро (средняя часть слоя) и область вблизи днища печи, где толщина слоя максимальная, а скорость не превышает линейную скорость частиц на поверхности печи. В этой зоне смешивание будет минимальным. Для ускорения процесса разработана конструкция с лопастями (выступами), выполненными в футеровке днища (рис. 7), которые интенсифицируют перемешивание материала.

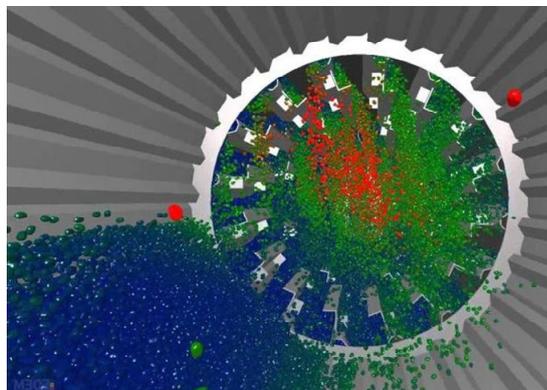


Рис. 7. Вариант реализации лопастного перемешивания материала в РНП

### Заключение

В работе были проведены исследования движения дисперсных материалов в РНП, наименее изученного процесса. В результате компьютерного моделирования получены новые данные о характере и особенностях работы слоя дисперсных материалов в смесителях и печах с наклонной осью вращения. Определены скорости движения материала в различных зонах слоя, выявлено возвратно-поступательное винтовое движение материала, установлены количественные различия в скоростях частиц как в поперечных, так и в продольных сечениях слоя.

Полученные данные могут быть использованы для управления тепломассообменными процессами, а также при разработке и оптимизации конструкции РНП. Возникают предпосылки использования принципов работы этих печей для создания нового класса устройств – смесителей ротационного типа.

### Литература

1. Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2004. – 554 с.
2. Ровин, С. Л. Аэродинамика ротационных короткобарабанных печей / С. Л. Ровин // Литье и металлургия. – 2015. – № 1. – С. 46–51.
3. Ровин, С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. – Минск : БНТУ, 2015. – 382 с.

4. Ровин, С. Л. Движение дисперсных материалов в ротационных наклоняющихся печах / С. Л. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2016. – № 1. – С. 5–10.
5. Королев, Л. В. Приготовление плотных сыпучих смесей в устройстве гравитационно-пересыпного действия методом прямой подачи мелкой фракции в поток обрушения / Л. В. Королев, М. Ю. Таршис // *Современные проблемы науки и образования*. – 2008. – № 3. – С. 116–121.
6. Таршис, М. Ю. Теория и принципы моделирования процесса смешивания сыпучих материалов и создания устройств с гибкими элементами для его реализации : монография / М. Ю. Таршис, Л. В. Королев, А. И. Зайцев. – Ярославль : ЯГТУ, 2011. – 100 с.
7. Ровин, С. Л. Классификация и свойства дисперсных металлоотходов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин // *Литье и металлургия*. – 2015. – № 2. – С. 5–13.
8. Першин, В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с.
9. Селиванов, Ю. Т. Расчет и проектирование циркуляционных смесителей сыпучих материалов без внутренних перемешивающих устройств / Ю. Т. Селиванов, В. Ф. Першин. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 120 с.
10. Ревуженко, О. А. О перемешивании сыпучих материалов в тонких слоях / О. А. Ревуженко // *Физ. механика*. – 2004. – № 7. Спец. вып. 4.2. – С. 277–280.
11. Варламов, А. В. Исходные предпосылки к составлению обобщенной математической модели динамической системы «Бункерное устройство с сыпучим материалом – сводообразование» / А. В. Варламов // *Вестн. Самар. ГУПС*. – 2011. – № 2. – С. 79–89.
12. Promtech Particleworks Theory Manual. Promtech Software, Inc., 2015. – 48 p.
13. Norouzi H.R. et. al. Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016. – 416 p.

*Получено 17.07.2018 г.*