



УДК 621.745

Поступила 20.05.2016

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ COMPUTER SIMULATION OF DISPERSED MATERIALS MOTION IN ROTARY TILTING FURNACES

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by,
Л. Е. РОВИН, В. А. ЖАРАНОВ, В. С. МАЗУРОВ, Гомельский государственный технический
университет им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by,
L. E. ROVIN, V. A. ZHARANOV, V. S. MAZUROV, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj,
Gomel, Belarus, 48, Ochyabrya ave. E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by

В статье приведены результаты компьютерного моделирования движения дисперсных материалов в ротационных печах с наклонной осью вращения. Получены новые данные о работе динамического слоя, что расширяет представления о происходящих в нем тепломассообменных процессах.

The article presents the results of computer simulation of dispersed materials motion in rotary furnaces with an inclined axis of rotation. Has been received new data on the dynamic layer work that enhances understanding of heat and mass transfer processes occurring in the layer.

Ключевые слова. Дисперсность, нагрев, ротационные печи, моделирование, рециклинг.

Keywords. Dispersion, heating, rotary furnaces, simulation, recycling.

Введение. Эффективность тепловой обработки дисперсных материалов, таких, как стружка, окалина, окатыши, дробленые огнеупоры и т. п., определяется интенсивностью тепломассообменных процессов в слое частиц. Интенсивность переноса в слое, прежде всего, зависит от передачи тепла конвекцией от газового потока материалу и от «закачки» тепла внутрь слоя. Последнее определяется характером движения в слое, которое может изменяться от статического (при неподвижном слое) до динамического (при перемешивании частиц) или взвешенного (псевдооживленного) состояния.

Режим нагрева во взвешенном состоянии отличается высокими скоростями и соответственно высоким термическим коэффициентом полезного действия, но пригоден лишь для частиц с узким спектром дисперсности, например, песка. В остальных случаях (при обработке полидисперсных материалов) широко используются способы нагрева во вращающихся печах, где материал перемешивается при пересыпании. Поток газов-теплоносителей передает тепло, проходя над поверхностью слоя, и нагревает, таким образом, только верхнюю зону. Линейные скорости газов не могут быть большими (более 5 м/с) во избежание уноса дисперсных частиц.

КПД такого способа нагрева не высокий и для эффективной работы вращающихся барабанных печей приходится увеличивать их рабочую длину до десятков, а иногда и сотен метров. В литейном производстве этот прием далеко не всегда пригоден. Задачу повышения КПД и сокращения потерь материала можно решить, используя новый тип вращающихся печей – ротационные наклоняющиеся печи с петлеобразным движением газов (РНП).

Движение газов в таких печах носит сложный циркуляционный характер, при котором скорости вращения значительно выше поступательной скорости, что повышает эффективность передачи тепла материалу и уменьшает унос дисперсных и ультрадисперсных частиц. Исследования, выполненные в натурных условиях и путем компьютерного моделирования [1, 2], позволили получить адекватное представление о течении газов и теплообмене для организации рабочего пространства таких печей и их газообо-

рудования. Однако вторая часть проблемы – перенос тепла внутрь слоя дисперсного материала остается недостаточно изученной.

Это связано со сложностью самого объекта исследований – слоя материала внутри вращающейся печи при высокой температуре. Определенные результаты были получены путем имитационного моделирования работы слоя [3]. Было установлено, что материал совершает в таких печах возвратно-поступательное винтовое движение, что 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. д.

Однако характер и числовые (количественные) характеристики движения частиц в динамических слоях такого рода и сама структура слоя оставались не выявленными. С этой целью были подготовлены и проведены исследования движения дисперсных материалов путем компьютерного моделирования.

Движение дисперсного материала во вращающихся печах. Как правило, представления о характере движения дисперсных материалов базируются на упрощенных моделях, в которых представлены монодисперсные материалы при изотермических условиях без учета сил аутогезии и аэродинамического давления газового потока [4].

Использование уравнений, описывающих движение материала как сплошной среды, также не вполне правомерно, так как свойства дисперсных шихтовых материалов, состоящих из частиц неправильной формы и высокой плотности с размерами в диапазоне от долей миллиметра до 20–30 мм и более, отличаются от характеристик частиц, составляющих по условию сплошную среду.

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-футеровка» (адгезии), силами инерции, центробежными силами, силой тяжести и моментами сил. Кроме того, на верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют аэродинамические силы вращающегося скоростного потока газов. При контакте движущихся частиц необходимо учитывать и силы упругости.

Есть существенные отличия в движении материалов во вращающихся печах с неподвижной горизонтальной осью вращения и в ротационных наклоняющихся печах с осью вращения, установленной под углом к горизонту. Последний вариант практически не исследован.

Для определения количественных характеристик движения дисперсных материалов и работы отдельных частиц, что необходимо для получения реальных параметров теплообмена при восстановительных процессах, особенно на микроуровне (в масштабе частицы), было проведено компьютерное моделирование движения дисперсных материалов в РНП. Для этой цели были использованы ППП CD-Adapco Star CCM+ и метод DEM.

STAR-CCM+ позволяет получить решения широкого ряда физических задач, в том числе для нестационарных схем, сопряженного теплообмена, излучения, ламинарных и турбулентных вязких потоков и др. Для исследования движения твердых частиц доступны модель многофазности Лагранжа и метод дискретных (конечных) элементов (Discrete Element Method – DEM).

STAR-CCM+ позволяет отслеживать развитие процесса по мере выполнения расчета, кроме того, дает возможность получить адекватные инженерные данные для объективной оценки технологического режима и конструкции. Помимо инструментов визуализации, STAR-CCM+ имеет набор инструментов для отслеживания решения и анализа данных.

Метод дискретных элементов (DEM), использовавшийся в работе, – это набор численных методов для расчета движения большого количества частиц твердых материалов. В противоположность молекулярной динамике этот метод может быть использован для моделирования частиц с несферической поверхностью. Методы дискретных элементов очень требовательны к вычислительным ресурсам ЭВМ. Частично снять это ограничение можно за счет использования параллельной обработки данных.

Основным положением метода является то, что материал состоит из отдельных дискретных частиц, которые могут иметь различные качества и формы поверхности и свойства упругости, плотности и др.

Моделирование начинается с помещения всех частиц в конкретное положение и придания им начальной скорости. Затем силы, воздействующие на каждую частицу, рассчитываются исходя из начальных данных и соответствующих физических законов.

В случае моделирования реального процесса производится так называемая дискретизация пространства и времени таким образом, что геометрия процесса разбивается на расчетные ячейки, а время процесса – на расчетные временные интервалы.

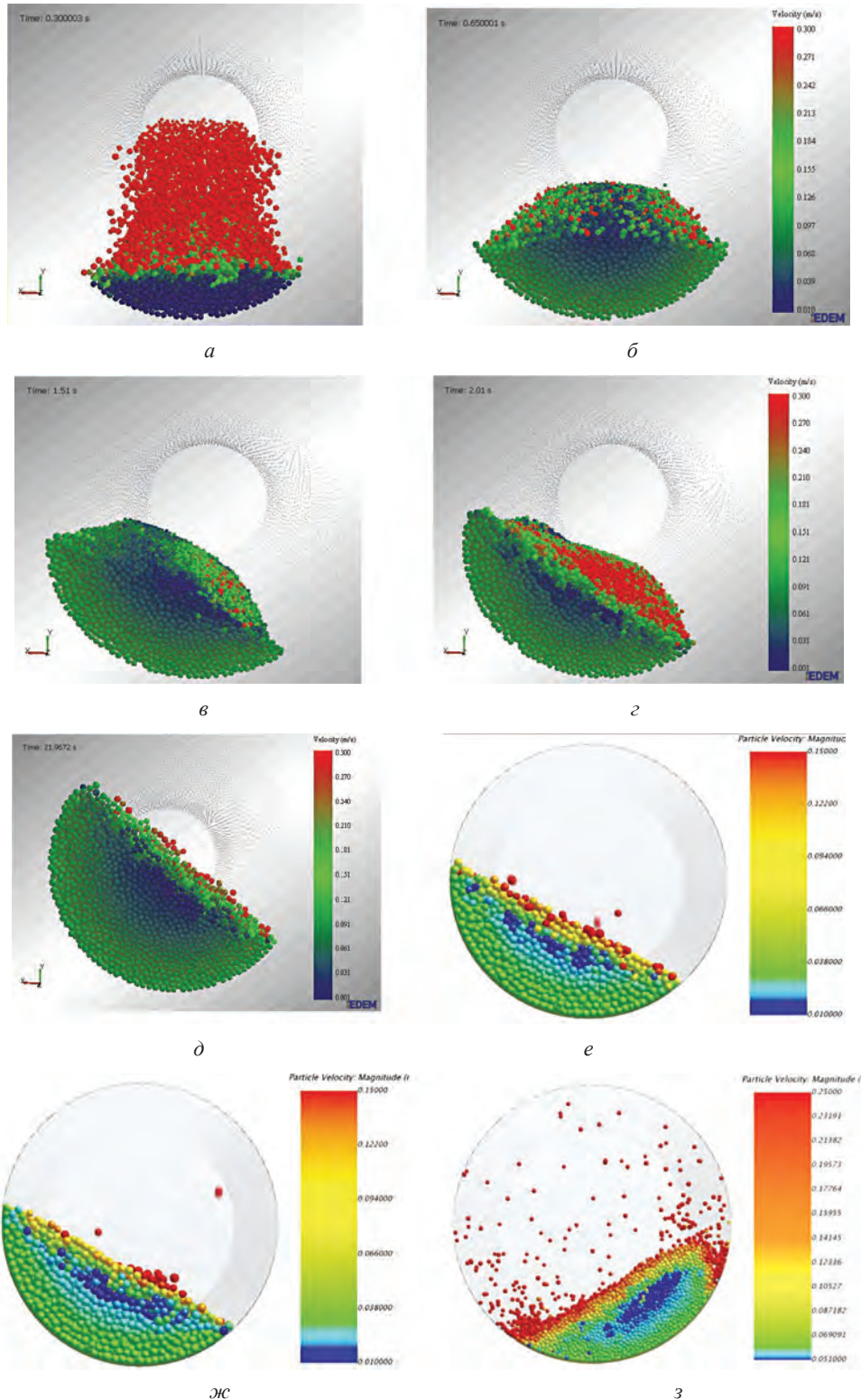


Рис. 1. Движение дисперсного материала в РНП: *а, б* – начало работы, загрузка в печь; *в* – начало вращения, материал удерживается аутогезионными силами; *г* – начало движения поверхностного слоя (соскальзывание); *д* – установившееся движение; *е, ж* – движение материала при снижении аутогезионных сил, что соответствует нагретой стружке и окалине; *з* – движение материала при качании печи при минимальных аутогезионных силах – после высокотемпературного нагрева; *а–д* – вид со стороны дна печи; *е–з* – вид со стороны горловины печи

Расчет выполняли на основе мгновенного баланса сил тяжести, инерции, упругих сил контакта с другими частицами и пограничными силами. Частицы при этом являются твердыми упругими телами, размер которых задается по данным исследованных образцов металлоотходов [5] и масштабного фактора. Частицы совершают поступательное и вращательное движения. В расчете учитываются силы аутогезии

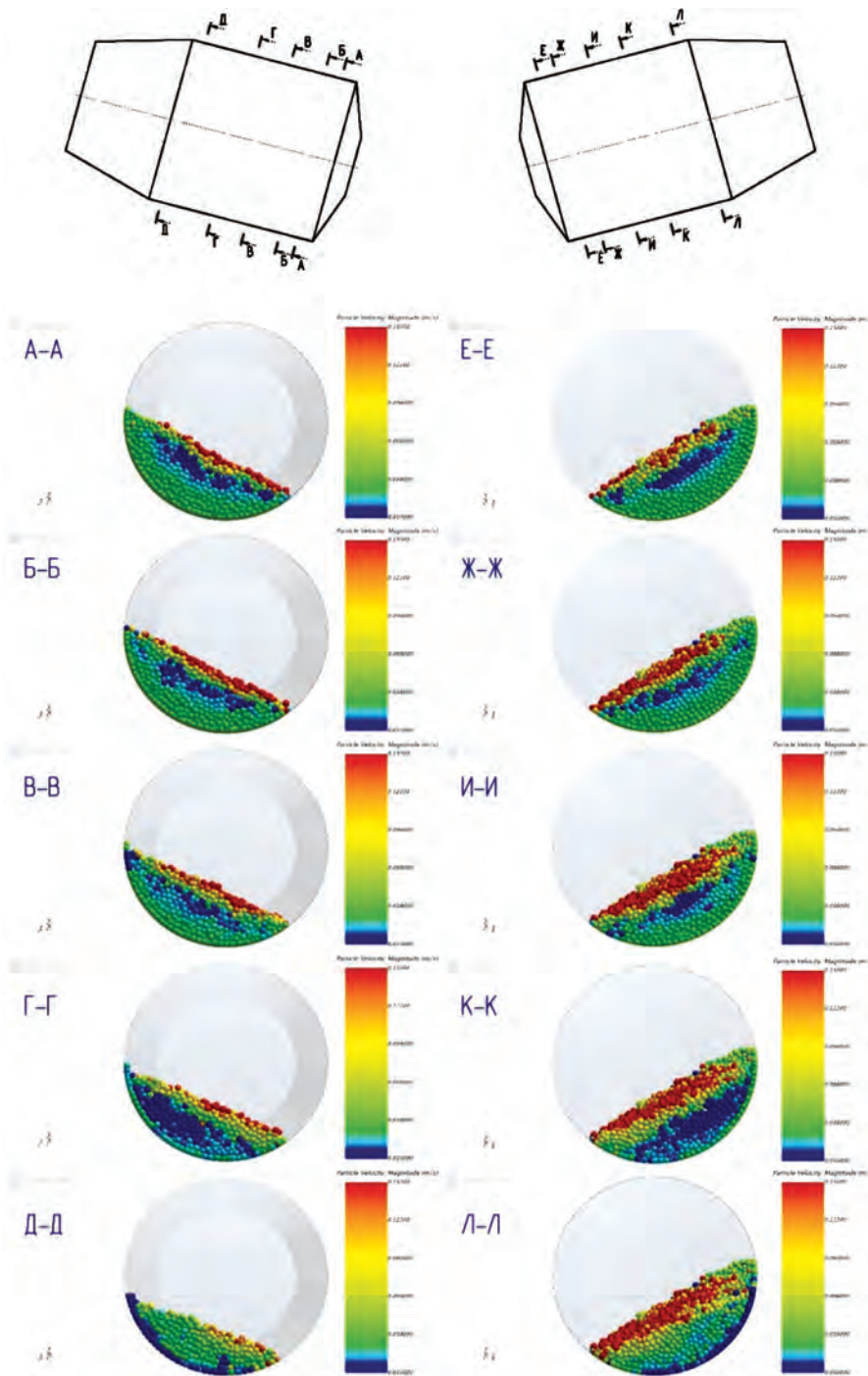


Рис. 2. Распределение скоростей дисперсных частиц в слое по поперечным разрезам: А-А – Д-Д – вид со стороны дна печи; Е-Е – Л-Л – вид со стороны горловины печи. Вращение печи – против часовой стрелки

и адгезии. Все эти силы и моменты сил складываются, чтобы найти результирующую силу, действующую на каждую частицу. Чтобы рассчитать изменение в положении и скорости каждой частицы в течение определенного временного шага из законов Ньютона, применяется метод интеграции. После этого новое положение используется для расчета сил в течение следующего шага, и этот цикл программы повторяется до тех пор, пока моделирование не закончится.

Фрагменты движения материала представлены в скалярной форме, функцией скалярного поля является линейная скорость частиц.

В качестве исходных данных использовали результаты имитационного моделирования и натуральных экспериментов, выполненных на опытно-промышленной печи РНП-0,5.

Результаты, полученные путем компьютерного моделирования движения стружки и окалины в ротационной печи, представлены на рис. 1–3.

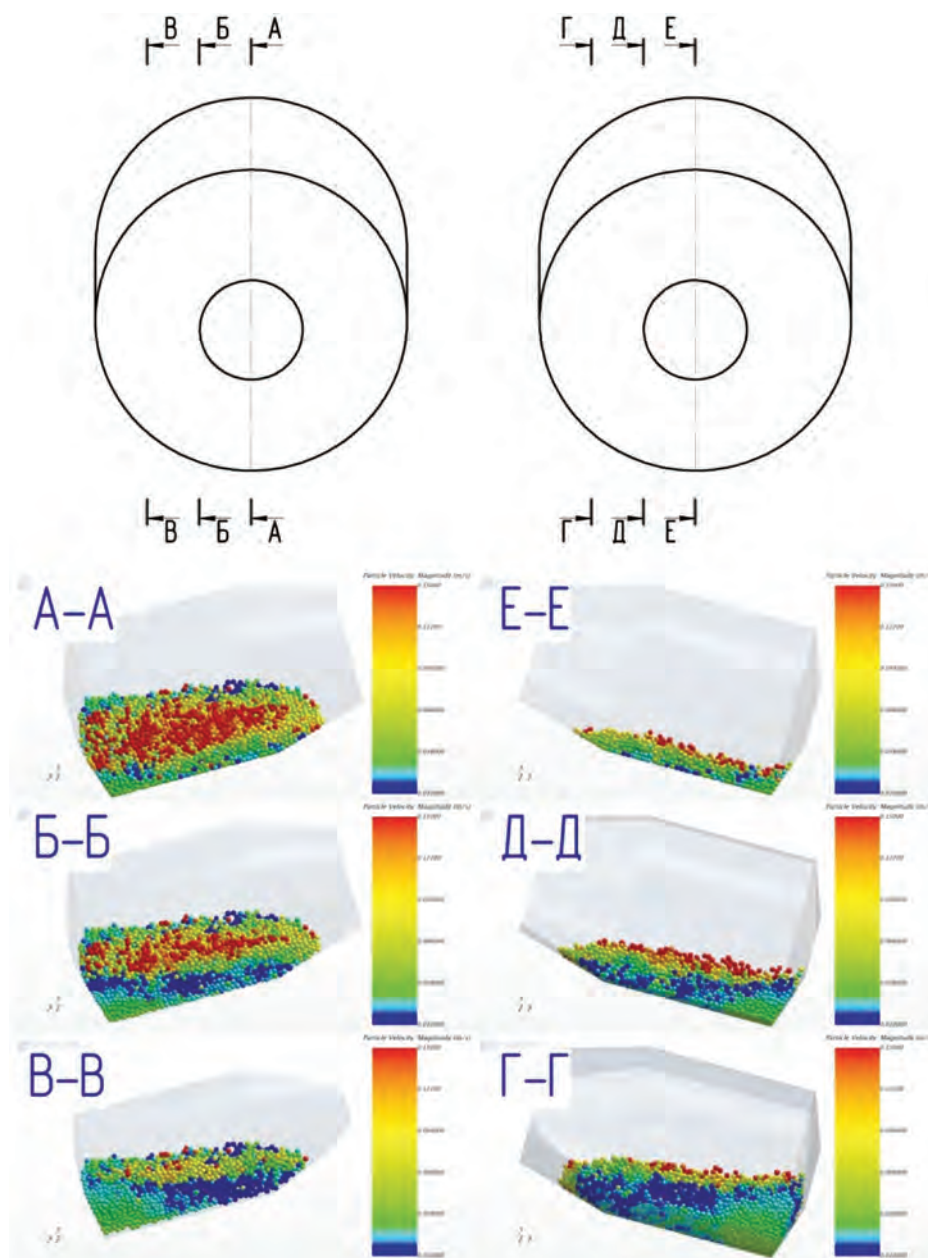


Рис. 3. Распределение скоростей частиц по продольным разрезам слоя материала в РНП

С помощью компьютерного моделирования впервые удалось дать количественную оценку скорости движения отдельных частиц материала в зависимости от их координаты в рабочем пространстве печи, получить представление о распределении скоростей как в поперечных, так и в продольных сечениях слоя.

Разница в скоростях частиц, находящихся на поверхности слоя и в его ядре, может составлять от нескольких десятков до нескольких сотен раз, причем скорости частиц меняются не только в радиальном, но и в основном направлении. Распределение скоростей по сечению слоя зависит от его расположения (расстояния) относительно горловины печи и изменяется во времени.

В целом скорость вращения материала в печи в 3–4 раза выше, чем скорость вращения самой печи: 6–10 об/мин против 2–3 (что соответствует обычной скорости вращения нагревательных и плавильных ротационных печей). Это различие обусловлено высокими адгезионными силами, увлекающими в синхронное вращение прилегающие к футеровке слои нагреваемого материала. Однако при достижении точки отрыва частицы материала начинают двигаться в обратном направлении, возвращаясь к точке касания и захвата поверхностью футеровки.

Скорость этого обратного движения, как следует из представленных данных, больше линейной скорости частиц, лежащих на поверхности футеровки печи в 6–8 раз и более. Сталкиваясь с нижележащи-

ми слоями частиц, «скоростные» частицы выбивают из них и увлекают с собой более медленные частицы. Это способствует переносу тепла и адсорбированных газов в слое и уменьшает толщину центральной малоподвижной зоны. Интенсивное перемешивание материала является необходимым условием сохранения сплошности слоя, который неизбежно разорвался бы на отдельные фрагменты при высоких адгезионных и низких аутогезионных свойствах.

Большое значение имеет соотношение сил адгезии и трения материала о подложку, что зависит от гравитационных сил (плотности частиц, толщины слоя и плотности укладки) и сил аутогезии. Представленные данные показывают, что в сечениях, лежащих вблизи загрузочного отверстия (горловины), нижний слой практически не 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.

Дисперсные материалы в РНП совершают интенсивное возвратно-поступательное движение с относительными скоростями частиц, отличающимися на порядок. Неблагоприятной зоной 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 прогрев будет минимальным. Для ускорения процесса нагрева материала, находящегося у днища печи, разработана конструкция с лопастями (выступами), выполненными в футеровке днища, которые интенсифицируют перемешивание материала.

Выводы

В результате компьютерного моделирования получены новые данные о характере и особенностях работы слоя дисперсных материалов в ротационных печах с наклонной осью вращения. Определены скорости движения материала в различных зонах слоя, подтверждено возвратно-поступательное винтовое движение материала, установлены количественные различия в скоростях частиц как в поперечных, так и в продольных сечениях слоя и т. д. Полученные данные могут быть использованы для управления тепломассообменными процессами в ротационных печах различного типа, а также при разработке и оптимизации конструкции РНП.

Литература

1. Ровин С. Л. Исследование работы ротационных наклоняющихся плавильных печей // Наука и техника. 2016. № 1. Т. 15. С. 18–28.
2. Ровин С. Л. Аэродинамика ротационных короткобарабанных печей // Литье и металлургия. 2015. № 1. С. 46–51.
3. Ровин С. Л. Движение дисперсных материалов в ротационных наклоняющихся печах // Литье и металлургия. 2016. № 1. С. 5–10.
4. Першин В. Ф., Однолюк В. Г., Першина С. В. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.
5. Ровин С. Л., Ровин Л. Е. Классификация и свойства дисперсных металлоотходов // Литье и металлургия. 2015. № 2. С. 5–13.
6. Патент РФ № 10518. Ротационная наклоняющаяся печь для переработки дисперсных материалов / Л. Е. Ровин, С. Л. Ровин, Т. М. Заяц, И. Н. Торбочкин.

References

1. Rovin S. L. Issledovanie raboty rotacionnyh naklonjajushhihsja plavil'nyh pechej [Research work rotating deviating smelters]. *Nauka i tehnika = Science and Technology*, 2016, no. 1, pp. 18–28.
2. Rovin S. L. Aerodinamika rotacionnyh korotkobarabannyh pechej [Aerodynamics korotkobarabannyh rotary furnaces]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 1, pp. 46–51.
3. Rovin S. L. Dvizhenie dispersnyh materialov v rotacionnyh naklonjajushhihsja pechah [The movement of particulate materials in rotary kilns evaders]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 1, pp. 5–10.
4. Pershin V. F., Odnol'ko V. G., Pershina S. V. *Pererabotka sypruchih materialov v mashinah barabannogo tipa* [Processing of bulk materials in drum-type machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 220 p.
5. Rovin S. L., Rovin L. E. Klassifikacija i svojstva dispersnyh metalloothodov [Classification and properties of metal dispersed]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2015, no. 2, pp. 5–13.
6. Rovin L. E., Rovin S. L., Zajac T. M., Torbochkin I. N. Rotacionnaja naklonjajushhajasja pech' dlja pererabotki dispersnyh materialov [Rotary tilting furnace for processing particulate materials]. *Patent RB*, no. 10518, 2014.