



УДК 621.745.5

Поступила 14.09.2017

## НАГРЕВ И СМЕШИВАНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В РОТАЦИОННЫХ УСТАНОВКАХ

### THE HEATING AND MIXING OF DISCRETE MATERIALS IN ROTARY DEVICE

С. Л. РОВИН, УП «ТЕХНОЛИТ», Беларусь, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: [technolit@tut.by](mailto:technolit@tut.by),

Л. Е. РОВИН, В. А. ЖАРАНОВ, Гомельский государственный технический университет

им. П. О. Сухого, Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, 48. E-mail: [kaf\\_metallurgy@gstu.by](mailto:kaf_metallurgy@gstu.by)

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: [technolit@tut.by](mailto:technolit@tut.by),

L. E. ROVIN, V. A. ZHARANOV, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel,

Belarus, 48, Ocyabrya av. E-mail: [kaf\\_metallurgy@gstu.by](mailto:kaf_metallurgy@gstu.by)

*В докладе рассматриваются вопросы нагрева, движения и массообмена сыпучих дисперсных материалов в ротационной печи. Представлены результаты исследования этих процессов, включающие натурные эксперименты, имитационное и компьютерное моделирование, которые позволяют оптимизировать конструкцию и параметры работы ротационных установок.*

*This article describes motion and heat and mass transfer dispersed material in a rotary furnace. Presents the results of a comprehensive study of these processes, including pilot studies, computer modeling and simulation, which allow to optimize the design and process parameters of rotary furnaces.*

**Ключевые слова.** Дисперсные сыпучие материалы, движение, нагрев, перемешивание, ротационные установки, моделирование.

**Keywords.** Dispersion discrete materials, motion, heating, mixing, rotary device, simulation.

Неподвижный слой дисперсных материалов отличается низкой теплопроводностью, близкой к теплопроводности воздуха. Это обстоятельство вызывает необходимость применения агрегатов, работающих с динамическим продуваемым и/или взвешенным слоем.

Высокую интенсивность теплообменных процессов в слое полидисперсных материалов удается обеспечить во вращающихся печах. Для нагрева, обжига и твердофазного восстановления применяются вращающиеся трубчатые печи, для плавки – короткобарабанные печи (КБП). И те, и другие печи отличаются прямоточным движением газового потока. При обработке дисперсных материалов такой характер движения потока накладывает существенные ограничения на его скорость ( $v_r$ ), которая не может превышать скорость витания частиц нагреваемого материала ( $v_{\text{вит}}$ ), что не позволяет получить высокий коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha = f(\text{Re}, \text{Nu}, \text{Pr})$ . И если в трубчатых печах повышения термического КПД добиваются путем увеличения их длины до 100–150 м и более, то в КБП значительное увеличение длины невозможно. Это приводит к серьезным технологическим и эксплуатационным проблемам во время плавки, процесс становится плохо управляемым. Как следствие, КПД короткобарабанных печей находится на уровне 7–15%.

Решение проблемы уноса высокодисперсных материалов и одновременно значительное повышение КПД обеспечивают применение ротационных наклоняющихся печей (РНП), в которых реализовано петлеобразное циркуляционное движение газового потока. Эти печи, появившись лишь в начале 90-х, уже получили достаточно широкое распространение, особенно в процессах, связанных с переработкой дисперсных материалов, например, во вторичной металлургии цветных сплавов. Однако в полной мере использовать преимущества этих печей не позволяет недостаточная изученность происходящих в них тепломассообменных процессов. Это связано прежде всего с трудностями проведения исследований дина-

мического пересыпающегося слоя внутри вращающейся печи. Сложность натуральных экспериментов не позволяет однозначно выявить и описать поведение дисперсного материала, строение слоя, его динамику, интенсивность перемешивания и т. п. Для анализа движения дисперсного (сыпучего) материала и структуры слоя традиционно используют уравнения динамического равновесия сил, действующих на частицу (элемент) слоя, в которых учитываются только масса частички и центробежные силы, возникающие при вращении слоя. К сожалению, эта упрощенная схема пригодна лишь для установок типа шаровых мельниц, так как не учитывает адгезионные свойства частиц [1–4].

Представления о движении и структуре слоя дисперсного (сыпучего) материала во вращающихся печах, используемые в механике сплошной среды, сводятся к упрощенной модели слоя, состоящей из двух зон: внутренней зоны транспортирования, где смешивания не происходит, и 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.

Этой схеме соответствует математическое описание, в котором слой активного смешивания рассматривается либо как бесконечно тонкая пленка и сводится к характеристике поверхностного потока [3], либо имеет конечную толщину [4].

При расчете движения реальных полидисперсных сыпучих материалов в ротационных печах, например дисперсных металлоотходов, помимо внешнего трения материала о стенки печи, гравитационных и центробежных сил необходимо учитывать силы аутогезии, которые определяют угол внутреннего трения, силы бокового давления, определяемые высотой слоя, удельной плотностью материала и коэффициентом Пуассона, а также особый пульсационный (перманентно-дискретный) режим движения слоя, при котором образуются динамически неустойчивые своды, создающие дополнительные горизонтальные силы, прижимающие частицы к стенке печи. На верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют также аэродинамические силы скоростного потока газов.

Боковое давление на стенки емкости, в которой находится дисперсный сыпучий материал, достаточно хорошо известно из практики эксплуатации бункеров в литейном и металлургическом производстве, в том числе с песком, окатышами, флюсами, коксом и т. д. [5–7]. В отличие от статического давления сплошной среды (жидкости) оно зависит не только от плотности и высоты столба материала, но и от его адгезионных и аутогезионных свойств, а также от режима движения слоя.

С целью исследования движения дисперсных материалов в условиях КБП и РНП была разработана методика имитационного моделирования. Модель была выполнена на основе принципов гидродинамического подобия ( $Re_{\text{мод}} \approx Re_{\text{РНП}}$ ) с учетом масштабного фактора. Характерным подтверждением достигнутого гидродинамического подобия является формирование профиля слоя, идентичного реальному (рис. 1, а–в).

Путем имитационного моделирования было установлено, что скорость «вращения» материала в ротационных печах значительно выше, чем скорость вращения корпуса печи. Это превышение зависит от относительного объема загрузки и величины сегмента, занимаемого материалом. При коэффициенте загрузки печи  $v_{\text{мат}}/v_{\text{печ}} \approx 0,3$ , что чаще всего используется, скорость вращения материала примерно втрое превышает скорость вращения печи.

В РНП, имеющей рабочее положение под углом к горизонту (как правило, в пределах 12–18°), чем ближе материал находится к горловине печи, тем меньший сегмент окружности он занимает и тем быстрее вращается: больше оборотов совершает за один оборот печи. Было обнаружено также, что перемещение материала и его активное перемешивание в РНП в отличие от печей с горизонтальной осью вращения происходит не только в сечении, перпендикулярном оси вращения печи, но и в продольном направлении (рис. 1, ж, з).

Для определения количественных характеристик движения слоя и отдельных частиц материала в РНП, что необходимо для получения реальных параметров тепломассобмена, расчета и конструирования печей было проведено компьютерное моделирование с помощью ППП CD-Adapco Star CCM+, Prometech ParticleWork и метода дискретных (конечных) элементов DEM (Discrete Element Method). STAR-CCM+ и ParticleWorks позволяют анализировать и корректировать данные и отслеживать развитие процесса по мере выполнения расчета [8]. Метод DEM в отличие от методов, которые применяются в молекулярной динамике, позволяет моделировать движение частиц с несферической поверхностью и активно используется для расчета движения большого количества частиц, таких, как песчинки, гравий, галька и других твердых материалов [9]. Основным положением метода является то, что материал состоит из отдельных дискретных частиц, которые могут иметь различные поверхности и свойства.

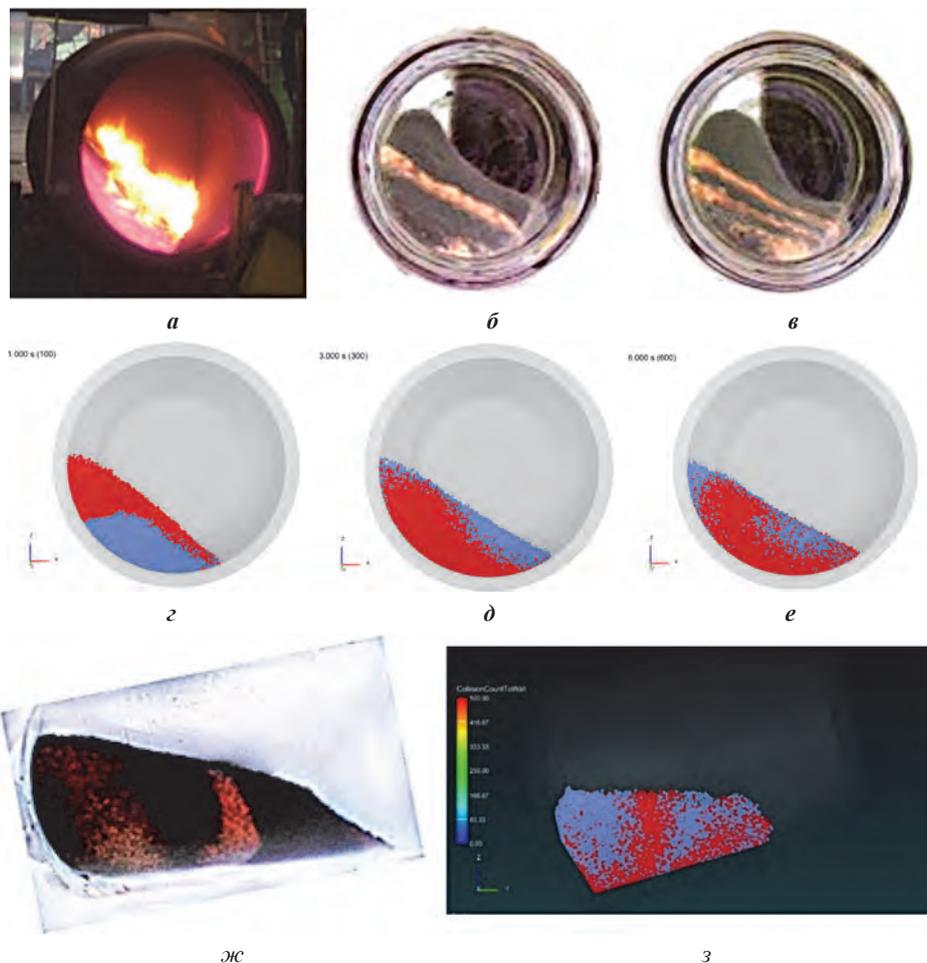


Рис. 1. Движение слоя и перемешивание материала в ротационной наклоняющейся печи: *а* – движение стружки при высоко-температурном нагреве в РНП-2,0; *б*, *в* – движение материала в имитационной модели (*б* – через 0,5 оборота, *в* – через 1 оборот после начала движения); *z-e* – результаты численного моделирования перемешивания материала в поперечном сечении слоя (*z* – начало движения, *д* – через 0,5 оборота, *е* – 1 оборот печи); *ж*, *з* – перемешивание материалов в осевом направлении (*ж* – имитационная модель, *з* – компьютерное моделирование)

Расчет выполняли на основе мгновенного баланса сил тяжести, инерции и сил контакта рассматриваемых частиц с другими частицами и поверхностью печи. Частицы при этом рассматриваются как твердые и упругие тела, размер которых задается по данным натуральных экспериментов с учетом масштабного фактора. Частицы совершают поступательное и вращательное движения. В расчете учитываются также силы аутогезии и адгезии.

В процессе компьютерного моделирования учитывали следующие основные физические, геометрические и технологические параметры, влияющие на характер движения дисперсных материалов во вращающихся печах: диаметр рабочего пространства ( $D$ ); длину рабочего пространства ( $L$ ); угол наклона печи ( $\alpha_n$ ); скорость вращения печи ( $v_n$ ); температурный режим ( $t_n$ ,  $t_k$ ); размер частиц ( $l_0$ ); форму частиц; силу межчастичных связей (аутогезия) и внутреннего трения в слое ( $\mu_s$ ); силу трения на границе «дисперсный материал-футеровка» (адгезия) ( $F_{TP}$ ); плотность частиц ( $\rho$ ).

В результате численного моделирования впервые были получены не только представления о характере движения дисперсных материалов в ротационных печах с наклонной осью вращения, структуре слоя по всей длине печи, скоростях отдельных частиц, но исследован процесс смешивания или конвекции в слое, причем определены количественные значения каждого из параметров и их взаимосвязи с параметрами работы и конструкции печи.

В поперечном сечении слоя материала условно могут быть выделены относительно неподвижное ядро и активно циркулирующая вокруг него периферийная зона. При этом скорости движения частиц в ядре и на периферии слоя могут отличаться в десятки и даже сотни раз, однако четкой границы между зонами не существует. Кроме того, абсолютные значения и распределение скоростей меняются во времени и в зависимости от расстояния рассматриваемого сечения относительно дна или горловины печи.

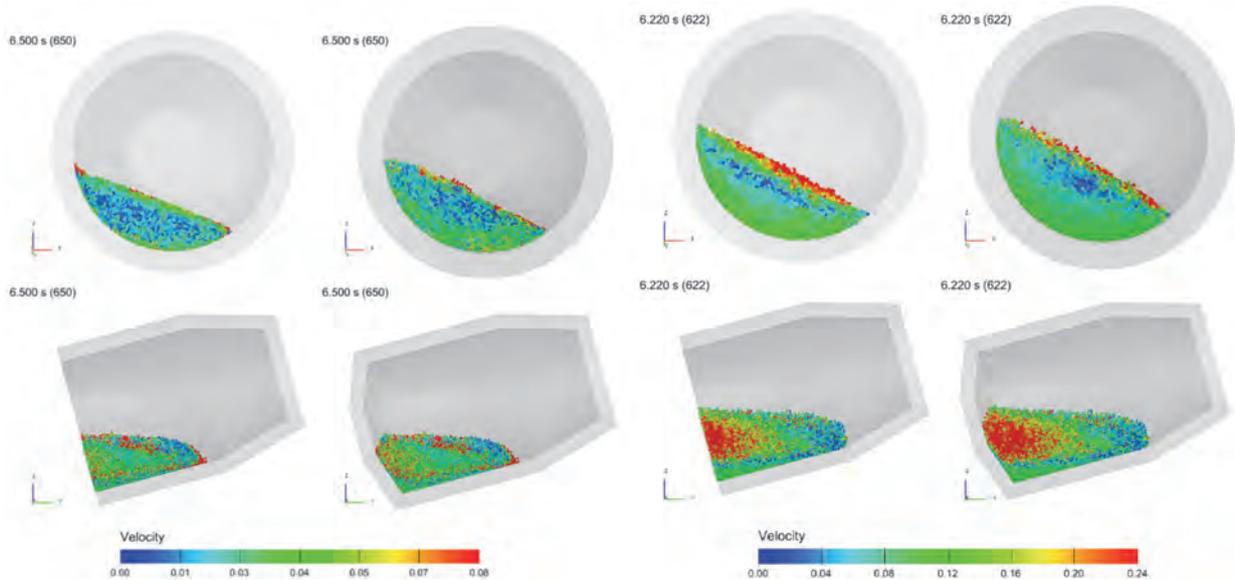


Рис. 2. Распределение скоростей дисперсных частиц в слое материала, находящегося в РНП: *а* – вращение печи со скоростью 5 об/мин; *б* – вращение печи со скоростью 10 об/мин

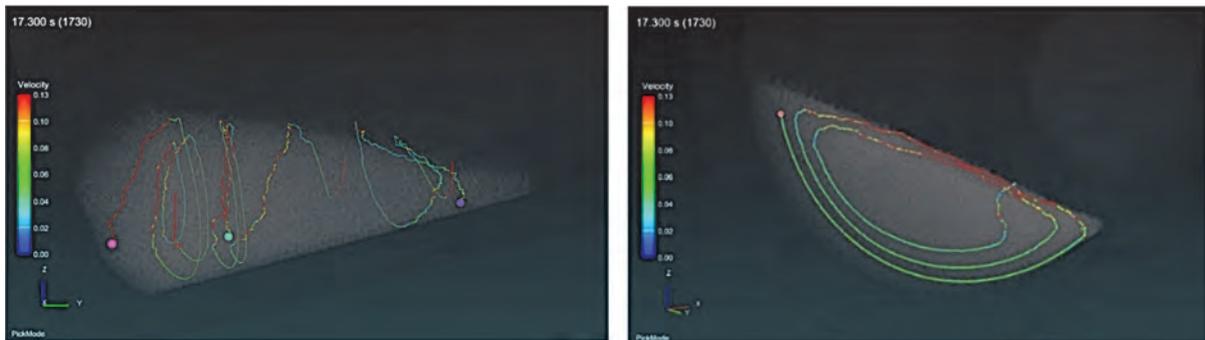


Рис. 3. Траектории движения частиц дисперсного материала в РНП (точки указывают положение частиц в момент окончания расчета)

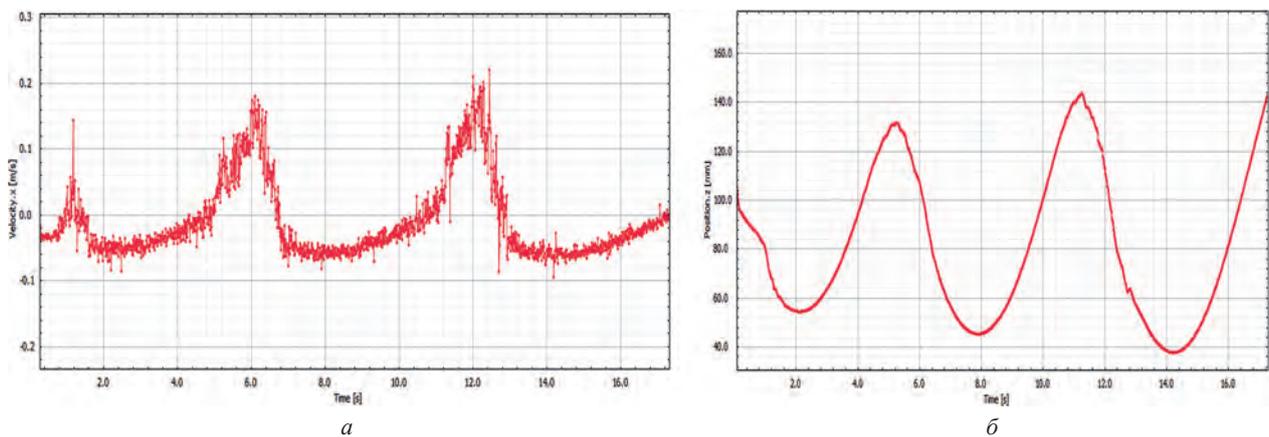


Рис. 4. График мгновенных скоростей частицы (*а*) и ее положение в вертикальной плоскости (*б*)

Некоторые результаты имитационного и компьютерного моделирования движения материала в РНП представлены на рис. 1–4.

Учитывая, что передача тепла конвекцией происходит при смешивании макрообъемов, полученные данные по скорости смешивания в РНП позволяют рассчитать и объемный коэффициент теплообмена в слое  $\alpha_v$ . Тепловой баланс с учетом потерь тепла с отходящими газами определяет расход тепла на нагрев материала до заданной температуры и одновременно расход тепловой энергии газом-теплоносителем. Отсюда в первом приближении, если заменить площадь поверхности теплообмена удельным объемом, можно вычислить  $\alpha_v$ , Вт/(м<sup>3</sup>·К):  $\alpha_v = q/\Delta t$ .

В работах, посвященных исследованиям теплообмена в шахтных печах, где рассматриваются дисперсные материалы, продуваемые высокотемпературными газами, т. е. близкие по режиму процессы, получена эмпирическая формула взаимосвязи  $\alpha_v$  и  $\alpha$ , отнесенного к единице площади поверхности теплообмена:

$$\alpha = \alpha_v \frac{d_{\text{ЭКВ}}}{7,5(1-\varphi)}.$$

Такая замена здесь правомерна в связи с тем, что удельная поверхность и объем для дисперсного материала – взаимосвязанные параметры, но для решения инженерных задач контроль последнего является простой технической задачей, что упрощает управление и расчеты.

Расчетные значения для условий эксперимента составляют  $\alpha_v = 2750\text{--}3100$  Вт/(м<sup>3</sup>·К). Повысить точность расчетов можно с помощью учета теплопроводности собственно элементов слоя путем замены  $\alpha$  на суммарный коэффициент теплообмена:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{\alpha}{1+0,2\text{Bi}},$$

который учитывает не только внешнее, но и внутреннее сопротивление  $\text{Bi} = (\alpha d / \lambda)$ .

Движение газов в РНП характеризуется сложным циркуляционным режимом. Циркуляции происходят в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Циркуляционные скорости более чем в 3–5 раз превышают поступательную скорость газового потока. Активное перемешивание слоя материала и его взаимодействие с высокоскоростным турбулентным газовым потоком обеспечивают значительную интенсификацию процессов теплообмена и соответственно массопереноса, благодаря этому тепловой КПД в РНП в 2,5–3,0 раза превышает КПД традиционных ротационных печей с прямоточным движением газового потока и горизонтальной осью вращения.

Можно отметить, что полученные результаты по процессам движения и смешивания дисперсных материалов имеют более широкое применение, чем только для печей, но могут использоваться и для смесителей различного назначения, окрасочных камер, установок плакирования и других агрегатов вращающегося типа.

С учетом результатов комплексного моделирования движения дисперсных материалов и тепломассообменных процессов в ротационных наклоняющихся печах были определены оптимальные технологические режимы их эффективной работы, разработаны рекомендации по проектированию и применению, выполнены успешные внедрения РНП различного объема, производительности и назначения на предприятиях Беларуси и России.

### Литература

1. **Зеньков Р. Л.** Механика насыпных грунтов. М.: Машгиз, 1952. 215 с.
2. **Першин В. Ф., Однолько В. Г., Першина С. В.** Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа. М.: Машиностроение, 2009. 220 с.
3. **Ревуженко О. А.** О перемешивании сыпучих материалов в тонких слоях // Физическая механика. 2004. № 7. Спец. вып. 4.2. С. 277–280.
4. **Волков М. В.** Метод расчета процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с открытой рабочей камерой: дис. ... канд. тех. наук. Ярославль, 2014.
5. **Фиалков Б. С., Плицын В. Т.** Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи. М.: Металлургия, 1971. 288 с.
6. **Варламов А. В.** Исходные предпосылки к составлению обобщенной математической модели динамической системы «Бункерное устройство с сыпучим материалом – сводообразование» // Вестн. Самарского ГУПС. 2011. № 2. С. 79–89.
7. **Ровин С. Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
8. **Promtech Particleworks Theory Manual.** Promtech Software, Inc., 2015. 48 p.
9. **Norouzi H. R. et. al.** Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016. 416 p.