



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,
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

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

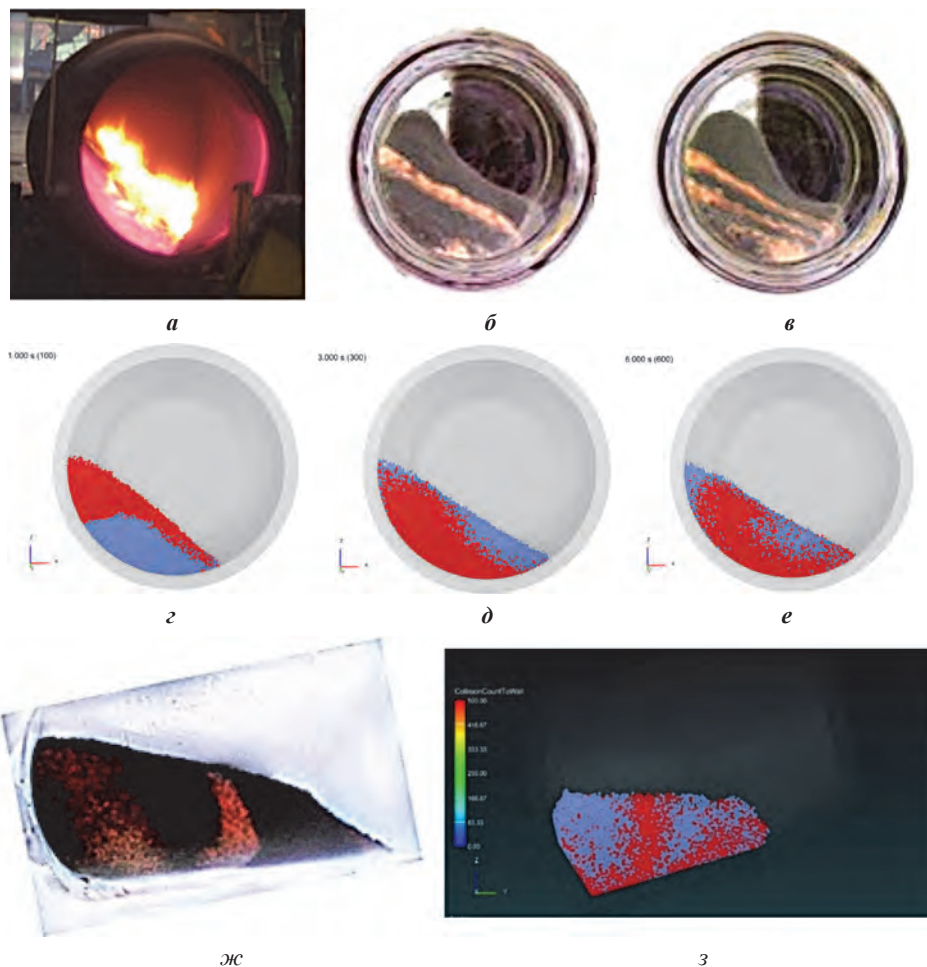


Рис. 1. Движение слоя и перемешивание материала в ротационной наклоняющейся печи: *а* – движение стружки при высоко-температурном нагреве в РНП-2,0; *б, в* – движение материала в имитационной модели (*б* – через 0,5 оборота, *в* – через 1 оборот после начала движения); *г-е* – результаты численного моделирования перемешивания материала в поперечном сечении слоя (*г* – 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 (α_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 (μ_s); силу трения на границе «дисперсный материал-футеровка» (адгезия) (F_{TP}); плотность частиц (ρ).

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.

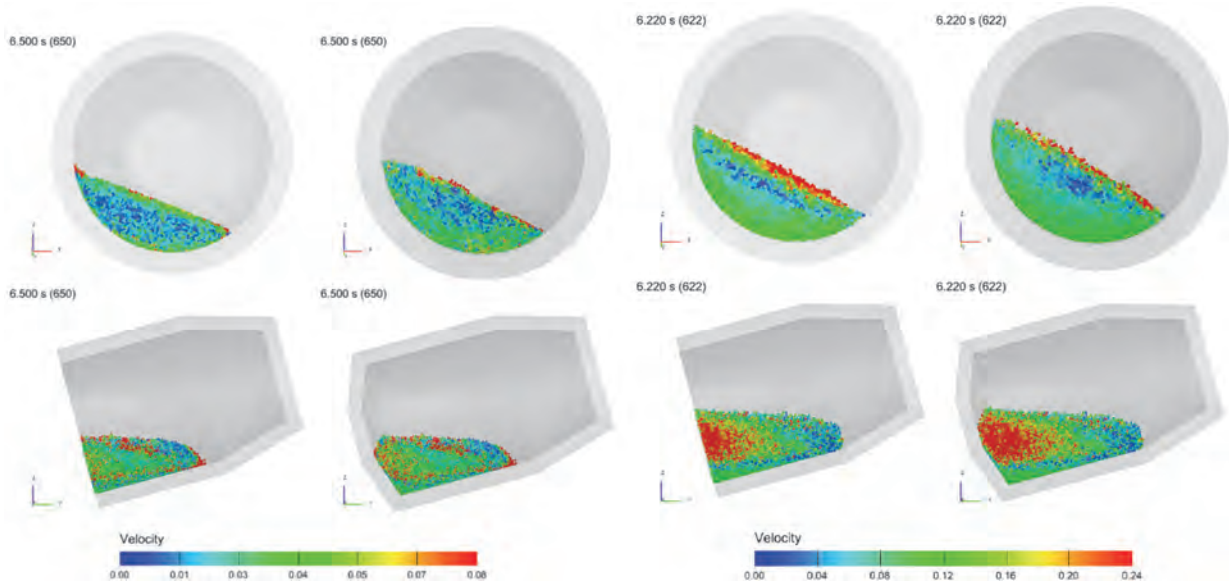


Рис. 2. Распределение скоростей дисперсных частиц в слое материала, находящегося в РНП: *а* – вращение печи со скоростью 5 об/мин; *б* – вращение печи со скоростью 10 об/мин

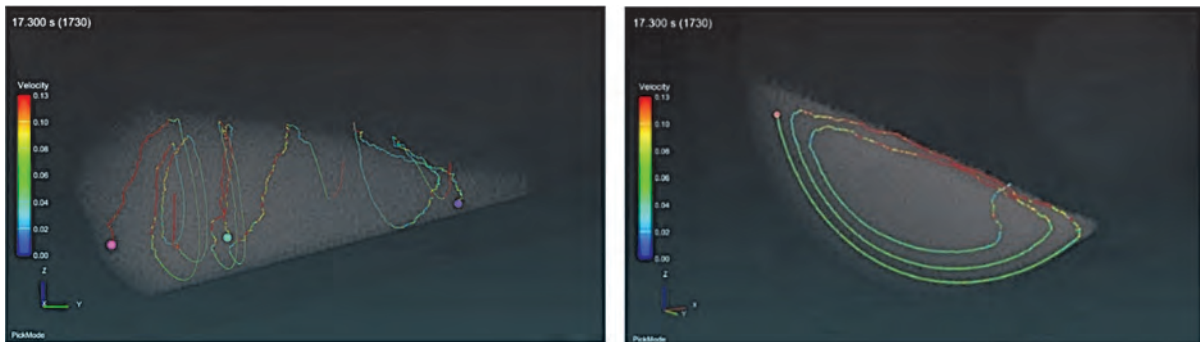


Рис. 3. Траектории движения частиц дисперсного материала в РНП (точки указывают положение частиц в момент окончания расчета)

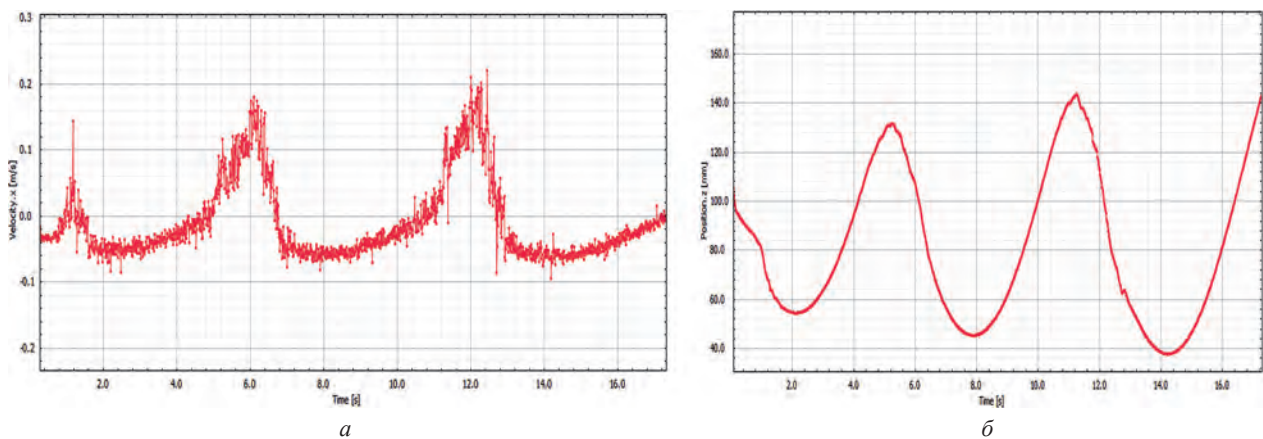


Рис. 4. График мгновенных скоростей частицы (*а*) и ее положение в вертикальной плоскости (*б*)

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 α_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 α_v , Вт/(м³·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 α_v и α , 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 $\alpha_v = 2750\text{--}3100 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Повысить точность расчетов можно с помощью учета теплопроводности собственно элементов слоя путем замены α 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.