



УДК 621.745

Поступила 09.02.2016

## ДВИЖЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОТАЦИОННЫХ НАКЛОНЯЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

### THE MOVEMENT OF DISPERSED MATERIALS IN TILTING ROTARY FURNACES

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by

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

*В статье представлены результаты исследования движения дисперсных материалов в ротационных печах, предложена схема, описывающая сложное винтовое возвратно-поступательное движение материалов в ротационных наклоняющихся печах, предназначенных для рециклинга дисперсных металлодержащих отходов.*

*The article presents the results of a study of the movement of dispersed materials in tilting rotary furnaces. The proposed scheme describes a complex helical reciprocating movement of materials in rotary tilting furnaces that are designed for recycling of dispersible metal-containing wastes.*

**Ключевые слова.** Ротационные печи, движение дисперсных материалов, имитационная модель.

**Keywords.** Rotary furnaces, the movement of dispersed material, simulation model.

**Введение.** В топливных нагревательных и плавильных печах эффективность теплообменных процессов во многом определяется интенсивностью и характером движения теплоносителя (газового потока) и обрабатываемого материала. Чем выше скорость газового потока, чем глубже он проникает в слой материала, тем быстрее нагревается материал и активнее протекают массообменные процессы.

Увеличение скорости массообменных процессов в продуваемом динамическом слое отмечается многими исследователями и подтверждается практикой. В работе [1] приведены данные о значительном ускорении процессов нагрева и интенсификации массообмена в продуваемом слое стружки. В 8–10 раз сокращается время металлизации при продувке монослоя окатышей диаметром < 10 мм [2].

Наибольшая интенсивность этих процессов обеспечивается при продувке слоя материала газовым потоком: в шахтных печах, во вращающихся печах, печах с псевдооживленным слоем и в пневмопотоке. Печи с псевдооживленным слоем и восходящим потоком используются, как правило, для обработки монодисперсных материалов. Переработка дисперсных материалов в шахтных печах представляет значительные сложности из-за высокой плотности и соответственно большого гидравлического сопротивления слоя дисперсных материалов. Увеличение давления продувки слоя приводит к нарушению газового режима, возникновению «каналов», резкому увеличению выноса частиц из рабочего пространства печи.

Наиболее эффективным агрегатом для термообработки полидисперсных материалов являются вращающиеся (ротационные) печи. Во вращающихся печах объемный коэффициент теплопередачи ( $a_v$ ) достигает 3000 Вт/м<sup>3</sup>, в то время как в неподвижном слое материала в кольцевых печах, печах отражательного типа и других он находится на уровне 3–4 Вт/м<sup>3</sup> [3].

**Основная часть.** Движение материала во вращающихся печах различного типа имеет много общего. Это движение определяется силами межчастичных связей (когезии), внутреннего трения в слое, силами трения и адгезии на границе «материал-футеровка», силами инерции (центробежными силами) и силой тяжести. Кроме того, на верхний слой частиц, особенно при обрушении, действуют аэродинамические силы потока газов. Очевидно, что при увеличении скорости вращения корпуса печи интенсивность перемешивания и теплообменных процессов в слое увеличивается. Чем больше сцепление материала с поверхностью футеровки, тем выше поднимается материал при повороте печи и тем интенсивнее разрушается (сдвигается и обрушается) слой.

Скорость «вращения» материала в печи примерно в 3–4 раза выше, чем скорость вращения корпуса печи. Это превышение зависит от относительного объема загрузки и соотношения толщины слоя и диаметра печи.

В то же время есть существенные отличия в движении материалов во вращающихся печах проходного типа (непрерывного действия) и печах периодического действия, в короткобарабанных печах с горизонтальной осью вращения и ротационных наклоняющихся печах (РНП), ось вращения которых находится под углом к горизонту. Эти отличия касаются, в первую очередь, осевой составляющей движения материала (отдельных частиц и слоя в целом).

В первом приближении для понимания механики движения дисперсных материалов в ротационных печах может быть использована известная математическая модель, описывающая поведение шаров в шаровой мельнице [4]. Следует отметить однако, что в шаровой модели не учитываются силы межчастичных связей и силы адгезии.

Согласно этой модели, на частички материала ( $m$ ), расположенные в непосредственной близости от внутренней поверхности корпуса печи, действует радиальная сила  $N$ , возникающая от действия центробежной силы и радиального вектора веса (рис. 1):

$$N = \frac{mv^2}{r} \pm mg \cos \alpha . \tag{1}$$

Во время вращения барабана сила  $N$  вызывает трение между частицами материала и поверхностью барабана с коэффициентом ( $K_{тр}$ ), который зависит от состояния поверхности барабана и самих частичек. В результате происходит «прилипание» частиц к поверхности барабана ( $F_{тр} = NK_{тр}$ ), их подъем и ускорение.

С увеличением угла подъема материала радиальная компонента массы уменьшается и меняет знак после того, как частицы перейдут через горизонтальную ось ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$ ). В зависимости от скорости вращения, раньше или позже, частица теряет контакт с поверхностью барабана, отрывается и скользит (или скатывается) по свободной поверхности слоя. Падающие частицы создают каскад и покрывают верхний слой материала. Таким образом, происходит перемешивание материала в печи и теплообмен в слое.

Предельное состояние, когда силы инерции  $F_{и} = mv^2/r$  становятся меньше радиальной составляющей силы тяжести  $G \cos \alpha$ , соответствующее отрыву материала от поверхности барабана, представлено в виде схемы (рис. 2) [5].

Вторым предельным случаем является ситуация, когда силы инерции (центробежные силы) превышают гравитационные силы:

$$\frac{mv^2}{r} > mg \text{ или } v > V_k = \sqrt{gr} . \tag{2}$$

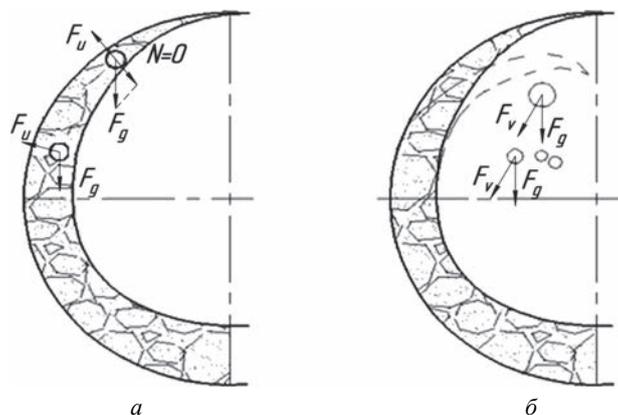


Рис. 2. Схема отрыва частиц от поверхности барабана во вращающейся печи: а – момент критического равновесия; б – момент отрыва частиц;  $F_{и}$ ,  $F_g$  – силы инерции и гравитации;  $N$  – равнодействующая инерционных и гравитационных сил;  $F_v$  – сила аэродинамического давления газового потока

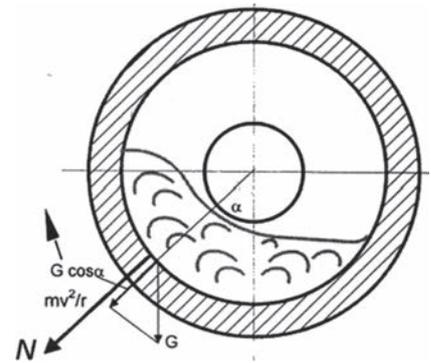


Рис. 1. Схема распределения сил, действующих на частицы материала, находящегося на внутренней поверхности печи

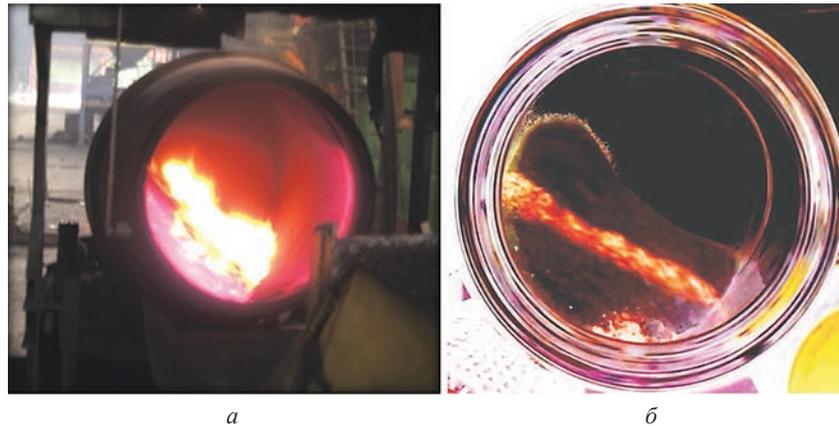


Рис. 3. Положение дисперсного материала при вращении: *а* – высокотемпературный нагрев стружки в РНП; *б* – имитационная модель

Если выразить критическую линейную скорость ( $V_k$ ) через критическую скорость вращения печи ( $n_k$ ):  $V_k = \omega_k r = 2\pi n_k r$ , то условие (2) можно записать в виде:

$$n > n_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{r}}, \quad (3)$$

где  $n$  – скорость вращения печи, об/с;  $r$  – внутренний радиус печи, м.

Когда скорость вращения печи превышает критическое значение ( $n > n_k$ ), материал не отрывается от внутренней поверхности печи, даже если находится в верхней точке ( $\alpha = 180^\circ$ ) и соответственно не перемешивается. Чтобы такая ситуация имела место для печи с радиусом рабочего пространства, равным 1 м, скорость вращения должна быть не менее 30 об/мин. В то же время ротационные нагревательные и плавильные печи имеют скорость вращения, как правило, не более 3–6 об/мин. Поэтому центробежные силы не играют здесь определяющую роль.

На практике подъем материала и его обрушивание (соскальзывание) в большей мере зависят от степени наполнения печи материалом, сил когезии и внутреннего трения в слое, сил адгезии и внешнего трения. Под действием этих сил при вращении печи материал занимает сегмент, соответствующий углу 120–145°. Часть слоя, увлекаемая подложкой (поверхностью футеровки), достигает точки отрыва (угол 90–120° к вертикали) и под действием силы тяжести скатывается (соскальзывает) по поверхности слоя.

В сечении слоя, перпендикулярном оси вращения печи, образуется так называемый «чечевицеобразный» профиль. Эта форма наблюдается как в промышленных печах, так и на имитационных моделях (рис. 3).

В общем случае в поперечном сечении слоя можно выделить две характерные зоны (рис. 4). Первую – циркуляционную зону образует периферия слоя, примыкающая к свободной поверхности слоя и поверхности, соприкасающейся с корпусом печи. Материал в этой зоне движется наиболее активно: захватывается поверхностью печи, поднимается вверх, отрывается в верхней точке от стенки печи, останавливается, обрушивается и скользит по свободной поверхности слоя.

Вторая – центральная зона, образуется внутри слоя. В этой зоне, формирующей ядро слоя, материал движется медленнее, частицы покидают этот слой, увлекаемые материалом, движущимся в циркуляционной зоне. В свою очередь, материал из циркуляционной зоны тоже переходит (выпадает) в центральную зону. Таким образом, происходит перемешивание материала в слое. Решающее влияние на размеры центральной зоны и перемешивание материала оказывают силы когезии и внутреннее трение в слое.

В верхней части сечения слоя имеет место характерное утолщение – «вал», образующийся в результате отрыва от поверхности печи и остановки материала. В средней части свободной поверхности образуется характерная выемка – скорость движения частиц в момент обрушивания вала увеличивается, затем по ходу скольжения по поверхности материала уменьшается, а угол наклона свободной поверхности слоя приближается к углу естественного откоса материала. Точка перегиба на линии, образующей свободную поверхность слоя, соответствует моменту перехода от ускоренного движения к замедленному.

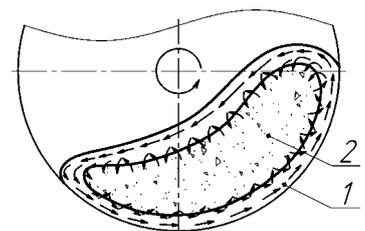


Рис. 4. Схема поперечного сечения слоя материала в ротационной печи: 1 – циркуляционная зона; 2 – центральная зона (ядро)

В нижней части слоя скорость движения материала уменьшается до нуля, а частицы, достигшие поверхности печи, вновь подхватываются и устремляются вверх. Это приводит к образованию в нижней части «вала», аналогичного верхнему сечению слоя.

Нагрев дисперсных материалов сопровождается значительными изменениями состояния их поверхности, адгезионных и когезионных свойств, уменьшением внутреннего трения в слое и внешнего трения по поверхности печи, зачастую меняется (повышается) и дисперсность материала (например, чугунной стружки, окалины и др.). Это приводит к изменению профиля слоя, угол подъема и сектор, занимаемый материалом, уменьшаются, положение и конфигурация слоя приближаются к форме и положению, которое занимает жидкость (расплав) в подобных условиях [1].

Исследования, проведенные на имитационных моделях, подтвердили, что скорость «вращения» материала в ротационных печах значительно выше, чем скорость вращения корпуса печи. Это превышение зависит от относительного объема загрузки или сегмента окружности занимаемого материалом. 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 1 оборот печи).

Циркуляция материала в ротационных печах с осью вращения, находящейся под углом к горизонту, в отличие от печей с горизонтальной осью вращения, происходит как в сечении, перпендикулярном оси вращения печи, так и в продольном направлении (рис. 5).

В сечении, перпендикулярном оси вращения, частицы, находящиеся во внешнем слое, перемещаются непрерывно: в зоне, примыкающей к поверхности печи, они двигаются по окружности за счет сил адгезии и внешнего трения, а на свободной поверхности слоя скользят под действием гравитационных сил, преодолевающих силы когезии (межчастичные связи) и внутреннее трение в слое. В продольном направлении (вдоль оси вращения) от горловины печи к ее днищу частицы материала перемещаются пульсационно – в момент обрушивания слоя или скольжения по его поверхности. Таким образом, материал перемещается к днищу печи, где, накапливаясь, образует «придонный вал».

После достижения критического уровня верхний слой от днища сдвигается к горловине, создавая встречное движение материала в осевом направлении.

В результате материал в РНП совершает винтовое возвратно-поступательное движение, обеспечивающее активное перемешивание, как в радиальном, так и в продольном направлении, в отличие от однонаправленного движения в барабанных печах традиционного типа [4].

Скорость движения слоя, примыкающего к поверхности печи ( $v_{\Pi}^1$ ), определяется скоростью вращения печи и условиями трения на границе материал – футеровка:

$$v_{\Pi}^1 = k(\omega r),$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий проскальзывание материала по поверхности печи ( $k \leq 1$ );  $r$  – внутренний радиус печи.

Скорость движения материала, находящегося на свободной поверхности слоя в момент обрушивания (скольжения), определяется перепадом высот ( $\Delta H$ ) между точкой начала скольжения – границей

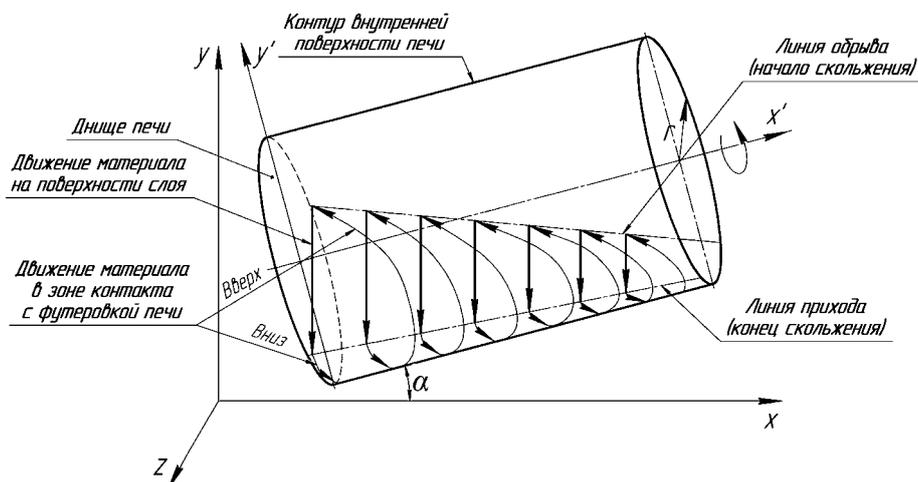


Рис. 5. Траектория движения частиц дисперсного материала в РНП

подъема материала при вращении печи, что, в свою очередь, зависит от адгезии материала, внешнего трения, скорости вращения, толщины слоя, и точкой его завершения, углом наклона поверхности скольжения к горизонту и силами сопротивления скольжению (силами межчастичного взаимодействия – когезии и трения в слое). При этом скорость перемещения частиц в продольном направлении, помимо сказанного, зависит также от угла наклона оси печи к горизонту ( $\alpha$ ). В общем случае для скорости движения частиц по свободной поверхности в осевом направлении ( $v_0''$ ) можно записать:

$$v_0'' = \sqrt{\Delta H a} \sin \alpha .$$

Для скорости движения в плоскости, перпендикулярной оси вращения ( $v_n''$ ):

$$v_n'' = \sqrt{\Delta H a} \cos \alpha .$$

Здесь  $a$  – ускорение движения частицы по поверхности слоя. В первом приближении можно записать:

$$a = g - \gamma ,$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\gamma$  – переменная величина, характеризующая сопротивление скольжению материала по свободной поверхности слоя, которая зависит от угла наклона поверхности к горизонту, сил межчастичного сцепления и трения в слое, что, в свою очередь, связано с температурой материала, состоянием поверхности частичек, гранулометрией материала и другими факторами.

Описанный характер движения подтверждается наблюдениями за материалом, помещенным в прозрачную емкость – имитационную модель, соответствующую РНП по соотношению основных геометрических параметров, пространственному расположению и динамическим характеристикам ( $Re_{\text{мод}} = Re_{\text{РНП}}$ ). На рис. 6 с использованием имитационной модели показано перемещение поверхностного прогретого слоя материала в процессе вращения печи – выделены мгновенные положения слоя, соответствующие количеству совершенных оборотов и текущему углу поворота корпуса печи.

Новые данные, полученные в результате исследований, расширяют представления о закономерностях движения дисперсных материалов в ротационных печах с горизонтальной и наклонной осью вращения, позволяют уточнить технические характеристики и конструктивные параметры ротационных наклоняющихся печей.

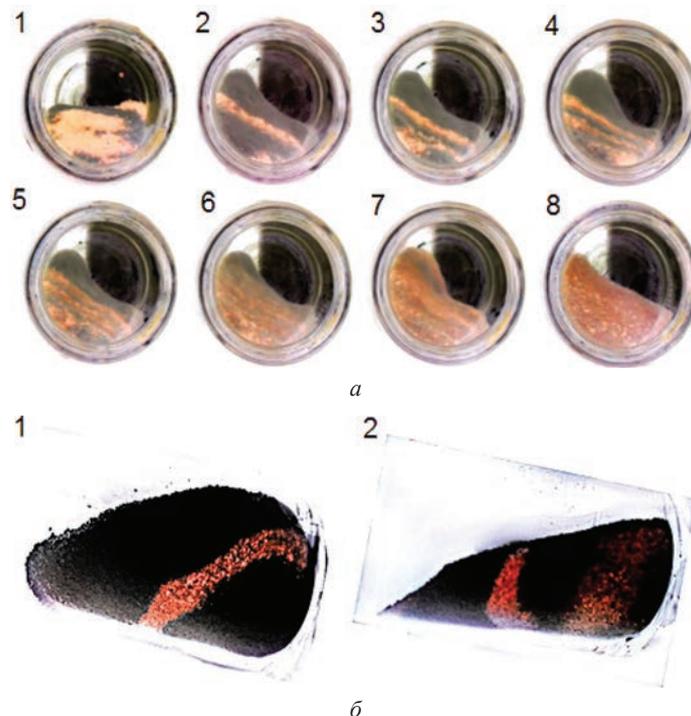


Рис. 6. Перемещение нагретого слоя в имитационной модели РНП: *а* – фронтальные снимки положения слоя (*1* – исходное положение, прогрев верхний слой материала, вращение не началось; *2* – положение прогретого слоя в процессе вращения – 3/4 оборота; *3* – положение слоя через 1,5 оборота; *4–3* оборота; *5–5* оборотов; *6–7* оборотов; *7–9* оборотов; *8* – вращение остановлено через 10 оборотов, прогретый слой равномерно распределился в общем объеме материала); *б* – боковые снимки материала (*1* – через 1 оборот после начала вращения; *2* – через 3 оборота после начала вращения имитационной емкости)

### Выводы

Впервые с помощью имитационной модели выполнено комплексное исследование движения дисперсного материала в РНП с наклонной осью вращения. Установлено, что материал в таких печах совершает сложное винтовое возвратно-поступательное движение, при этом скорость «вращения» слоя более чем в 3 раза превышает скорость вращения самой печи. Такой характер движения материала в РНП и петлеобразное движение газового потока значительно ускоряют происходящие в печи теплообменные процессы и повышают термический к. п. д. агрегата до 45–50%.

Полученные закономерности и разработанные технические решения подтвердились на практике и были использованы при модернизации действующих и внедрении новых ротационных печей.

### Литература

1. Дьяконов О. М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
2. Куронов И. Ф., Савчук Н. А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. М.: Черметинформация, 2002. 198 с.
3. Ровин С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
4. Лисиенко В. Г., Щелокоев Я. М., Ладыгичев М. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление, экология. М.: Теплотехник, 2004. 554 с.
5. Шмитц К. Роторно-поворотная барабанная печь: современная технология в производстве вторичного алюминия // Металлургическое производство и технология металлургических процессов. 2006. № 1. С. 30–41.

### References

1. D j a k o n o v O. M. *Kompleksnaja pererabotka struzhki i metallosoderzhashih shlamov* [Complex treatment of metal chips and metallurgical sludge]. Minsk, Technologija Publ., 2012, 262 p.
2. K u r u n o v I. F., S a v t u k N. A. *Sostojanie i perspective bezdomennoj metallurgiji zheleza* [Current state and outlook of direct process metallurgy]. Moscow, Chernetinformacija Publ., 2002, 198 p.
3. R o v i n S. L. *Recycling metalloothodov v rotacionnih pechah* [Recycling of metal wastes in rotary furnaces]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
4. L i s i e n k o V. G., S c h e l o k o v Y a. M., L a d y g i c h e v M. G. *Vraschayuschiesya pechi: teploteknika, upravlenie, ekologiya* [Rotary furnaces: heat engeneering, management, ecology]. Moscow, Teploteknik Publ., 2004, 554 p.
5. S h m i t z K. *Rotorno-povorotnaja barabannaja pech: sovremennaja tehnologija v proizvodstve vtorichnogo aljuminija*. [Tilting rotary furnace: a modern technology in the production of secondary aluminium]. *Metallyrgicheskoe proizvodstwo i Technologiy metallyrgicheskijh protsessow = Metallurgical Plant and Technology*, 2006, no. 1, pp. 30–41.