

In the article there are analyzed the different ways of thermal treatment and melting of polydisperse materials and there are presented the developed by authors original coaxial-cylinder furnace settings, allowing to increase considerably the efficiency and productivity of technological process.

С. Л. РОВИН, УП «Технолит»,
Л. Е. РОВИН, О. М. ВАЛИЦКАЯ, ГГТУ им. П. О. Сухого

УДК 621.745

ПЕЧИ РОТАЦИОННОГО НАГРЕВА

Процессы тепловой обработки дисперсных и особенно полидисперсных материалов имеют существенные отличия от нагрева твердых сплошных тел, например, заготовок, что затрудняет расчеты режимов и снижает эффективность работы печей, в том числе их термический к.п.д.

Так, теплопроводность слоя $\lambda_{\text{ст}}$ зависит не только от материала компонентов, но и от их укладки, порозности слоя и др., величина $\lambda_{\text{ст}}$ на несколько порядков ниже λ компонентов и изменяется в процессе нагрева (охлаждения). Тепловая энергия внутрь слоя передается не только теплопроводностью, но и конвекцией. Последняя зависит от режима движения газов сквозь слой и размеров компонентов.

Таким образом, использование известных решений уравнения Фурье с граничными условиями I–IV рода при расчете нагрева слоя дисперсных материалов является некорректным.

Наиболее простые случаи – нагрев (охлаждение) неподвижного непродуваемого слоя сыпучих веществ и плотного продуваемого слоя кусковых материалов. Первый имеет место в камерных печах, зернистых фильтрах, сушилах и др., второй – в шахтных печах, установках подогрева шихты и т.п. По результатам натурных измерений в слое $\text{grad}t > 5 \cdot 10^3 \text{ К/м}$, а $\text{Bi} >> 0,5$.

Представив уравнение теплообмена в виде

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{d}{c\rho} \left(\lambda_{\text{ст}} \frac{dt}{dx^2} \right), \quad (1)$$

где c – теплоемкость материала; ρ – плотность материала, и дополнив его эмпирической зависимостью $\lambda_{\text{ст}} = f(t, m)$, можно рассчитать время нагрева слоя для конкретных условий работы.

Несколько возрастает трудоемкость расчетов при высокой влажности материалов. Теплопроводность влажного материала ($\lambda_{\text{ст}}$) близка к λ воды. В процессе сушки наружные слои быстро теряют влагу и $\lambda_{\text{ст}}$ резко снижается (до $\sim 0,01$), при этом перед движущимся температурным фронтом в слое влажность возрастает, а затем снижается пропорционально нагреву.

В общем случае процесс нагрева слоя описывается параболой степени n , зависящей от $\lambda_{\text{ст}}$:

$$\Theta = \Theta_1 - \Theta_2 \left(1 - \frac{x}{S} \right)^n + \Theta_2, \quad (2)$$

где Θ , Θ_1 , Θ_2 – относительные температуры: текущая, начальная слоя и начальная теплоносителя; $n = f(\lambda_{\text{ст}}) \approx 2,5$.

Нагрев кусковых материалов в продуваемом слое может быть сведен к модернизированному уравнению Фурье. Распространение тепла в слое здесь определяется не столько теплопроводностью компонентов и слоя в целом, сколько конвекцией (внутренняя задача). Если уравнение нестационарной теплопроводности представить в виде

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{(\alpha d_3)}{c\rho} \frac{d^2 t}{dx^2}, \quad (3)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена; d_3 – эквивалентный размер каналов (пор), то его можно использовать при расчетах теплообмена в газозвеси или кипящем слое, но в этих случаях d_3 – приведенный размер частиц (внешняя задача).

Нагрев взвешенных частиц происходит с очень большой скоростью, объемный коэффициент конвективного теплообмена здесь $\alpha_v \approx 10^3 \text{ кВт/(м}^3 \cdot \text{К)}$ против $\alpha_v < 0,3 \text{ кВт/(м}^3 \cdot \text{К)}$ в слое того же материала (частицы диаметром 0,2–5,0 мм, $\rho = (0,8–1,2) \times 10^3 \text{ кг/м}^3$). Соответственно резко сокращается время нагрева и повышается термический к.п.д. Однако нагревать в псевдооживленном слое можно лишь монодисперсные материалы. При термической обработке материалов, состоящих из частиц с различной скоростью витания, некоторые из них будут уноситься из печи, а другие осаждаться и накапливаться на днище.

Способ нагрева в барабанных вращающихся печах сочетает слоевой и конвективный принцип нагрева и имеет характеристики значительно лучшие, чем при стационарном нагреве, например, термический к.п.д. около 30%. Однако эта эффективность достигается в основном за счет увеличения длительности пребывания материала в рабочей зоне и соответственно увеличения габаритов

установки. Динамическое перемешивание и дробление слоя в цилиндрическом барабане происходит с малой скоростью, а поток газов практически не участвует в дроблении комков, так как скорость газов не может превышать скорость витания частиц во избежание укоса.

Улучшение параметров процесса термической обработки полидисперсных материалов достигается в новых печах ротационного типа, разработанных специалистами ГГТУ им. П.О.Сухого и УП «Технолит». На рис. 1 представлена схема такой установки. Вращение корпуса ротационной установки, состоящего из двух конусов, приводит к более интенсивному перемешиванию материала, а вращающийся поток теплоносителя способствует динамическому дроблению комков.

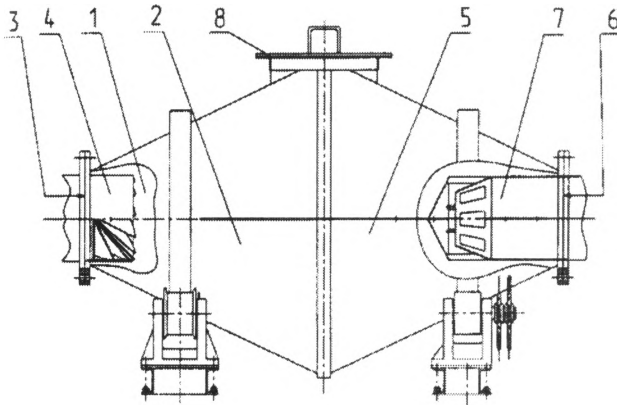


Рис. 1. Схема ротационной печи (пат. РБ 1424) для термической обработки дисперсных материалов: 1 – входной диффузор; 2 – опорный обод; 3 – подвижное фланцевое соединение; 4 – лопастной завихритель; 5 – выходной конфузор; 6 – подвижное фланцевое соединение; 7 – сепаратор; 8 – люк для загрузки (выгрузки) материала

Скорость вращательного движения потока газов выбирается из условия

$$\omega = \left(\frac{gD}{Fr_{кр}} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

где D – характерный размер комков; $Fr_{кр}$ – критическое число Фруда ($Fr_{кр} = 4-5$ для данных условий).

Частицы материала при этом совершают так называемое «разрозненное движение», что характеризует параметр β :

$$\beta = 0,6 \left(\frac{G_T}{G_Y} \right)^{0,49} \left(\frac{L}{D} \right)^{0,4},$$

где G_T , G_Y – расход частиц в условиях плотного слоя и в реальном режиме; L , D – соответственно толщина слоя и диаметр барабана.

Конвективный теплообмен характеризуется эмпирической зависимостью

$$Nu_n = 1109\beta^{1,12}.$$

Практически вращательная скорость потока составляет 12–15 м/с, а поступательная вдоль оси печи не более 1–3 м/с, что даже ниже, чем в барабанных печах.

Ротационная печь на выходе имеет специальное устройство для сепарации взвешенных частиц, что в сочетании с циклонным эффектом приводит к удержанию в рабочем пространстве высокодисперсных фракций нагреваемых материалов. В таких печах перепад температур по сечению слоя ($grad t$) практически сводится к нулю, а эффективность теплообмена приближается к установкам, работающим по схеме псевдооживленного слоя.

В марте 2004 г. был получен патент на представленную выше ротационную установку (пат. РБ 1424 от 01.03.2004 г.), а уже в июне по заказу ООО «Эрни» она была изготовлена в металле (рис. 2) и в сентябре введена в эксплуатацию для сушки и термообработки оксидно-сульфатного шлама, получаемого при утилизации отработанных аккумуляторов.

Для плавки цветных сплавов (алюминиевых, цинковых, свинцовых и др.) при использовании в шихте дисперсных материалов (шлама, стружки, разногабаритного лома и т. д.) разработана качающаяся установка (рис. 3). Для увеличения времени контакта и соответственно эффективности использования тепла продуктов горения ввод и вывод газов производится с торца печи. Загрузка шихты и выпуск шлака и металла происходят при отведении крышки на 90°C . Печь может работать на газообразном и жидком топливе.

Исследования режимов течения газов и теплообмена в рабочем пространстве печи позволили выбрать оптимальные соотношения диаметра, длины и углов наклона печи, а также окружной скорости вращения корпуса при подогреве шихты. Кроме того, были рассчитаны и проверены скорости и углы ввода продуктов горения (рис. 4). Установка печи на консольном основании позволяет не только наклонять печь при загрузке–

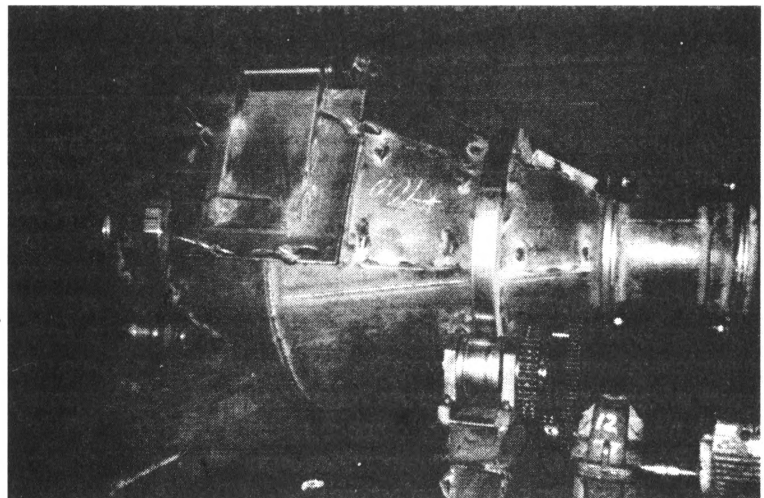
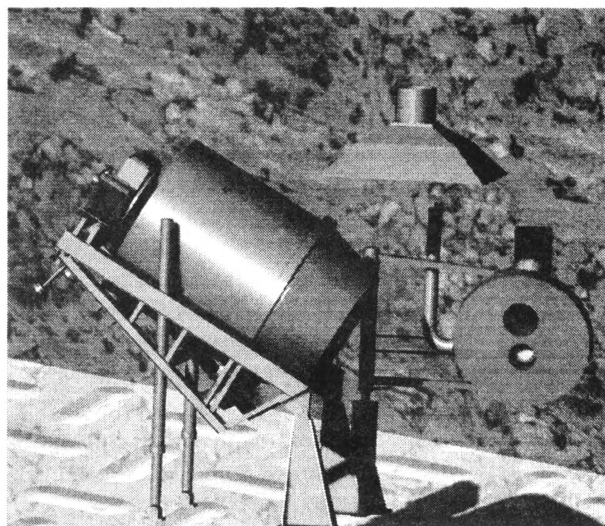
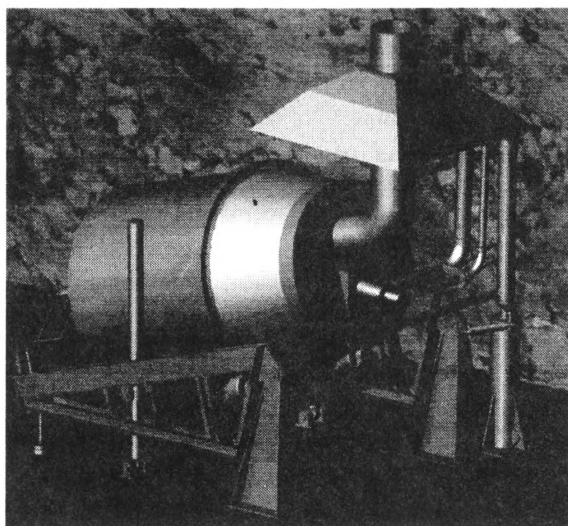


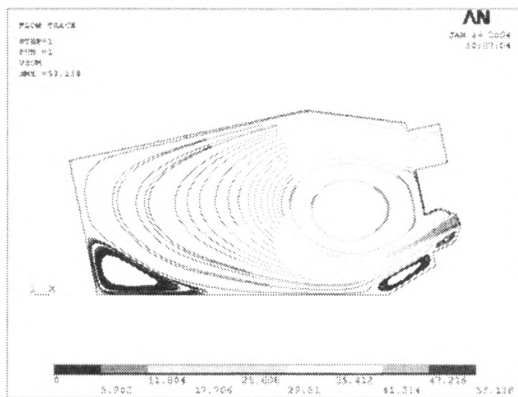
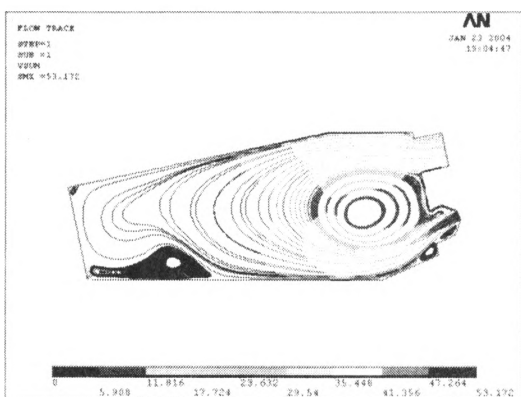
Рис. 2. Общий вид ротационной установки



a

б

Рис. 3. Качающаяся ротационная плавильная печь: *a* – в рабочем положении; *б* – в положении выгрузки (слива) металла



a

б

Рис. 4. Схема потоков горячих газов в рабочем пространстве печи: *a* – при соотношении $\frac{D}{L} = 0,43$ и $\alpha = 5^\circ$; *б* – $\frac{D}{L} = 0,64$ и $\alpha = 25^\circ$ (угол ввода газов)

выгрузке, но и осуществить качение в продольном направлении для динамического разрушения слоя при нагреве.

Ротационная качающаяся печь обеспечивает сокращение цикла плавки примерно вдвое по сравнению с проходной барабанной печью и на 20% уменьшение затрат топлива. Дополнительного эффекта можно достичь используя рекуператор на отходящих газах. Разработанный для данной печи трубчатый конвективный рекуператор позволяет подогреть воздух, подаваемый в горелки, до 300°C и обеспечивает снижение удельного расхода топлива на 20–25%.

Печь имеет гидравлический привод для наклона и электропривод для вращения, оснащается системами аспирации газов, КИПиА.

На сегодняшний день специалистами УП «Технолит» БНТУ и ГГТУ им. П.О.Сухого разработан целый размерный ряд печей такого класса для плавки цветных сплавов с производительностью от 0,5 до 5,0 т расплава/ч. Первый рабочий проект ротационной качающейся печи для плавки чернового свинца из аккумуляторного лома производительностью 2,5 т/ч (емкость печи 5 т по оксидно-сульфатному шламу) уже выполнен по заказу российских производителей свинца.

Разработанные печи ротационного нагрева с успехом могут быть использованы для плавки, сушки и термообработки полидисперсных материалов не только в литейном производстве, но и в химической промышленности, горноперерабатывающих отраслях, в производстве строительных материалов и т. д.