



It is shown that rotary furnaces and drying ovens are a perspective type of furnaces, allowing to solve a number of problems in conditions of flexible production and strong resources economy.

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

УДК 621.745

РОТАЦИОННЫЕ ПЕЧИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ И СУШКИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тепловую обработку полидисперсных материалов осуществляют как при статическом состоянии слоя, так и в динамических условиях. Первый вариант характерен для камерных печей, зернистых фильтров, шахтных печей, установок подогрева шихты и т.д.; второй — для установок с псевдооживленным слоем, барабанных вращающихся печей, сушил и т.д.

Нагрев неподвижного, непродуваемого, свободно насыпанного слоя происходит очень медленно, так как отсутствует передача тепла конвекцией, а теплопроводность сухого пористого слоя очень низкая (менее $0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). В случае сушки влажного слоя его теплопроводность близка к теплопроводности воды (более $0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). Однако наружные слои, быстро нагреваясь, теряют влагу и при этом резко снижается отвод тепла внутрь слоя. Если нагрев осуществляется продувкой газом-теплоносителем плотного слоя кусковых материалов, то основную роль в теплообмене играет более интенсивный способ — передача тепла конвекцией. Однако и в этом случае процесс недостаточно эффективен, так как во многом зависит от количества и характера пор внутри плотного слоя и соотношения их размеров с размером поверхности продуваемых кусков. Эти параметры меняются от загрузки к загрузке. Кроме того, нагрев продуваемого слоя со скоростями большими $1 \text{ м}/\text{с}$ неприемлем для высокодисперсных материалов из-за высокого пылеуноса.

Нагрев взвешенных частиц в кипящем слое или пневмопотоке — наиболее эффективный способ. Частицы при этих условиях практически моментально нагреваются; время нагрева частиц диаметром около 1 мм менее $0,4 \text{ с}$. Объемный коэффициент конвективного теплообмена на несколько порядков выше в сравнении с продува-

емым слоем. Но такой способ неприемлем для полидисперсных материалов, имеющих большой разброс в геометрических размерах, конфигурации, плотности и адгезионных свойствах частиц. Частицы образуют комки (слипаются), часть витает в установке на заданном уровне, наиболее крупные остаются на днище неподвижным слоем, а высокодисперсная часть уносится потоком газов. Наиболее приемлемый способ термообработки полидисперсных материалов реализован в барабанных вращающихся печах. Свободно насыпанный в рабочую камеру полидисперсный материал образует динамический слой. В процессе вращения установки наружный слой материала (обращенный к теплоносителю) быстро нагревается и одновременно за счет подъема и обрушения перемешивается с нижними холодными слоями. С каждым последующим оборотом печи увеличивается объем прогреваемого слоя. Теплообмен при этом происходит как между теплоносителем и соприкасающимся с ним слоем материала, так и при перемешивании самого материала. При этом определенную роль играет и теплообмен внутреннего слоя материала с нагретой поверхностью камеры. Однако эффективность такого способа нагрева также невысокая из-за низкой скорости теплоносителя и высокой адгезионной способности влажного материала, что препятствует интенсивному дроблению комков. Скорость потока теплоносителя, пропускаемого через печь, ограничена ($1\text{--}5 \text{ м}/\text{с}$) и не может превышать скорость витания частиц во избежание уноса частиц из печи с выходящим потоком. Невысокая скорость и прямолинейный характер движения потока теплоносителя параллельно движению материала вдоль камеры от места загрузки к месту выгрузки практически не позволяют ему участвовать в

динамическом воздействии на материал. Повышение термического к.п.д. вращающихся печей достигается в основном увеличением времени пребывания материала в печи за счет увеличения длины печи. При переходе к гибким малотоннажным производствам становится нерентабельно использовать оборудование большой мощности, а короткобарабанные печи имеют к.п.д. на уровне 10–15%.

Добиться высокой эффективности тепловой обработки разнородных дисперсных материалов можно, если создать условия, близкие к теплообмену в псевдоожиженном слое. Материал должен интенсивно перемешиваться, рассыпаться на мелкие части, газовый поток должен интенсивно омывать поверхность практически всех частиц, составляющих объем материала. Такого эффекта можно добиться, нагревая материал во вращающейся камере с ротационным движением (вращательным и поступательным) потока.

С целью обеспечения эффективной тепловой обработки и сушки полидисперсных материалов вне зависимости от объемов и соотношения параметров, в том числе размеров и плотности частиц, специалистами УП «Технолит» и УО ГГТУ им. П.О.Сухого разработаны новые печи ротационного типа (рис. 1–3). Они позволяют реализовать преимущества нагрева в динамических слоях. Конструкции установок защищены патентами РБ №1424 от 01.03.2004, №1732 от 15.09.2004, №2428 от 05.06.2005, №2770 от 05.09.2005. Некоторые особенности тепловой обработки дисперсных и полидисперсных материалов изложены в [1, 2]. Максимальная интенсивность термической обработки полидисперсных материалов обеспечивается взаимодействием сложного механического перемещения материала и аэродинамического воздействия потока теплоносителя. Емкость печей от 0,5 до 5,0 т, мощность привода от 2,5 до 30 кВт. Режим работы может быть периодическим и непрерывным.

Отличительная особенность конструкций таких печей – возможность создания вращающегося потока теплоносителя в камере. Направление вращения потока может совпадать с вращением камеры или быть противоположным. Скорость вращения достигает 30 м/с при поступательной скорости потока вдоль оси печи 1–3 м/с. Поток теплоносителя активно участвует в тепломассообмене и диспергировании материала. Кроме того, вращение потока обеспечивает значительно большее время теплообмена материала с агентом по сравнению с цилиндрическими барабанами. Ка-



Рис. 1. Ротационное сушило емкостью 0,5 т в процессе промышленных испытаний (пат. РБ № 1424)

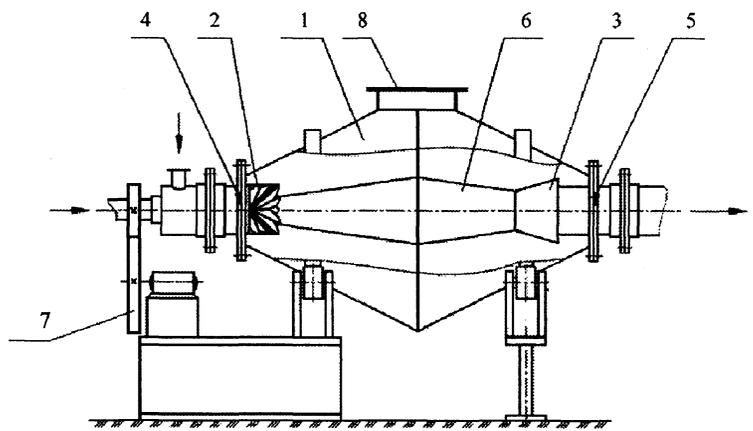


Рис. 2. Ротационное двухкорпусное сушило: 1 – корпус сушила; 2 – завихритель; 3 – сепаратор; 4, 5 – уплотнители; 6 – корпус разделителя потоков газов; 7 – привод; 8 – загрузочное окно (пат. РБ № 1732)

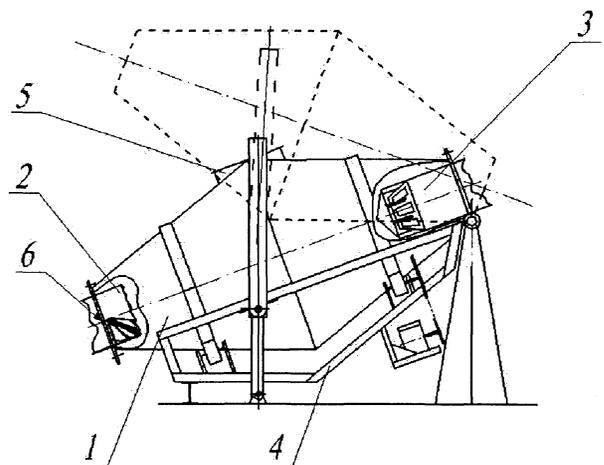


Рис. 3. Качающееся сушило: 1 – корпус; 2 – завихритель; 3 – сепаратор; 4 – подвижная качающаяся рама; 5 – загрузочное окно; 6 – разъемное соединение; 7 – привод (пат. РБ № 2428):

ры имеют конические секции, которые расширяют диапазон режимов работы слоя, и решают задачу отделения от потока газа частичек пыли на выходе из камеры. В выходной секции печи – конфузоре скорость вращения потока возрастает

пропорционально углу сходимости конфузора, соответственно увеличиваются центробежные силы, прижимающие мельчайшие частички материала к стенкам камеры, где они осаждаются и удерживаются. На выходе из камеры поток проходит через устройство для дополнительной сепарации пыли. В печах предусмотрено устройство для разделения потока теплоносителя, что обеспечивает его проход в камере (через устройство состоящее из двух конусов) непрерывно, на любых стадиях ее работы (рис. 2). Это увеличивает площадь теплообмена нагретой поверхности камеры с соприкасающимися частицами материала, обеспечивает равномерный теплообмен по всему объему камеры, дополнительно усиливает эффект дробления комков. При этом не требуется дополнительное время на прогрев печи до рабочего режима. Неподвижное закрепление позволяет беспрепятственно работать устройству для закручивания потока и устройству для сепарации пыли. Данное расположение устройства, разделяющего поток газа, его форма дают возможность выполнить оптимальную конструкцию установки для интенсивной термообработки материала.

Печи могут наклоняться и качаться (рис. 3). Качание камеры разрушает слой материала, который образуется в нижней части корпуса из наиболее крупных комков, и в котором замедляются процессы теплообмена, снижающие общую эффективность термообработки материала. Вращение камеры с ее одновременным качанием создает условия для непрерывного равномерного перемешивания материала. Представленная модель имеет возможность отвода в сторону завихрителя, что позволяет производить загрузку-выгрузку материала без остановки вращения сушила. Установки могут быть использованы для сушки, нагрева, охлаждения, обжига и плавки различных полидисперсных материалов.

Были проведены испытания ротационного сушила в промышленных условиях. Использовали следующие режимы: а) неподвижное (статическое) состояние; б) вращение корпуса при поступательном движении газового потока (без прокрутки); в) неподвижный корпус и вращательное движение потока газов; г) реверсивное вращательное движение корпуса и вращательное движение потока (ротационный режим). Различные режимы работы печи и изменение исходных параметров теплоносителя позволили получить сравнительные данные по эффективности ротационного способа тепловой обработки и сушки полидисперсного материала по отношению к способам, реализованным в барабанных и камерных печах. Эффективность работы оценивалась по разности температур газов на входе и выходе (рис. 4), по изменению температуры нагреваемого слоя (за период 12–15 мин) при равной массе загрузки и постоянном расходе газа (рис. 5). Затем

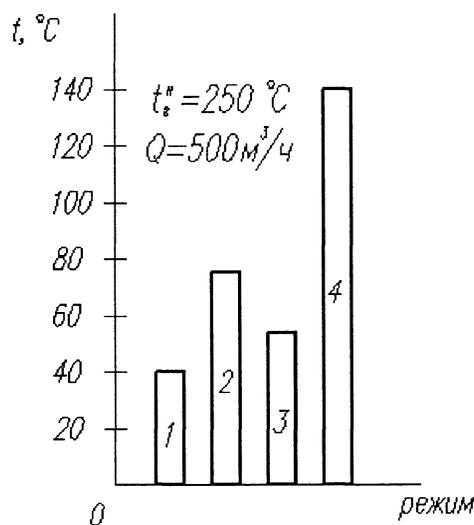


Рис. 4. Снижение температуры отходящих газов в процессе тепловой обработки (3–5 мин). Режимы нагрева: 1 – неподвижный слой; 2 – вращение корпуса, газовый поток не вращается; 3 – вращение газового потока, корпус неподвижен; 4 – ротационный режим; t_r^* – температура газов на входе, °C

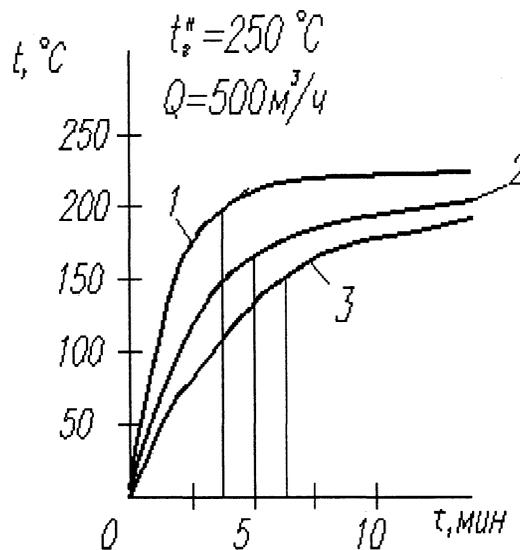


Рис. 5. Изменение температуры нагреваемого слоя. Режимы нагрева: 1 – ротационный режим; 2 – вращение корпуса; 3 – неподвижный слой

рассчитывали тепловой баланс и определяли термический к.п.д. (рис. 6). Потери тепла в окружающую среду оставались постоянными, температура кожуха печи колебалась в пределах 80–100 °C, коэффициент внешней теплоотдачи составлял 2–4 Вт/(м²·К). В тепловом балансе доля потерь через стенки не превышала 10–15% (в нефутерованных установках).

Из приведенных данных следует, что скорость нагрева высушиваемого материала при ротационном режиме значительно выше, чем при других условиях. Время перехода к регулируемому режиму, когда скорость падения температуры практи-

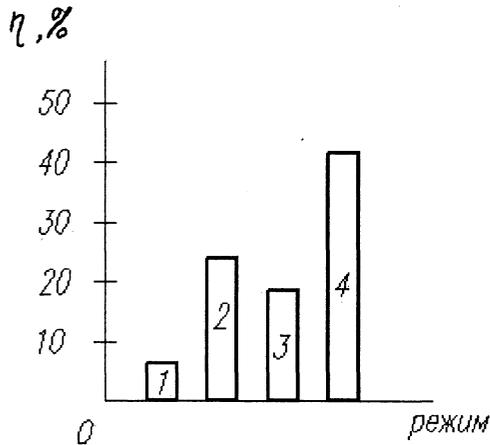


Рис. 6. Эффективность теплообмена при сушке дисперсного материала. Режимы нагрева: 1 – неподвижный слой; 2 – вращение корпуса; 3 – вращение потока, корпус неподвижен; 4 – ротационный режим. η – термический к.п.д. установок

чески снижается до нуля ($\frac{dt}{d\tau}=0$), при ротационном режиме составляет около 3 мин (см. рис. 5), в то время, как при режимах неподвижного слоя и вращении корпуса с поступательным движением потока газов ($w=1-5$ м/с), регулируемый режим не наступает за период 10–15 мин.

Повышение термического к.п.д. приблизительно до 40% контролировалось по косвенному показателю – температуре газов на выходе в первые 3–5 мин. Усредненные за 5–10 завалок данные показали, что в этот наиболее энергоемкий период температура газа наиболее резко

снижается при ротационном режиме: 140 °С против 40 °С при неподвижном слое.

Эффективность процесса сушки объясняется созданием в данных моделях условий для высокой степени диспергирования слоя – отношение текущего диаметра комков (агрегатов частиц) к начальному диаметру пропорционально квадрату

скорости потока ($\frac{d_{тек}}{d_{ном}} \sim \omega^2$); условий для интенсификации конвективного теплообмена, что также связано со скоростью потока газа ($\alpha_k \sim \omega^{0,8}$) и резкого увеличения площади контакта при переносе тепла. Скорость массообмена за счет ротационного режима также возрастает на порядок ($\omega_{рот}^* \gg \omega_{пост}^*$).

Сушила имеют габаритные размеры в 3–4 раза меньшие, чем барабанные при одинаковой производительности. Ротационные печи и сушила представляют собой перспективный тип печей, позволяющий решить ряд проблем в условиях гибкого производства и жесткой экономии ресурсов.

Литература

1. Ровин Л.Е., Валицкая О.М., Ровин С.Л. Интенсификация тепловой обработки дисперсных материалов // *Литье и металлургия*. 2003. №3. С. 97–98.
2. Ровин Л.Е., Валицкая О.М., Ровин С.Л. Печи ротационного нагрева // *Литье и металлургия*. 2004. №4. С. 84–86.