УДК 621.365.5

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В РЕАКТОРАХ КИПЯЩЕГО СЛОЯ

А.А. Хайдурова, Н.С. Камленок

Иркутский государственный технический университет E-mail: alexandra h@bk.ru

Представлена методика бесконтактного внесения тепловой энергии в реактор кипящего слоя с помощью электромагнитного поля. Изучен процесс индукционного нагрева инертных электропроводящих частиц, помещённых в реактор и служащих дополнительным источником тепловой энергии. Проведены исследования процесса теплообмена в установке кипящего слоя, проанализировано влияние контролируемых параметров на КПД процесса, и установлены зависимости интенсификации процесса сушки от изменяемых параметров. Результаты работы показали, что данная методика характеризуется высокой плотностью энергии и быстрым нагревом, а также высоким КПД процесса, достигающим значений выше 75 %. Методика отличается доступностью и простотой исполнения, обеспечивает возможность ее применения в различных отраслях промышленности. Экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения индукционного нагрева в предложенной технологии сушки.

Ключевые слова:

Сушка, индукционный нагрев, кипящий слой, коэффициент полезного действия.

Во многих технологических процессах для обеспечения интенсивного тепло-массообмена используются установки с кипящим слоем. Одной из областей их применения является сушка в инертном кипящем слое, где используется поверхность инертных частиц для сушки дисперсных материалов, суспензий, кеков (фильтрационных осадков) или растворов [1]. Высушиваемый материал вводится в сушильную камеру через специальные форсунки и распределяется тонким слоем по поверхности инертных частиц. Подвод тепловой энергии, как правило, происходит путём подачи нагретого потока газа, проходящего через слои частиц. Таким образом, речь идет о конвекционной сушке, т. к. поверхность инертных частиц является только материалом для переноса влажного продукта. При достижении материалом определенной температуры начинается отделение высушиваемого продукта от поверхности инертных частиц. Этот процесс интенсифицируется также за счёт трения частиц друг о друга, что сравнимо с обычной шаровой мельницей. Пройдя данный процесс измельчения, высушиваемый материал становится достаточно мелкодисперсным для того, чтобы быть выведенным потоком газа из камеры кипящего слоя. Дальнейшее отделение более крупных частиц из потока происходит, как правило, в подключённом к камере циклонном сепараторе. Полученный продукт является гомогенным порошком с одинаковым размером частичек.

Индукционный нагрев инертных частичек в кипящем слое позволяет улучшить и расширить возможности существующей технологии. При этом носителем тепловой энергии является не восходящий поток газа, а сами инертные частицы. Энергия электромагнитного поля передается токопроводящим частицам, что приводит к их индукционному нагреву. Поэтому в данном случае речь идет не только о конвективной, но и о контактной сушке, которая, как правило, обладает более высоким КПД [2].

Преимуществом данного метода внесения энергии является простота управления подаваемой мощностью путём регулировки подведённого электрического напряжения. Также при использовании индукционного нагрева исключаются потери теплоты в теплопроводящих каналах [3]. Существующие ограничения для температуры входящего газа могут быть устранены путём подбора оптимального соотношения мощности и количества высушиваемого материала, при котором обеспечивается максимальная производительность. Таким образом, отсутствует зависимость процесса нагрева материала от восходящего газового потока. Кроме того, электромагнитная индукция дает возможность быстрого нагрева токопроводящих материалов, что позволяет сократить затраты времени для достижения системой необходимых условий [3-5].

В данной работе исследован процесс введения электромагнитной энергии в кипяший слой с целью изучения параметров, оказывающих влияние на изменение КПД процесса. Проведен ряд экспериментов по нагреву и охлаждению инертных токопроводящих частиц, которые проводились на специально созданной лабораторной установке (рис. 1). Установка состоит из стальной трубы – 1 длиной 1500 мм и внутренним диаметром 146 мм. Нижняя часть установки (распределитель потока газа) изготовлена из листовой стали с равносторонним треугольным распределением отверстий диаметром 1 мм. Для индукционного нагрева кипящего слоя в реакторе в области введения электромагнитного поля использовалось боросиликатное стекло с расположенными на нём витками электромагнитной катушки – 3. Установка подсоединена к насосу, подключенному к вентилятору – 4, с помощью которого воздух с определенной, регулируемой скоростью всасывается в камеру через входное отверстие – 5. После прохождения через реактор воздух попадает в циклон -6 и через фильтр – 7 выводится в окружающую среду. Таким образом, обрабатываемый материал находится в области пониженного давления.



Рис. 1. Схема установки для создания кипящего слоя с применением индукционного нагрева

Индукционный нагрев осуществлялся за счет высокочастотного (ВЧ) генератора и электромагнитной катушки (5 витков) с водяным охлаждением. Максимальная мощность генератора составляла 40 кВт. Частота колебаний лежала в области между 30 и 75 кГц и зависела от числа витков катушки. Электромагнитное поле, создаваемое катушкой индуктивности, наводит вихревые токи в токопроводящих шариках, и за счет электрического сопротивления происходит нагрев инертных частиц. При контакте инертных частиц друг с другом происходит теплопередача от частицы к частице. Благодаря конвективному теплообмену также нагревается воздух в установке.

Измерение температуры воздуха проводилось при помощи термоэлементов, установленных в четырех различных точках по высоте реактора, что позволило измерить распределение температуры вдоль восходящего потока. Перепад давления в установке регистрировался сенсором давления. Учет измерений производился с интервалом в 2 секунды.

В качестве инертных частичек использовались полые железные шарики различного диаметра, покрытые слоем каолина, который служит электрическим изолятором и предотвращает протекание токов между частицами. Доля каолина по отношению к общей массе находится в пределах от 20 до 30 мас. % .

Эксперименты проводились для трех различных навесок, трех скоростей восходящего потока воздуха и трех уровней мощности. Для экспериментов исследовали шарики диаметром 3,2 мм с навесками 600, 1000, 1400 г и диаметрами 6,0 и 6,8 мм, причем масса шариков с диаметрами 6,0 и 6,8 мм была выбрана так, чтобы соблюдалось равенство объема (V_p) или поверхностной площади шариков (A_p) в сравнении с массами для диаметра 3,2 мм.

Помещенные в установку шарики определенного диаметра и массы под воздействием восходящего потока воздуха находились в зависающем состоянии. Фаза нагрева длилась 30 мин, после чего следовала фаза охлаждения, которая составляла также 30 мин. Данная методика применялась для всех вариаций параметров эксперимента. На рис. 2 представлены графики зависимости роста температуры (T) от времени (t): а) для различных значений мощности индуктивного излучения (Р=2, 4 и 8 кВт) и б) для различных диаметров шариков (d) при мощности индуктивного излучения *P*=4 кВт и скорости потока воздуха
 $\varpi\!=\!4\omega_{\min}$, где ω_{\min} – скорость начала псевдоожижения. Из графика (рис. 2, а) видно, что чем больше мощность индукционного нагрева, тем выше температура. Из-за опасности перегрева материала установки при мощности 8 кВт нагрев осуществлялся только в течение 10 мин. Поэтому имеется разрыв на верхней диаграмме. График (рис. 2, б) показывает, что для шариков диаметром 3,2 и 6,0 мм с различной массой навески температура возрастает одинаково и достигает практически равных значений.

Расчет температуры воздуха на выходе из установки для каждого ряда экспериментов проведен с помощью модели кипящего слоя для различных граничных условий [6]:

$$T_{\rm ra3, Bbix, MOD, end} = K_1 \cdot T_{\rm p} + K_2 \cdot T_{\rm ct} + K_3, \qquad (1)$$

где T_{p} – температура частиц, К; T_{cr} – температура стенок реактора, К;



Рис. 2. Зависимость температуры шариков от времени нагрева: а) для различных значений мощности индуктивного излучения (*P*=2, 4 и 8 кВт); б) для различных диаметров шариков при *P*=4 кВт и ω=4ω_{min}



Рис. 3. Зависимость КПД от объема шариков при различных значениях числа псевдоожижения, ω/ω_{min} : a) 3; б) 4; в) 2

$$\begin{split} K_1 = \frac{NTU_{\rm p}}{1 + NTU_{\rm p} + NTU_{\rm cr}}, \quad K_2 = \frac{NTU_{\rm cr}}{1 + NTU_{\rm p} + NTU_{\rm cr}}, \\ K_3 = \frac{T_{\rm ras.bx}}{1 + NTU_{\rm p} + NTU_{\rm cr}}, \end{split}$$

где NTU (number of transfer units) – безразмерный параметр, определяемый как число единиц переноса теплоты;

$$NTU_{\rm p} = \frac{\alpha_{\rm p}A_{\rm p}}{M_{\rm ras}C_{\rm pras}}; \ NTU_{\rm cr} = \frac{\alpha_{\rm cr}A_{\rm cr}}{M_{\rm ras}C_{\rm pras}}$$

где $\alpha_{\rm p}$ – коэффициент теплоотдачи (воздух–частица), Вт/м²·К; $A_{\rm p}$ – площадь поверхности частиц, м²; $\alpha_{\rm cr}$ – коэффициент теплоотдачи (частица–стенка), Вт/м²·К; $A_{\rm cr}$ – площадь поверхности стенок реактора, м²; $M_{\rm ras}$ – массовый расход газа, кг/с; С_{Р.в.} – удельная массовая теплоёмкость газа, Дж/кг·К.

В соответствии с полученными значениями был посчитан КПД процесса индукционного нагрева кипящего слоя, учитывающий такие потери энергии, как нагрев шариков при соударении между собой, а также о стенку установки; передачу теплоты от нагревшегося воздуха в установке к ее стенкам; передачу теплоты от стенок установки в окружающую среду.

$$\eta = \frac{T_{\text{газ,вых}} - T_{\text{газ,вх}}}{T_{\text{газ,вых,модель}} - T_{\text{газ,вх}}} \times 100\%,$$
 (2)

где $T_{\text{газ, вых}}$ – измеренная температура газа на выходе из реактора, К; $T_{\text{газ, вх}}$ – измеренная температура газа на входе в реактор, К.

По результатам проведенных исследований были построены зависимости среднего значения КПД от объема шариков при различных значениях числа псевдоожижения ω/ω_{\min} . Измеренные величины скорости начала псевдоожижения для шариков диаметрами 3,2, 6,0 и 6,8 мм равны соответственно 0,68, 1,12 и 1,35 м/с. Также было рассчитано отклонение значения КПД от средней величины (рис. 3, *a*-*b*).

Как видно из диаграмм, для диаметра 3,2 мм КПД значительно ниже и составляет 60...70 % при всех значениях общего объема шариков. Для диаметров 6,0 и 6,8 мм КПД достигает 78 %.

На точечной диаграмме (рис. 4) представлены зависимости КПД от общей массы шариков и от общей площади шариков для всех исследуемых диаметров, скоростей восходящего потока воздуха и мощностей.

Из диаграммы (а) наглядно видно, чем больше масса шариков, т. е. чем больше материала загружено в установку, тем выше КПД процесса. Диаграмма (б) показывает, что КПД достигает максимальных значений для диаметра 3,2 мм при площади поверхностей шариков между 3,0 и 4,0 м², а для диаметров 6,0 и 6,8 мм между 1,0 и 2,0 м².

На рис. 5, *а* приведена зависимость КПД от исследуемых диаметров шариков при различных значениях плотности энергии для всех исследуемых скоростей восходящего потока воздуха и мощностей, а также показано отклонение от среднего значения величины КПД. Плотность энергии (ρ_{sel}) показывает распределение электромагнитного поля по общему объему частиц и вычисляется по формуле: $\rho_{sel} = P/V_p$, кВт/л, где P – мощность электромагнитного поля, кВт; V_p – общий объем частиц, л. Из диаграммы видно, что КПД больше для наименьшей плотности энергии и для шариков большего диаметра (6,0 и 6,8 мм).

Зависимость КПД от числа псевдоожижения для всех исследуемых диаметров шариков при различных значениях плотности энергии, а также отклонение от среднего значения величины КПД представлены на рис. 5, б. Как видно из диаграммы, с уменьшением плотности энергии и понижением числа псевдоожижения, КПД процесса увеличивается.

Из приведенных выше диаграмм можно сделать вывод, что при расчете модели кипящего слоя с индукционным нагревом КПД процесса сушки в кипящем слое с индукционным нагревом равен 74 ± 5 %. Проведенные исследования и расчеты показывают, что электрическое сопротивление шариков большего диаметра выше, что обуславливает высокую плотность вихревых токов, наведённых приложенным электромагнитным полем. Это и объясняет большее количество теплоты, которая выделяется в процессе индукционного нагрева шариков большего диаметра.

Установлено, что при одинаковых условиях проведения эксперимента: при увеличении мощности индукционного нагрева температура газа в реакторе возрастает; при увеличении расхода воздуха температура газа в реакторе уменьшается;



Рис. 4. Зависимость КПД от различных параметров шариков: а) от общей массы; б) от общей площади



Рис. 5. Зависимость КПД от: а) диаметров шариков; б) числа псевдоожижения

при увеличении массы материала температура газа в реакторе возрастает.

Выводы

Детальное изучение процесса индукционного нагрева материала в кипящем слое и установленные зависимости эффективности метода от различных условий процесса (скорости восходящего потока, времени нагрева, мощности электомагнитной индукции, массы навески) показали, что введение электромагнитной энергии в реактор кипя-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 2 / под общ. ред. Г.М. Островского. – СПб.: Профессионал, 2006. – 916 с.
- Kemp I.C. Energy analysis of dryers and its practical application // Proc. of the 17th Int. Drying Symposium. - Magdeburg, 2010. - P. 805-813.
- Rudolph M., Schaefer H. Elektrothermische Verfahren. Berlin: Springer-Verlag, 1989. – 247 S.
- Осипов Ю.Р., Рожин С.П., Осипов С.Ю., Кутовой К.В. Разработка математической модели процесса тепломассообмена при

щего слоя позволяет значительно интенсифицировать тепломассообменные процессы при сушке материала. Достигнутый в данной работе КПД процесса составил приблизительно 75 %. Таким образом, исследования показали, что данный комбинированный способ является одним из эффективных методов сушки материалов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1508.

индукционной сушке клеевого покрытия на непроницаемой ферромагнитной подложке // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2009. – № 1. – С. 99–106.

- Данилов Н.И., Щелоков Я.М. Основы энергосбережения / под ред. Н.И. Данилова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.
- Heinrich S. Modellierung des Waerme- und Stoffueberganges sowie der Partikelpopulationen bei der Wirbelschicht-Spruehgranulation. – Duesseldorf: VDI-Verlag, 2001. – 239 S.

Поступила 25.04.2013 г.

UDC 621.365.5

EFFICIENCY OF APPLYING INDUCTIVE HEATING IN FLUIDIZED BED REACTOR

A.A. Khaydurova, N.S. Kamlenok

Irkutsk State Technical University

The paper introduces the technique of contactless introduction of thermal energy into fluidized bed reactor by electromagnetic field. The authors have studied induction heating of inert conducting particles placing into reactor and being the additional thermal energy source. Heat exchange process in fluidized bed device was studied; the effect of control parameters on the process efficiency was analyzed; the dependences of drying intensification on the variable parameters were determined. The results of the work showed that the technique is characterized by high energy density and flash heat as well as the process high efficiency achieving the value more than 75 %. The technique is notable for availability and design simplicity; it can be applied in various branches of industry. The experiments proved the efficiency of applying induction heating in the proposed drying technique.

Key words:

Drying, inductive heating, fluidized bed, efficiency.

REFERENCES

- 1. Ostrovskogo G.M. Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy (New directory of the chemist and technologist. Processes and devices of chemical technologies. P. 2). Saint Petersburg, Professional, 2006. 916 p.
- Kemp I.C. Energy analysis of dryers and its practical application. Proc. of the 17th Int. Drying Symposium. Magdeburg, 2010. pp. 805-813.
- 3. Rudolph M., Schaefer H. *Thermoelectrical method* (Elektrothermische Verfahren). Berlin, Springer-Verlag, 1989. 247 p.
- Osipov Yu.R., Rozhin S.P., Osipov S.Yu., Kutovoy K.V. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta, 2009. 1, pp. 99–106.
- Danilov N.I., Shchelokov Ya.M. Osnovy energosberezheniya (Energy saving ground). Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2006. 564 p.
- Heinrich S. Modeling of the heat and mass transfer as well as particle population in fluidized bed spray granulation (Modellierung des Waerme- und Stoffueberganges sowie der Partikelpopulationen bei der Wirbelschicht-Spruehgranulation). Duesseldorf, VDI-Verlag, 2001. 239 p.

УДК 621.181:519.876

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРА КРУТКИ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОПКЕ КОТЛА БК3-420-140

А.В. Гиль, А.С. Заворин, А.В. Старченко*, С.В. Обухов**

Томский политехнический университет *Томский государственный университет **Омский филиал ОАО «ТГК-11» E-mail: AndGil@tpu.ru

На основе численного исследования проведен анализ термогазодинамических процессов в топочной камере котла БКЗ-420-140 при различных параметрах крутки топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха. В работе использован Эйлерово−Лагранжев способ описания аэротермохимических процессов в газодисперсных средах, турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «k-ε» модели турбулентности с учетом влияния движущихся частиц. Приведены графические результаты в различных сечениях распространения факелов по ширине топочной камеры, показывающие формирование структуры факела с учетом наличия дисперсной фазы, ее воспламенения и выгорания. Выполнен анализ влияния параметра крутки на образование рециркуляционных внутренних и внешних зон и их термическое воздействие на границы раскручивающегося факела. Получены эффективные значения параметра крутки для сжигания выскозольных экибастузских углей.

Ключевые слова:

Топочная камера, горелочное устройство, параметр крутки, газодинамика, температура, горение угля.

В отечественной энергетике крупные котельные агрегаты используют в основном факельное (камерное) сжигание полифракционного пылеугольного топлива с применением различных видов горелочных устройств и их компоновок. Выбор горелок и схемы сжигания, а вместе с ними и типа топочной камеры, определяется теплотехническими характеристиками проектного топлива из условия его рационального использования.

Специфика теплотехнических свойств угля Экибастузского бассейна состоит в сочетании взрывобезопасности, малой сернистности, хорошей сыпучести и низкой влажности с высокой зольностью, которая составляет в среднем