

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук,

А.А. БЕРЕЗНЯК, канд. техн. наук,

Е.А. БЕРЕЗНЯК

(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ "Национальный горный университет")

НАПРАВЛЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Процесс сушки характеризуется двумя периодами. Первому периоду сушки присуще линейное изменение влажности материала во времени. Это обусловлено тем, что влага, испаряющаяся с поверхности, непрерывно заменяется новой, поступающей из внутренних слоев. При этом давление пара жидкости на поверхности пористого материала, температура которой обычно равна температуре внутренних слоев и остается постоянной, равно давлению насыщения при данных условиях. Следовательно, во время этого периода происходит испарение жидкости фактически со свободной поверхности. Его скорость определяется такими внешними факторами, как температура, относительная скорость движения и влагосодержание сушильного агента.

В изотермических условиях процесс испарения влаги со свободной поверхности выражается законом Дальтона [1]:

$$\frac{dQ}{dt} = kF \frac{p_H - p_{II}}{p_B}, \quad (1)$$

где Q – масса испарившейся жидкости; t – время; k – коэффициент пропорциональности; F – площадь поверхности испарения материала; p_H – давление насыщенного пара на поверхности при соответствующей температуре; p_{II} – парциальное давление пара в окружающей среде; p_B – барометрическое давление в окружающей среде.

При уменьшении влажности материала наступает момент, когда скорость переноса влаги к поверхности оказывается недостаточной, чтобы обеспечить прежнюю скорость испарения с поверхности, вследствие чего скорость сушки начинает падать и зависимость влажности от времени становится нелинейной. Влажность, соответствующая этому моменту, называется критической, является величиной непостоянной, даже для одного материала, и зависит от режима сушки.

Начинается второй период сушки, в котором наблюдается снижение ее скорости. В этих условиях скорость сушки определяется скоростью перемещения жидкой и газообразной фаз внутри материала и зависит, главным образом, от структуры материала. Внутри тела продолжается перенос влаги по порам за счет капиллярных сил в виде жидкости до зоны испарения, а затем в виде пара, диффундирующего через сухие слои материала.

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Перемещение влаги внутри материала в общем случае может быть выражено дифференциальным уравнением:

$$\frac{dQ}{dt} = K_w \nabla W + K_T \nabla T + K_p \nabla p, \quad (2)$$

где W , T , p – градиенты влажности, температуры и давления соответственно; K_w , K_T , K_p – удельные коэффициенты переноса под действием соответствующих градиентов.

Процесс сушки продолжается до тех пор, пока влажность материала при определенных условиях не достигнет равновесного значения, после чего процесс прекращается.

Из рассмотренного механизма процесса сушки вытекают следующие способы ее интенсификации.

В течение первого периода, как это видно из закона Дальтона, ускорение сушки материалов может быть достигнуто следующими способами:

- увеличением разности насыщенного и парциального давления пара;
- снижением барометрического давления в окружающей среде;
- увеличением площади поверхности испарения;
- увеличением коэффициента пропорциональности, величина которого обратнопропорционально зависит от толщины пограничного диффузионного слоя.

Увеличение разности давлений пара может быть достигнуто увеличением температуры сушильного агента и снижением его относительной влажности, а некоторое увеличение площади поверхности испарения обеспечивается перемешиванием материала, что и осуществляется при традиционных способах сушки, например, в барабанной сушилке.

Уменьшение барометрического давления окружающей атмосферы соответствует вакуумной сушке.

Коэффициент пропорциональности тем больше, чем выше скорость относительного движения поверхности испарения и сушильного агента вследствие уменьшения толщины пограничного слоя над поверхностью испарения, определяемого уравнением:

$$\delta_g = \frac{l}{\sqrt{Pe}} = \sqrt{\frac{D \cdot l}{u}}, \quad (3)$$

где δ_g – толщина диффузионного пограничного слоя; l – характерный размер; Pe – число Пекле; D – коэффициент диффузии; u – скорость потока.

Поэтому, как правило, процесс сушки проводят при обдувании сушимого материала потоком нагретого сушильного агента, что характерно для конвективной сушки. Однако при сушке мелкодисперсных материалов увеличение скорости ограничено тем, что при больших скоростях воздуха начинается унос частиц.

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Оригинальный способ сушки, основанный на использовании методов электрогидродинамики сильноточных разрядов в различных средах, предложен в [2].

Базовым элементом нетрадиционных сушилок служит электровзрывной модуль, который представляет собой малогабаритную камеру специальной формы, в газовой среде которой с помощью импульсного генератора тока формируется плазменный шнур, создающий динамические эффекты. Конструктивно-технологические особенности камеры, выбор режима формирования электроразрядного плазменного шнура позволяют получать импульсный гидродинамический поток сухого воздуха в форме плоской струи с высоким динамическим давлением, которая взаимодействует с высушиваемым материалом. Характерная особенность нетрадиционного метода формирования плоской воздушной струи заключается в том, что создающий динамическое давление плазменный шнур в камере электровзрывного модуля формируется в режиме тлеющего разряда в среде воздуха высокого давления, который подается в камеру от ресивера компрессора. В зависимости от давления воздуха, подаваемого от компрессора в камеру электровзрывного модуля, от величины тока импульсного разряда в пределах от 100 до 400 мА, крутизны переднего фронта импульса электроразряда микросекундной длительности можно формировать плоские воздушные динамические струи, скорость потока воздуха в которых может достигать от 50 до 150 м/с при ширине струи в пределах от 50 до 100 мм.

При сушке материала в поле акустических или ультразвуковых колебаний высокой интенсивности возможно существенное уменьшение величины диффузионного пограничного слоя. Толщина гидродинамического пограничного слоя определяется числом Рейнольдса:

$$\delta_r = \frac{1}{\sqrt{\text{Re}}} = \sqrt{\frac{\nu \cdot l}{u}}, \quad (4)$$

коэффициент кинематической вязкости.

В акустическом поле толщина гидродинамического пограничного слоя δ_r зависит от частоты звука ω :

$$\delta_r = \sqrt{\frac{2 \cdot \nu}{\omega}}. \quad (5)$$

При обдувании тела потоком газа толщина гидродинамического и диффузионного пограничных слоев приблизительно одинаковы. В акустическом поле гидродинамический пограничный слой может быть существенно меньше диффузионного. Это значит, что звуковые колебания проникают внутрь диффузионного слоя, турбулизируют его и тем самым ускоряют процесс испарения.

Процесс акустической сушки в течение первого периода определяется в основном скоростью акустических течений, возникающих у поверхности обрабатываемого материала. Особенностью этих течений является малая толщина

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

пограничного слоя, в результате чего они значительно эффективнее обеспечивают влагоперенос по сравнению с обычным воздушным потоком. В этот период наиболее эффективными являются низкочастотные акустические колебания.

Во второй период процесс интенсифицируется в результате нагрева, обусловленного поглощением звука в порах и капиллярах материала, радиус которых больше толщины пограничного слоя. При сушке материала в слое возможен нагрев обрабатываемого продукта на 20-40 °С в зависимости от уровня звукового давления. В этом случае наиболее эффективными являются ультразвуковые акустические колебания высокой частоты. Кроме того, акустические колебания проникают в материал и создают в нем быстро сменяющиеся зоны повышенного и разреженного давления.

Скорость акустической сушки тем выше, чем выше интенсивность ультразвукового воздействия на высушиваемый материал, однако к.п.д. ультразвуковых излучателей не высок и, следовательно, наращивание интенсивности за счет увеличения мощности излучателя снижает экономический эффект способа. Существует нижняя граница интенсивности акустических колебаний (порядка 140-150 Дб), при которой происходит резкая интенсификация процесса сушки в акустическом поле.

Наиболее эффективна акустическая сушка для тонких слоев материала порядка 2-20 см. Скорость акустической сушки, по сравнению с известными и используемыми на практике способами сушки, выше в 2-5 раз.

Из уравнения влагопереноса (2) следует, что интенсифицировать процесс сушки во время второго периода можно, увеличивая градиенты влажности, температуры и давления. Градиент влажности обеспечивается наиболее быстрым удалением влаги с поверхности за счет подвода необходимого количества сушильного агента и нагрева поверхности, что осуществляется при традиционных способах сушки. Увеличить скорость нагрева поверхности можно, например, электромагнитным излучением инфракрасного диапазона. Однако при этом получаем отрицательные градиенты давления и температуры, что препятствует влагопереносу от внутренних слоев материала к внешним.

Положительный градиент температуры можно получить, селективно нагревая внутренние слои материала электромагнитными волнами радиодиапазона, но предпочтительнее использовать микроволновую энергию, так как молекулы воды поглощают ее более эффективно. Этот эффект реализуется при СВЧ сушке. Особенно целесообразно применение электромагнитных волн в случае, когда сушимый материал является радиопрозрачным, т.е. не поглощает электромагнитную энергию в данном диапазоне частот. В этом случае под воздействием микроволновой энергии нагревается только вода, а твердая фаза нагревается только за счет теплопроводности. При достаточной удельной мощности излучения происходит вскипание воды внутри пор, что приводит к появлению положительного градиента давления, значительно интенсифицирующего процесс сушки.

Аналогичный результат можно получить, нагревая внутренние слои материала за счет джоулева тепла, выделяемого при пропускании электрического тока. В большинстве случаев твердая фаза неэлектропроводна, а капиллярная

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

влага представляє собою електропровідний розчин солей. В разі застосування постійного струму можна додатково збільшити швидкість направленої волопереноса за рахунок явища електроосмоса. По порівнянню з СВЧ сушкою даний спосіб проигрує за рахунок необхідності застосування для підводу струму спеціальних електродів, що не завжди можна здійснити.

Іншим способом збільшення градієнта тиску є імпульсне вакуумування висушуваного матеріалу до тиску, меншого тиску насиченого пари води в порах при даній температурі [3]. При цьому відбувається кипіння води і витіснення вологи на поверхню сушеного матеріалу в формі рідини, минувши фазовий перехід в пар.

Спільне застосування розглянутих способів дозволяє не тільки збільшити швидкість сушки, але і зменшити удільні витрати енергії. Наприклад, в роботі [4] показано, що перспективним є спосіб одночасного підводу теплової і мікрохвильової енергії до об'єкта сушки. При збільшенні швидкості сушки майже в шість раз удільні витрати енергії зменшилися в 2,7 рази.

Таким чином, комбінування відомих способів інтенсифікації процесів сушки дозволяє значно збільшити її швидкість при зниженні енерговитрат. Представляє інтерес збільшення градієнта тиску в імпульсному режимі при частоті повторення імпульсів, відповідних акустичному діапазону.

Список літератури

1. **Борисов Ю.Я., Гынкина Н.М.** Акустическая сушка. – В кн. Физические основы ультразвуковой технологии. Физика и техника мощного ультразвука. Книга 3. / Под ред. **Л.Д. Розенберга.** – М.: Наука, 1970. – С. 579-641.
2. **Алейников И. Яковлев М.** Электровзрывная сушка // Пищевая промышленность. – 2002. – №12. – С. 48-49.
3. Конвективно-вакуум-импульсная сушка продуктов с/х производства. <http://akres.ru/>
4. **Пилов П.И., Буртовой Д.П., Березняк А.А., Хохла Д.Ю.** Экспериментальные результаты конвективно-микроволновой сушки коллективного концентрата Вольногорского ГГМК // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2004. – Вип. 20(61). – С. 120-123.

© Пилов П.И., Березняк А.А., Березняк Е.А., 2011

*Надійшла до редколегії 18.09.2011 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. І.К. Младецьким*