

Е. А. Шестаков, И. Е. Тимофеев, С. А. Шестаков,
А. А. Селиверстов

К ВОПРОСУ ВЫБОРА СУШИЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ХЛОРИДА КАЛИЯ

Ключевые слова: сушилка, взвешенный слой, хлорид калия.

Установлена зависимость начальной температуры сушильного агента от гидродинамических и тепловых параметров процесса сушки. Выполнено сравнение эффективности работы сушильных аппаратов для хлорида калия по отдельным показателям.

Keywords: dryer, blanket, potassium chloride.

It was established that there is a dependence of the drier agent's initial temperature from hydrodynamic and heat parameters of drying process. The effectiveness of work and designs of potassium chloride drying machines were compared according to different indicators.

При крупнотоннажном производстве хлорида калия с размерами частиц готового продукта 0,2÷1,0 мм, наиболее распространенными сушильными аппаратами, являются сушилки с псевдоожиженным слоем (ПС) и трубы-сушилки (ТС) [1]. Эффективность данных аппаратов достигается за счет их работы в активных гидродинамических режимах.

Основным параметром в работе сушилок ПС и ТС является скорость движения теплоносителя, определяющая гидродинамику и тепломассообмен двухфазного потока.

Несмотря на то, что сушилки ПС работают в диапазоне скоростей от скорости псевдоожижения до скорости близкой к скорости витания частиц среднего размера [2], а ТС при скоростях в 1,6÷2,5 раза превышающих скорость витания этих частиц [3], обмен теплом между потоками сушильного агента и материала осуществляется одним и тем же конвективным способом.

Исходя из математического описания теплового баланса процесса сушки, приведенного в [1], расход сушильного агента (L) в ходе процесса находится в прямой зависимости от количества испаренной влаги ($G_{\text{вл}}$)

$$L = \frac{G_{\text{вл}}}{x_2 - x_1}, \quad (1)$$

где x_1, x_2 – влагосодержание теплоносителя на входе и выходе из сушильного аппарата, соответственно.

Выражая расходную концентрацию материала (μ) через количество готового продукта (G_m) и расход теплоносителя с учетом изменения влажности материала и теплоносителя, получаем зависимость

$$\mu = \frac{G_m}{L} = \frac{(100 - \omega_n)}{(\omega_n - \omega_k)} \cdot (x_2 - x_1) = \frac{(x_2 - x_1)}{W_n}, \quad (2)$$

где ω_n, ω_k, W_n – начальная, конечная влажность и влагосодержание материала, соответственно.

Из этого уравнения следует, что расходная концентрация материала характеризует удаление влаги из материала и насыщение ей сушильного агента.

Рассматривая разность влагосодержаний теплоносителя в уравнении (2) в виде отношения разности энтальпий (I) сушильного агента к его сушильной способности по испаренной влаге (Δ)

$$x_2 - x_1 = \frac{I_2 - I_1}{\Delta}, \quad (3)$$

и считая процесс сушки изобарным, уравнение (3) преобразуется к виду

$$x_2 - x_1 = \frac{(c_\tau + x_1 \cdot c_n)}{(r_n + c_n \cdot t_2 - \Delta)} \cdot (t_1 - t_2), \quad (4)$$

где $c_\tau, c_n, r_n, t_1, t_2$ – удельные теплоемкости теплоносителя и водяного пара, удельная теплота парообразования воды, начальная и конечная температура сушильного агента, соответственно.

Подставляя (4) в правую часть (2), получаем выражение

$$\mu = \frac{(c_\tau + x_1 \cdot c_n)}{W_n \cdot (r_n + c_n \cdot t_2 - \Delta)} \cdot (t_1 - t_2). \quad (5)$$

Сушильная способность теплоносителя по испаренной влаге (Δ) определяется удельными затратами тепла на: нагрев материала, испарение влаги, потери тепла в окружающую среду

$$\Delta = c_{\text{вл}} \cdot \theta_1 - (1 + \eta) \cdot \frac{c_m \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{W_n} - \eta \cdot r_n - \eta \cdot c_n \cdot (\theta_2 - \theta_1), \quad (6)$$

где $c_{\text{вл}}, c_m, \eta, \theta_1, \theta_2$ – удельные теплоемкости влаги и высушиваемого материала, коэффициент потерь теплоты в окружающую среду, начальная и конечная температура высушиваемого материала, соответственно.

Для установившегося процесса сушки, рассматривая уравнения (5) и (6) в виде единой системы, первый множитель правой части уравнения (5) можно считать некоторым коэффициентом (A), тогда уравнение (5) принимает вид

$$\mu = A \cdot (t_1 - t_2), \quad (7)$$

$$\text{где } A = \frac{(c_\tau + x_1 \cdot c_n)}{W_n \cdot (r_n + c_n \cdot t_2 - \Delta)}.$$

Таким образом, концентрация материала отражает тепловые характеристики процесса сушки.

Из уравнения (7)

$$t_1 = \frac{1}{A} \cdot \mu + t_2. \quad (8)$$

Согласно (8), при уменьшении расходной концентрации материала, при одних и тех же условиях, требуются меньшие начальные температуры

сушильного агента, и, следовательно, эффективными сушильными аппаратами, с точки зрения тепловых нагрузок, можно считать аппараты, работающие с небольшими расходными концентрациями материала при любых нагрузках по готовому продукту.

Расходную концентрацию можно выразить как отношение объемных потоков материала (V) и теплоносителя (V_r) с определенными скоростями, т.е. через гидродинамические характеристики двухфазного потока

$$\mu = \frac{V \cdot \rho_{\text{ч}}}{V_r \cdot \rho_r} = \frac{(1-\varepsilon) \cdot v_{\text{ч}} \cdot S_{\text{ан}} \cdot \rho_{\text{ч}}}{v_r \cdot S_{\text{ан}} \cdot \rho_r} = \frac{(1-\varepsilon) \cdot v_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}}}{v_r \cdot \rho_r}, \quad (9)$$

где ε , $v_{\text{ч}}$, v_r , $\rho_{\text{ч}}$, ρ_r , $S_{\text{ан}}$ – порозность взвешенного слоя, скорость, плотность материала и теплоносителя, площадь живого сечения аппарата, соответственно.

Учитывая (7) и (9), получаем зависимость

$$A \cdot (t_1 - t_2) = \frac{(1-\varepsilon) \cdot v_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}}}{v_r \cdot \rho_r}. \quad (10)$$

Выражение (10) связывает основные тепловые и гидродинамические параметры процесса конвективной сушки.

Определяя из (10) t_1

$$t_1 = \frac{1}{A} \cdot \frac{(1-\varepsilon) \cdot v_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ч}}}{v_r \cdot \rho_r} + t_2 \quad (11)$$

можно показать, что начальная температура сушильного агента для обеспечения одних и тех же показателей процесса будет иметь меньшие значения с ростом относительной скорости движения частиц и газа, и порозности взвешенного слоя.

С другой стороны, при выборе аппарата требуется его оценка с точки зрения эффективности использования подведенного тепла.

В настоящее время нет единого подхода к этой оценке. К примеру, в [2] эффективность работы сушильных аппаратов определяется по коэффициенту использования теплоты (η)

$$\eta = \frac{t_1 - t_2}{t_1}, \quad (12)$$

в [3] – по доли неиспользованного тепла ($K_{\text{н.т}}$), выраженной как

$$K_{\text{н.т}} = \frac{t_2 - \theta_2}{t_1 - \theta_1}. \quad (13)$$

Из уравнений (12-13), следует, что при возрастании начальной температуры сушильного агента, при неизменности других температур коэффициент использования теплоты увеличивается, а доля неиспользованного тепла уменьшается.

Высоким значениям начальной температуры t_1 соответствует повышенная концентрация материала μ (8), которая реализуется за счет снижения относительной скорости движения частиц или порозности ε (9).

На предприятиях ОАО «Уралкалий», г. Березники, Пермский край, трубы-сушилки работают при начальной температуре теплоносителя 700÷800°C, а сушилки ПС 600°C. Из-за этого следует, что аппараты псевдоожиженного слоя находятся в менее теплонапряженных условиях и обладают более низким показателем использования подведенного тепла, чем ТС.

В пневматических ТС процесс перемещения материала осуществляется в режиме, близком к идеальному вытеснению. Отсутствие продольного и радиального перемешивания снижает эффективность процесса в ТС, а для достижения равных показателей по влаговсему с единицы объема, по сравнению с аппаратами ПС, требуется значительная высота этих аппаратов (10-12 м).

Основным недостатком этих аппаратов является налипание хлорида калия. В пневматических ТС – на внутренней поверхности трубы, напротив забрасывателя, в аппарате ПС – на решетке, из-за её деформации и изменения живого сечения. Однако для обоих аппаратов чаще всего причиной налипания является превышение регламентного значения начальной влажности материала.

Таким образом, с учетом указанных замечаний можно сделать вывод о том, что для сушки хлорида калия возможен иной аппарат, работающий в интервале граничных температур и концентраций, характерных аппаратам ПС и ТС, и в тоже время, конструкция которого занимала бы промежуточное положение между конструкциями рассматриваемых сушилок.

Литература

1. Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984 г. 320 с., ил.
2. Муштаев, В. И. Конструирование и расчет аппаратов с взвешенным слоем / В. И. Муштаев, А. С. Тимонин, В. Я. Лебедев; учебное пособие для вузов – М.: Химия, 1991 – 344 с., ил.
3. Тимофеев, И. Е. Особенности процесса сушки хлорида калия в пневматической трубе-сушилке: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08: защищена 03.02.09: утв. 15.05.09 / Тимофеев Иван Егорович. – Пермь, 2008. – 174 с.

© Е. А. Шестаков - ст. препод. каф. технологии и механизации производств, Березниковский филиал «Пермский национальный исслед. политехн. ун-тет», master180180@mail.ru; И. Е. Тимофеев - канд. техн. наук, доц. той же кафедры, tmp@bf.pstu.ac.ru; С. А. Шестаков – асс. той же кафедры, 37rec@mail.ru; А. А. Селиверстов - ст. препод. той же кафедры, seliverstovartem@yandex.ru.