

УДК 66.067.55

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПОЛУПРОДУКТОВ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ В ПЛОТНОМ, НЕПОДВИЖНОМ СЛОЕ ПРИ КОНДУКТИВНО-МИКРОВОЛНОВОМ СПОСОБЕ ПОДВОДА ТЕПЛА

© А.И. Леонтьева, Л.Н. Чемерчев, А.А. Клеников

Leontieva A.I., Chemerchov L.N., Klenikov A.A. Mathematical description of drying organic dyes semiproducts in the dense fixed layer at conductive and dielectric method of heat feeding. The drying method of semiproducts providing environmental and technological safety of the given substances dehydration process is suggested. The mathematical description of the proposed drying method is developed.

Концентрация целевого компонента в выпускных формах полупродуктов органических красителей определяется аппаратным оформлением и технологическими параметрами стадий синтеза, выделения и фильтрации и составляет для пастообразных веществ (Р – соль, Гамма – кислота) от 40 до 60 % масс, для сыпучих веществ (анилид ацетоуксусной кислоты, 1/4-толил-3-метил-5-пиразолон, ортоанид ацетоуксусной кислоты, фенил-3-метил-5-пиразолон) от 80 до 95 % масс. Дальнейшее увеличение концентрации возможно только за счет удаления влаги сушкой. Выбор метода сушки ограничивается пожаро-, взрывоопасностью, окислением, низкой температурой плавления этих веществ. Так, конвективные способы с интенсивным гидродинамическим режимом и в заторможенном виброаэрокипящем слое материала [1, 2] обеспечивают высокую концентрацию целевого вещества, однако не удовлетворяют требованиям пожаро-, взрывобезопасности и низкого энергопотребления. Применение традиционных для красителей и пигментов вакуум-ребковых сушилок и обезвоживание полупродуктов продувкой в фильтровальном оборудовании [3] требует больших энергозатрат на процесс, а следовательно, приводит к значительному возрастанию себестоимости. Возникает необходимость разработки нового или модернизации действующего оборудования по обезвоживанию полупродуктов органических красителей.

Одним из перспективных способов повышения концентрации полупродуктов органических красителей является обезвоживание в фильтровальном оборудовании при использовании кондуктивно-микроволнового способа подвода тепла. При этом возможно исключить из процесса сушильный агент как вещество, транспортирующее энергию и окислитель материала, и избежать загрязнения воздуха.

Применение кондуктивного нагрева слоя материала, а затем его обезвоживание испарением влаги при микроволновом подводе тепла для полупродуктов с низким конечным, после фильтрации, влагосодержанием (1/4-толил-3-метил-5-пиразолон, фенил-3-метил-5-пиразолон и др.) позволяет снизить затраты СВЧ-энергии более чем в 2 раза.

Рассмотрим математическое описание процесса микроволновой сушки неподвижного слоя материала при плоском фронте падения бегущей СВЧ-волны [4]. Физическая модель процесса представлена на рис. 1. Слой материала толщиной H находится на фильтровальной перегородке, через которую осуществляется отвод пара из слоя в окружающую среду (атмосфера насыщенного водяного пара). Тепломассобмен через верхнюю торцевую и боковые поверхности исключен условиями процесса. Избыточное давление под фильтровальной перегородкой равно нулю. Слой материала с диэлектрическими характеристиками $\text{tg}\delta$, ϵ' находится в поле электромагнитных волн.

Рассмотрим потоки диффузионного переноса влаги в материале. Они возникают в результате градиентов концентраций влаги, температур и давлений в слое материала ($\vec{j}_c = \vec{j}_c^{\text{конц}} + \vec{j}_c^{\text{тем}} + \vec{j}_c^{\text{давл}}$). Поскольку процесс сушки протекает в изотермических условиях, поток $\vec{j}_c^{\text{давл}}$ равен нулю. В силу низкой начальной влажности и отсутствия конденсации паров в ходе их переноса через слой материала, движение жидкой фазы за счет градиента давлений также полагаем

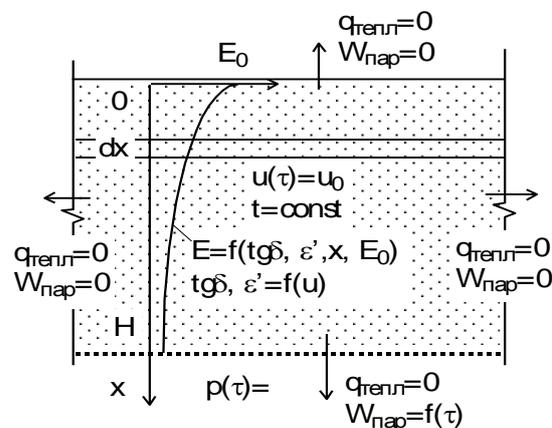


Рис. 1. Физическая модель процесса диэлектрической сушки

равной нулю ($\vec{j}_c = 0$). Таким образом, диффузионный перенос обусловлен только градиентом концентраций и равен $\vec{j}_c^{конц} = -D \cdot \text{grad } u$, где D – коэффициент диффузии. Значение $\text{grad } u$ в процессе диэлектрической сушки зависит от глубины проникновения электромагнитных волн в материал, в зоне которой наблюдается локальное изменение влагосодержаний. Для рассматриваемого класса веществ характерна значительная величина глубины проникновения (более 0,15 м). Учитывая малые начальные влагосодержания (около 0,11 кг/кг), можно сделать вывод о малой величине $\text{grad } u$. Поэтому влиянием внутренней диффузии влаги в материале при сушке данных полупродуктов пиразолонового ряда пренебрегаем. Таким образом, локальное изменение концентрации жидкой фазы обусловлено только ее фазовым превращением $\frac{\partial u}{\partial \tau} = -I_v$ [5].

Рассмотрим локальное изменение влагосодержания в слое материала толщиной dx с координатой x за время $d\tau$. Примем по элементарному слою материала сосредоточенные параметры влагосодержания, напряженности, диэлектрических характеристик. Убыль массы влаги в слое dx связана с изменением влагосодержания по следующему уравнению:

$$du = -\frac{dm_{вл}}{m_{сух}}, \quad (1)$$

где $m_{сух}$ – масса сухого материала слоя dx .

С другой стороны, убыль массы влаги связана с ее испарением из-за действия объемного источника тепла с удельной мощностью q_n

$$dm_{вл} = \frac{q_n \cdot V \cdot d\tau}{r}, \quad (2)$$

где V – объем слоя dx ; r – удельная теплота парообразования воды при 100° С.

Учитывая, что $m_{сух} = V \cdot \rho_{мат}$, где $\rho_{мат}$ – насыпная плотность сухого материала, уравнения (1, 2) можно записать в виде:

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{q_n(x)}{\rho_{мат} \cdot r}. \quad (3)$$

Удельная объемная мощность q_n является функцией напряженности E и диэлектрических характеристик материала (относительная диэлектрическая проницаемость – ϵ' , тангенс угла потерь – $\text{tg} \delta$)

$$q_n = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot \text{tg} \delta \cdot |E|^2, \quad (4)$$

где f – частота электромагнитного поля, ϵ_0 – универсальная диэлектрическая постоянная.

Напряженность электрического поля в слое dx :

$$E = E_0(\tau) \cdot e^{-\frac{x}{\Delta}}, \quad (5)$$

где $E_0(\tau)$ – напряженность электрического поля в материале на границе раздела сред.

Значение глубины проникновения электромагнитного поля в материал определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{C_{св}}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\epsilon'} \cdot f} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где $C_{св}$ – скорость света.

Диэлектрическая проницаемость слоя материала и тангенс угла потерь являются функциями этих же характеристик жидкой фазы и ее объемным содержанием в материале (для данного класса веществ):

$$\sqrt{\epsilon'} = \left(\sqrt{\epsilon'_{ж}} - 1 \right) \cdot u \cdot \left(\frac{\rho_{мат}}{\rho_{ж}} \right) + \sqrt{\epsilon'_{м}} \cdot \frac{\rho_{мат}}{\rho_{тв}} + \left(1 - \frac{\rho_{мат}}{\rho_{тв}} \right), \quad (7)$$

из условия снижения фактора потерь $\epsilon'' = \epsilon' \cdot \text{tg} \delta$ в материале прямо пропорционально снижению в объеме материала поглощающего компонента (влаги). Пренебрегая выделением тепла в остальных компонентах, получаем зависимость

$$\text{tg} \delta = \text{tg} \delta_{ж} \cdot u \cdot \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{ж0}} \right) \cdot \frac{\epsilon'_{ж}}{\epsilon'}, \quad (8)$$

где $\epsilon'_{ж}$ и $\text{tg} \delta_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь жидкой фазы материала; $\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы; $\rho_{ж0}$ – истинная плотность твердой фазы. Диэлектрические характеристики влаги изменяются в процессе сушки из-за роста концентраций примесей в ней содержащихся и являются функциями отношения начального и текущего влагосодержаний материала:

$$\epsilon'_{ж} = f\left(\frac{u_0}{u}\right), \quad (9)$$

$$\text{tg} \delta_{ж} = f\left(\frac{u_0}{u}\right). \quad (10)$$

Напряженность электрического поля в материале на границе раздела зависит от отражения (или прохождения) электромагнитной волны из-за несогласованности сред. Для рассматриваемого класса веществ

$$E_0 \approx E_{\text{в}} \cdot \left(\frac{2}{1 + \sqrt{\epsilon'_{\text{в}}}} \right), \quad \text{где } E_{\text{в}} - \text{напряженность электрического поля в воздухе при идеальном}$$

согласовании сред (отсутствие материала); $\varepsilon_{\text{га}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость влажного материала на границе раздела (является переменной величиной в процессе сушки).

Систему уравнений (3–10) необходимо дополнить начальным условием

$$u(x,0) = u_0. \quad (11)$$

Таким образом, система уравнений (3–11) является замкнутой и представляет собой математическое описание удаления влаги из слоя материала при изотермических условиях в поле бегущей СВЧ-волны.

Избыточное давление в слое материала обусловлено гидравлическим сопротивлением фильтрации потока пара. Массовая скорость потока пара зависит от удельного объема тепловыделения в слое материала. Рассмотрим дифференциал массовой скорости пара по высоте слоя материала. Он обусловлен увеличением массы пара, проходящей через сечение $x + dx$ по сравнению с сечением x , за счет испарения влаги в объеме материала между этими сечениями:

$$dW = \frac{dm}{S \cdot \tau}, \quad (12)$$

$$dm = \frac{q_n \cdot V \cdot \tau}{r}, \quad (13)$$

$$V = S \cdot dx, \quad (14)$$

в итоге можно записать:

$$\frac{dW}{dx} = \frac{q_n}{r}. \quad (15)$$

Дифференциальное уравнение (15) необходимо дополнить граничным условием отсутствия потока пара через верхнюю границу слоя:

$$W(0, \tau) = 0. \quad (16)$$

Для определения гидравлического сопротивления слоя потоку пара рассмотрим его движение через слой толщиной $L = f(x)$. В силу малых значений скоростей фильтрации пара через слой материала допустим ламинарный режим движения потока. С учетом вышесказанного, зависимость коэффициента сопротивления от режима фильтрации пара (формула Эргуна) [6] принимает вид:

$$\xi = \frac{133}{\text{Re}}. \quad (17)$$

Критерий Рейнольдса, выраженный через массовую скорость потока и механические характеристики сыпучей среды:

$$\text{Re} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Phi}{1-\varepsilon} \cdot \frac{W \cdot d}{\mu}, \quad (18)$$

где Φ – фактор формы частиц; ε – порозность слоя; d – эквивалентный диаметр частиц, μ – динамический коэффициент вязкости пара.

Коэффициент сопротивления слоя материала для сыпучей среды есть функция гидравлического сопротивления, параметров потока и характеристик сыпучей среды

$$\xi = \Delta p \cdot \frac{d}{L} \cdot \frac{2 \cdot \rho_{\text{пар}}}{W^2} \cdot \frac{2 \cdot \varepsilon^3 \cdot \Phi}{3 \cdot (1-\varepsilon)}. \quad (19)$$

Совместное решение уравнений (17–19) дает значение гидравлического сопротивления при фиксированных значениях толщины слоя фильтрации L и массовой скорости потока пара:

$$\Delta p = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2 \cdot \mu}{\rho_{\text{пар}} \cdot d^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot L \cdot W. \quad (20)$$

Полагая отсутствие под фильтровальной перегородкой избыточного давления

$$p(H, \tau) = 0, \quad (21)$$

гидравлическое сопротивление фильтрации пара через слой материала равно избыточному давлению в слое, т. е. $\Delta p = p_{\text{изб}}$.

Рассмотрим изменение избыточного давления по высоте слоя материала. Дифференциальные преобразования (20) приводят к:

$$\frac{\partial p}{\partial L} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2 \cdot \mu}{\rho_{\text{пар}} \cdot d^2 \cdot \varepsilon^3 \cdot \Phi} \left(L \cdot \frac{\partial W(L)}{\partial L} + W(L) \right), \quad (22)$$

$$L = H - x. \quad (23)$$

Система уравнений (3–11, 15–16, 21–23) представляет собой математическую модель микроволновой сушки в плотном неподвижном слое материала при нормальном падении плоской электромагнитной волны.

Для применения предлагаемой математической модели в инженерных расчетах ее необходимо дополнить зависимостями со следующими конструктивными и технологическими параметрами процесса (облучаемая площадь – S , мощность излучателя – $P_{\text{изл}}$, производительность по сухому продукту – Π , среднее влагосодержание материала – \bar{u} , текущее и среднее КПД использования СВЧ-излучения – $\eta(\tau)$ и $\bar{\eta}$).

Производительность по сухому продукту:

$$\Pi = \frac{H \cdot S}{\rho_{\text{сух}} \cdot \tau_{\text{сушки}}}. \quad (24)$$

Текущее значение КПД по СВЧ-энергии, с учетом отражения части мощности излучения на границе раздела воздуха и материала, рассчитываем из анализа поглощения СВЧ волны элементарными слоями тол-

щиной Δx по всей толщине слоя n (при рассмотрении толстых слоев материала можем пренебречь влиянием обратного отражения от нижней границы слоя)

$$\eta(\tau) = \left(1 - \prod_{i=1}^{H/\Delta x} e^{-2 \cdot \Delta x \frac{1}{\Delta(x)}} \right) \cdot \left(\frac{2}{1 + \sqrt{\varepsilon'(0, \tau)}} \right)^2 \cdot \sqrt{\varepsilon'(0, \tau)}, \quad (25)$$

среднее значение КПД по СВЧ-энергии

$$\bar{\eta} = \frac{1}{\tau_{\text{сушки}}} \int_0^{\tau_{\text{сушки}}} \eta(\tau) \cdot d\tau. \quad (26)$$

Среднее влагосодержание слоя материала

$$\bar{u} = \frac{1}{H} \int_0^H u \cdot dx. \quad (27)$$

Зависимость волновой мощности излучателя от площади облучения S и напряженности $E_{\text{воз}}$ дает величина вектора Пойнтинга, показывающего плотность потока мощности излучения, среднее значение которого равно

$$|\bar{P}| = \frac{P_{\text{изл}}}{S} = \frac{C_{\text{св}} \cdot \varepsilon_0}{2} \cdot E_{\text{воз}}^2. \quad (28)$$

Установочная мощность излучателя зависит от его типа, величины волновой мощности и определяется КПД, лежащим в диапазоне от 0,5 до 0,8.

Расчет технологических или конструктивных параметров процесса сушки (время, толщина слоя материала, напряженность электромагнитного поля, мощность СВЧ-излучателя и доля использования СВЧ-энергии и др.) по математической модели (3–11, 15, 16, 21–23, 24–28) возможно осуществить зонным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Брянкин К.В., Леонтьева А.И., Чернов А.А., Соболева С.В.* Кинетика процесса сушки полупродуктов органических красителей на инертных телах // Проблемы химии и химической технологии: Сб. докл. 6 региональной науч.-технич. конф. Воронеж, 1998. Т. 3. С. 19-26
2. *Чупрунов С.Ю., Брянкин К.В., Соболева С.В., Иванова М.А.* Особенности процесса сушки полупродуктов органических красителей в заторможенном виброкипящем слое // МКХТ – 98: Тез. докл. 12 междунар. конф. молодых ученых по химии и химической технологии. М., 1998.
3. *Чемерчев Л.Н., Леонтьева А.И., Брянкин К.В., Фелелов П.А., Чупрунов С.Ю.* Подсушка паст полупродуктов органических красителей с использованием фильтрующих центрифуг // Теория и практика фильтрования: Сб. науч. тр. междунар. конф. Иваново, 1998. С. 75-76.
4. *Пионер Г.* Нагрев энергией сверхвысоких частот. М.: Энергия, 1968. 312 с.
5. *Лыков А.В.* Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
6. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.

Поступила в редакцию 15 сентября 2000 г.