

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МАССООБМЕНА ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКЕ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ В ПЕРЕМЕННОМ ПОТОКЕ

Изложены результаты исследований по определению влагоотдачи при активных гидродинамических режимах сушки высоковлажного сырья. Определены коэффициенты диффузии и массоотдачи. Описаны процессы массопереноса при использовании переменного потока

Ключевые слова: распылительная сушка, уравнение массообмена, коэффициент диффузии.

Процессы сушки широко используются во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства. Почти в каждом производстве сушка является одной из важнейших стадий технологического процесса, от правильной организации которого зависит не только сохранность материалов, но и улучшение качества получаемой продукции.

Основные положения кинетики процесса сушки были впервые сформулированы русскими учеными П.С. Коссовичем и А.В. Лыковым применительно к испарению влаги из почвы. В дальнейшем вопросами сушки занимались Ю.Л. Кавказов - экспериментально доказал, что в процессе сорбции при нормальном барометрическом давлении влагой заполняются только микрокапилляры, Г.К. Филоненко рассматривал вопросы кинетики сушки в потоке воздуха, пронизывающем материал, И.М. Федоров – процессы нагревания и сушки материалов в среде перегретого пара и др.

Развитие теории распылительной сушки в большой степени связано с исследованиями: Г.Н. Абрамовича – разработал теорию турбулентных струй, М.С. Белопольского – занимался вопросами распылительной сушки керамических изделий, Ю.В. Космодемьянского, М.В. Лыкова, В.Д. Харитонов, А.П. Фокина – работы посвящены исследованию технологических процессов пищевых производств, в частности процессов сушки молока и молочных продуктов, Р.М. Мальшева, В.Г. Никитина, Ю.И. Дыгнерского, А.Н. Плановского рассматривали теории распылительной сушки в химической промышленности, основные отличия и аппаратурное оформление, а так же Пажи Д.Г. – механизм распыления и процессы происходящие с каплей в момент отрыва, У.Гаувина, Ф. Глукера, У.Маршалла, Э.Шлюдера – за рубежом.[1]

Анализ научно-технической литературы по вопросу распылительной сушки высоковлажных продуктов с сохранением их биологической ценности показывает, что выбор режимов сушки материалов различной природы основывается на изучении физико-химических и биофизических свойствах объектов сушки, а так же на понимании механизма воздействия температуры на качественные показатели системы.

Основное внимание при интенсификации конвективной сушки уделяется совершенствованию способа перемещения и перемешивания продукта с сушильным агентом, выбору оптимальных значений температуры газа и его скорости, размера частиц и удельной нагрузки на газораспределительную решетку. Интенсифицировать процесс распылительной сушки возможно путем изменения характера движения - скорости капли и траектории ее движения, т.е. создание в сушильной башне возвратно-поступательный – пульсирующий поток воздушно-капельной сред. Соответственно изменится процесс массоотдачи и его скорость.

Математическая модель процессов массообмена базируется на совместном рассмотрении уравнений Фика и гидравлики капиллярной системы продуктов. Сушка рассматривается как суперпозиция трех процессов: конвективной диффузии, диффузии в стесненных условиях капилляров и десорбции влаги. [2] Совместное влияние соответствующих движущих сил определяет развитие гидродинамических, тепловых и массообменных процессов.

Интенсивность массоотдачи сферической частицы радиусом r через прилегающую к ней парогазовую пленку толщиной d в окружающую среду с концентрацией пара около частицы C'_n , а на границе пленки C_n , причем $C'_n > C_n$ описывается в соответствии с законом Фика. От

всей поверхности шара через паровоздушную пленку в радиальных направлениях установится поток массы пара, определяющийся выражением:

$$\frac{dW}{d\tau} = -DF \frac{dC_n}{dr} = -D4\pi r^2 \frac{dC_n}{dr}, \quad (1)$$

где W – масса пара, кг;

τ – время, с;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

r – радиус частицы, м;

F – площадь поверхности, м².

$$\int_r^{r'} \frac{dr}{r^2} = -\frac{4\pi D}{W} \int_{C_n}^{C'_n} dC_n, \quad (2)$$

$$-\frac{1}{r'} + \frac{1}{r} = \frac{4\pi D}{W} (C'_n - C_n), \quad (3)$$

откуда

$$W = \frac{4\pi D(C'_n - C_n)}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}}. \quad (4)$$

Для шаровой поверхности, в соответствии с основным законом массоотдачи, это же количество влаги равно [3]:

$$W = \beta 4\pi r^2 (C'_n - C_n), \quad (5)$$

где β – коэффициент массоотдачи, м/с.

Приняв соотношения 4 и 5 получим:

$$\beta = \frac{D}{r(1 - \frac{r}{r'})}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что чем меньше радиус с пограничным слоем или $r' > 0$, тем больше β .

В тоже время

$$\beta = \frac{NuD}{4r^2}, \quad (7)$$

где D – коэффициент диффузии пара в воздухе, м²/с;

Nu – коэффициент Нусельта.

На основе исследований по массообмену между частицей и газом большинством авторов предложены зависимости коэффициента Нусельта от чисел Re и Pr_m [1]:

$$Nu = 2 + f(Re, Pr_m). \quad (8)$$

Критерии Рейнольдса и Прандаля зависят от изменений радиуса, скорости обтекания частицы, вязкости и коэффициента диффузии:

$$Re = F(u, r, \gamma), Pr_m = f(\gamma, D). \quad (9)$$

Возникновение колебательного потока, изменения скорости частицы и характера ее движения повлияют на коэффициент Рейнольдса. Физический смысл критерия Рейнольдса есть отношение сил инерции, действующих в потоке, к силам вязкости, и зависит от смены режимов течения потока жидкости или газа. Берглес А.Е. доказал, что этот коэффициент при активных гидродинамических режимах зависит не только от основного потока, но и от характера обтекания частицы. Колебательный поток вызывает вторичный поток теплообмена - термоакустический эффект. [4] При добавлении распылительной сушилки прямоочного типа пульсатором в ее башне создается возвратно-поступательный поток, колебательный по своей сути. С учетом вышесказанного для определения критериев Re и Pr_m воспользуемся следующими формулами:

$$Re = \frac{2\pi du\omega}{\gamma}, \quad (10)$$

где d – диаметр капли, м;

u – относительная скорость капли, м/с;

ω – круговая частота, зависящая от количества оборотов дроссель-клапана пульсатора, с⁻¹;

γ – кинематическая вязкость, м²/с.

$$\frac{dW}{d\tau} = D\pi(2 + 0,51 \left(\frac{2\pi du\omega}{\gamma}\right)^{0,52} \left(\frac{\gamma}{D}\right)^{0,33}) \frac{dC_n}{dr}. \quad (11)$$

Рассмотрим поэтапно данное уравнение. Одним из определяющих параметров является коэффициент диффузии. Этот коэффициент представляет собой перемещение пара из зоны с большей концентрацией в зону меньшей. Рассматривая задачу диффузии в капле в процессе сушки, в которой происходит движение влаги к поверхности тела, определяющееся градиентом концентраций по оси x и значением коэффициента диффузии (D).

Коэффициент диффузии находится в прямо пропорциональной зависимости от температуры тела и коэффициента диффузии, в данном случае, пара при нормальных условиях. При протекании процесса сушки с использованием переменного потока агента температура поверхности частицы остается постоянной.

Коэффициент диффузии определяется по формуле:

$$D = KD_0 \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75}, \quad (12)$$

где D_0 – коэффициент диффузии при нормальных условиях и составляет $2,2 \times 10^{-5}$

T – температура, равная средней арифметической между температурой поверхности жидкости и температурой сушильного агента, К;

K – коэффициент.

В этом уравнении коэффициент K характеризует влияние дополнительного поперечного возвратно-поступательного потока сушильного агента на характер обезвоживания частицы. Колебание – интенсивное «встряхивание» – перемещает влагу из центра капли к периферии не только под действием градиента влагосодержания, но и механического воздействия. Этот коэффициент показывает интенсивность «встряхивания» частицы.

Движущая сила процесса массопереноса выражена через объемные концентрации пара на поверхности тела и в окружающей среде. Согласно уравнению идеальных газов, концентрация пара пропорциональна его парциальному давлению. Поэтому разность концентраций можно представить в виде:

$$\Delta C_n = \frac{p_p - p}{R_n T}, \quad (13)$$

где p_p – парциальное давление пара, равновесное содержанию влаги на поверхности частиц.

p – парциальное давление пара в окружающей среде.

Удаляемая влага создает паровоздушную пленку, называемую пограничным слоем. В связи с использованием переменного потока на частицу оказывается, помимо теплового воздействия, интенсивное механическое встряхивание – результат колебаний потока паровоздушной смеси, в результате происходит «отрыв» пограничного слоя, затрудняющего процесс массопереноса.

В соответствии с этим пар с поверхности частицы удаляется непосредственно в ядро потока.

Запишем:

$$\Delta C = \frac{1}{R_n T} \frac{p_{н.м.} \varphi_m - p_{н.л.} \varphi_v}{100}, \quad (14)$$

где R_n – газовая постоянная, 287 Дж/(кгК)

T – температура сушильного агента, К;

$p_{н.м.}$ – давление насыщенного пара на поверхности частицы, Па;

φ_m – относительная влажность материала;

φ_v – относительная влажность воздуха;

$p_{н.л.}$ – давление насыщенного пара в воздухе при указанной относительной влажности, Па.

Выявление специфических особенностей тепло- и массообмена при сушке распылением представляет теоретический и практический интерес. Приведенная модель дает представление о процессах влагоотдачи при распылительной сушке в активном динамическом режиме высоковлажного сырья, в частности, единичной сферической частицы, это позволяет определять влажность частицы и время, за которое она ее достигла.

16.08.2012

Список литературы:

1. Долинский, А.А. Оптимизация процессов распылительной сушки / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий. – М., 1989. – 156 с.
2. Бурдо, О.Г. Наномасштабные эффекты в пищевых технологиях // Инженерно-физический журнал. – Т. 78. – №2. – С. 88–93.
3. Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. – М.: Химия, 1979. – 288 с.
4. Гебхарт, Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2 книгах. Кн. 1 / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 678 с.

Сведения об авторах:

Михалева Татьяна Владимировна, ведущий инженер, кафедра пищевой биотехнологии
Оренбургского государственного университета

Попов Валерий Павлович, заведующий кафедрой пищевой биотехнологии

Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 32156, тел. (3532) 372465, ppbt@mail.osu.ru