

В. П. Кобринец, доцент; Д. С. Карпович, доцент;
В. Б. Михайлов, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СУШКИ ТВЕРДЫХ ЖЕЛАТИНОВЫХ КАПСУЛ В УСЛОВИЯХ ОАО «МИНСКИНТЕРКАПС»

The analysis of process of drying of firm gelatinous capsules as object of the control temperature-humidity modes on all zones of drying is lead. The function chart of the control and registration of temperature and humidity on zones of drying, and also registration of change of parameters of air before and after conditioner K-1600 providing a fence and preparation of external air is developed. The basic periods of process of drying are revealed, for each of these periods the mathematical model of the given process on the basis of which are investigated static and dynamic characteristics is developed. It will allow to determine the valid distribution of fields of temperature and humidity in zones of drying and to develop recommendations on improvement of modes of drying of capsules at separate stages, that in a result will lead to decrease in quantity of defective products at manufacturing firm gelatinous capsules.

Введение. Автоматическая линия для получения твердых желатиновых капсул (ТЖК) № 0 и 1 состоит из двух параллельных линий рабочего оборудования, одна из которых изготавливает корпуса, вторая – крышки капсул. В процессе производства ТЖК последовательно осуществляются следующие операции: смазывание пинов (линеек форм для изготовления крышки или корпуса капсулы, собранных в массивы), макание их в ванночки с желатиновой массой, прохождение их через пять зон сушки, снятие корпусов и крышек с пинов, стыковка и выгрузка капсул.

В работе данной линии наиболее важным является процесс сушки ТЖК, проводимый в нескольких зонах, от которого зависит качество получаемой продукции.

Тепловым агентом сушки выступает очищенный и осушенный воздух от кондиционера АНУ-7 без подогрева, поступающий в 0 и IV зоны сушки, и с подогревом до заданных температур с помощью системы электроподогрева – в III зону сушки, а также от кондиционера К-1600, осуществляющего забор наружного воздуха, с электроподогревом до заданных температур – в I и II зоны сушки (рис. 1).

Тепловые режимы по температуре различных зон сушки приведены в таблице.

При изменениях температурно-влажностных параметров заборного воздуха, используемого в процессе сушки, а также некоторых неконтролируемых изменениях теплового режима процесса происходит изменение температурного режима в различных зонах линии, что приводит к ухудшению качества готовой продукции и появлению брака.

Это обстоятельство вызывает необходимость исследования температурно-влажностных режимов процесса сушки капсул на всех стадиях протекания, что позволит разработать количественные взаимосвязи между показателями процесса сушки в статическом и динамическом режимах.

Таблица

Распределение температур по зонам сушки

ТЖК № 0		ТЖК № 1	
0 и IV зоны	Крышки (18 ± 2,5)°C	0 и IV зоны	Крышки (18 ± 2,5)°C
	Корпуса (18 ± 2,5)°C		Корпуса (18 ± 2,5)°C
I зона	Крышки (27 ± 4,0)°C	I зона	Крышки (27 ± 4,0)°C
	Корпуса (28 ± 5,0)°C		Корпуса (28 ± 5,0)°C
II зона	Крышки (30 ± 5,0)°C	II зона	Крышки (28 ± 5,0)°C
	Корпуса (34 ± 6,0)°C		Корпуса (33 ± 5,0)°C
III зона	Крышки (30 ± 5,0)°C	III зона	Крышки (29 ± 5,0)°C
	Корпуса (36 ± 6,0)°C		Корпуса (34 ± 6,0)°C

Данные исследования необходимо проводить как в теоретическом, так и в практическом аспектах решения поставленной проблемы.

Экспериментальная часть исследования заключается в непрерывном измерении температуры и влажности сушильного агента во всех зонах сушки с применением необходимых средств автоматического контроля и регистрации (рис. 1).

Основная часть. При составлении материального и теплового балансов процесса сушки введем: G_1 и G_2 – количество влажного и высушенного материала соответственно, кг/ч; u_0 и u_k – начальная и конечная влажность материала соответственно, %; W – количество удаляемой при сушке влаги, кг/ч.

Тогда условие материального баланса для всего материала будет иметь вид

$$G_1 = G_2 + W, \quad (1)$$

а для абсолютно сухого вещества:

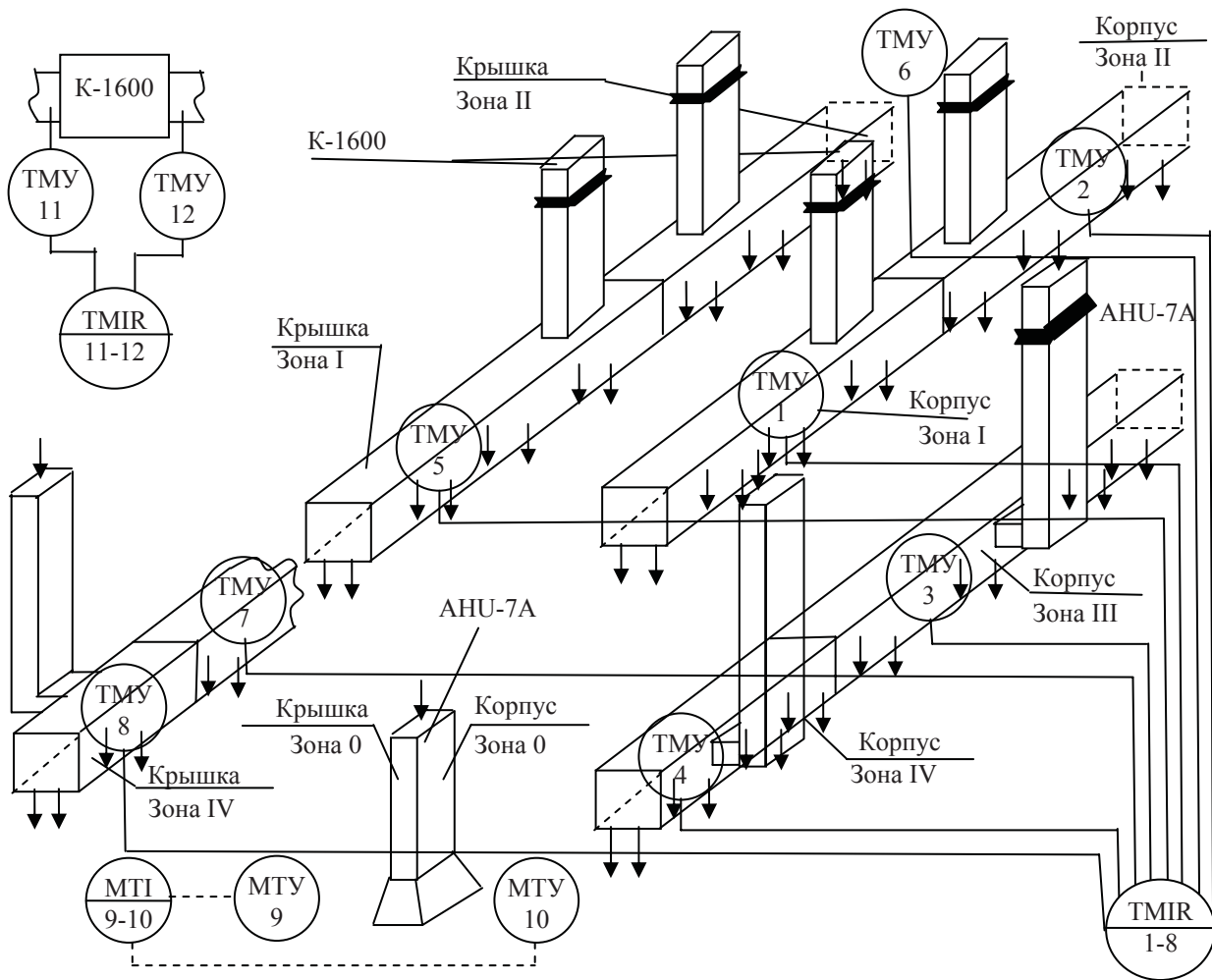


Рис. 1. Функциональная схема автоматического контроля технологических параметров

$$G_1 \frac{100 - u_0}{100} = G_2 \frac{100 - u_k}{100}. \quad (2)$$

Обычно целью составления материального баланса является определение количества влаги, удаляемой при сушке:

$$W = G_1 - G_2. \quad (3)$$

Используя соотношение (2), уравнение для расчета количества влаги (3) можно записать следующим образом:

$$W = G_2 \frac{u_0 - u_k}{100 - u_0}. \quad (4)$$

Если количество влаги W известно, то из уравнения (4) можно определить количество высушенного материала G_2 .

Остановимся на тепловом балансе сушки. Пусть на сушку поступает G_1 , кг/ч, исходного материала, имеющего температуру t_1 , °C. В процессе сушки из материала испаряется W , кг/ч, влаги и удаляется G_2 , кг/ч, высушенного материала при температуре t_2 , °C, с теплоемкостью c_m , Дж/(кг · град), причем теплоемкость влаги составляет c_v , Дж/(кг · град).

В зону сушки от кондиционера (рис. 1) подается влажный воздух, содержащий L , кг/ч, абсолютно сухого воздуха. Перед нагревательным элементом воздух имеет энтальпию I_0 , Дж/кг сухого воздуха. После нагрева, т. е. на входе в зону сушки, энтальпия воздуха повышается до I_1 , Дж/кг сухого воздуха. В процессе сушки в результате передачи теплоты материалу, поглощения испаряющейся из материала влаги и потерь теплоты в окружающую среду энтальпия воздуха изменяется и на выходе из сушилки энтальпия отработанного воздуха равна I_2 , Дж/кг сухого воздуха. Теплоту, подводимую в зону сушки, обозначим через Q_k . Тогда с учетом потерь теплоты сушилкой в окружающую среду Q_n имеем

$$LI_0 + G_2 c_m t_1 + W c_v t_1 + Q_k = LI_2 + G_2 c_m t_2 + Q_n. \quad (5)$$

Из этого уравнения можно определить общий расход теплоты на сушку:

$$Q_k = L(I_2 - I_0) + G_2 c_m (t_2 - t_1) - W c_v t_1 + Q_n. \quad (6)$$

Разделив обе части последнего уравнения на W , получим выражение для общего расхода тепла на 1 кг испаренной влаги:

$$q_k = l(I_2 - I_0) + q_m - c_b t_1 + q_n, \quad (7)$$

где

$$l = \frac{L}{W}, \quad q_m = \frac{G_2 c_m (t_2 - t_1)}{W}, \quad q_n = \frac{Q_n}{W}.$$

После составления теплового баланса рассмотрим динамику процесса сушки. Кинетика процесса сушки химических продуктов характеризуется скоростью удаления влаги.

Обычно при оценке кинетических параметров используются кривые сушки, получаемые экспериментально и представляющие собой зависимость влагосодержания от времени.

Кривые сушки можно разделить на несколько периодов, каждый из которых характеризуется определенным механизмом массопередачи. Так, типичная кривая сушки, изображенная на рис. 2, может быть разбита на три участка: участок с постоянной скоростью сушки (I) и на два участка с уменьшающейся скоростью сушки (II и III), которым соответствуют различные механизмы удаления влаги.

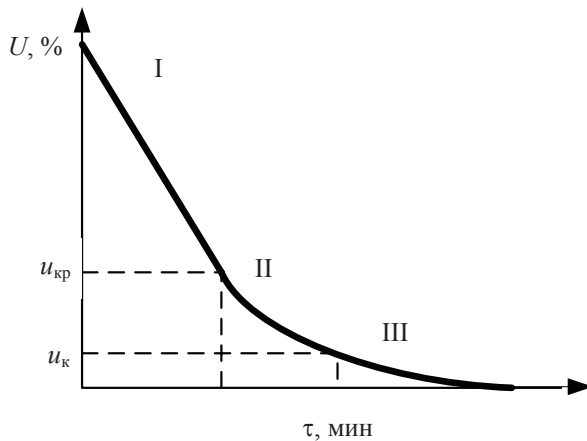


Рис. 2. Типичная кривая сушки

Период постоянной скорости сушки [1].

При рассмотрении этого периода обычно принимают, что на поверхности частицы достигается состояние фазового равновесия, т. е. частица окружена пленкой влаги и воздух над ней находится в состоянии насыщения и имеет температуру мокрого термометра. Тогда скорость процесса сушки определяется состоянием окружающей среды и условиями сушки, а полный поток влаги записывается через объемный коэффициент массоотдачи:

$$-\frac{d\mu}{dt} = j = \beta(x_r - x) = \beta(x^* - x), \quad (8)$$

где x_r – влагосодержание воздуха, кг/кг, на границе частицы, которое считается равновесным, т. е. $x_r = x^*$; x – влажность (воздуха) в объеме сплошной фазы. Обе величины находятся по психрометрическим данным.

Из экспериментально полученных значений потока влаги j , $\% \cdot \text{мин}^{-1}$, при различных температурах можно рассчитать величину β , используя соотношение

$$\beta = \frac{j}{x^* - x}. \quad (9)$$

Парциальные давления насыщенных паров P_t^* при разных температурах t находят из таблиц,

а мольные доли m – из следующих выражений:

$$m^* = \frac{P_t^*}{P}, \quad m = \frac{P_t^* \phi}{P}, \quad (10)$$

где P – атмосферное давление, мм рт. ст.; ϕ – относительная влажность воздуха, определяемая по температуре сухого и мокрого термометров ($t_{\text{сух}}$, $t_{\text{мокр}}$).

Тогда влагосодержание x^* и x вычисляют по формулам

$$x^* = \frac{M_B}{M_{\text{возд}}} \frac{m^*}{1 - m^*}, \quad (11)$$

$$x = \frac{M_B}{M_{\text{возд}}} \frac{m}{1 - m}. \quad (12)$$

Обработкой эксперимента, выполненного при различных температурах, можно получить зависимость $\beta = f(t)$.

Критическое время, соответствующее завершению периода постоянной скорости сушки, составляет

$$\tau = \frac{u_0 - u_{\text{кр}}}{j}. \quad (13)$$

Период падающей скорости сушки [2].

Этому периоду отвечают в общем случае два механизма:

- диффузия влаги из пор к поверхности (участок II на рис. 2);

- удаление химически связанной (кристаллизационной) влаги (участок III на рис. 2).

Период падающей скорости сушки начинается при достижении критического влагосодержания $u_{\text{кр}}$, когда на поверхности материала образуются сухие островки. Если считать, что в этом периоде все сопротивление массопереносу сосредоточено внутри материала и подводимая к поверхности влага моментально отводится, то механизм массопереноса можно описать уравнением нестационарной диффузии в сферических координатах:

$$\varepsilon \frac{\partial u}{\partial \tau} = D_{\text{эф}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} + \frac{2}{\rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} \right), \quad (14)$$

где ε – пористость частицы; u – значение влагосодержания в момент времени τ на расстоянии ρ от

центра частицы; $D_{эф}$ – обобщенный усредненный коэффициент диффузии. Принимается, что все поры в частице и влага в них распределены равномерно.

Начальное и граничные условия таковы:

$$u = u_{кр} \text{ при } \tau = \tau_{кр}, 0 < \rho < R, \quad (15)$$

$$u = u_r \text{ при } \tau > \tau_{кр}, \rho = R, \quad (16)$$

$$\frac{du}{d\rho} = 0 \text{ при } \tau > \tau_{кр}, \rho = 0. \quad (17)$$

Причем u_r характеризует влагосодержание на границе, равновесное с влагосодержанием окружающего воздуха.

Решение уравнения (14) с граничными условиями (16), (17) и начальным условием (15), полученное методом Фурье, имеет вид

$$\frac{u - u_{кр}}{u_r - u_{кр}} = 1 + \frac{2R}{\pi\rho} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{\pi n \rho}{R} e^{-D(\tau - \tau_{кр})}, \quad (18)$$

где

$$D = \frac{D_{эф} \pi^2 n^2}{R^2 \varepsilon}. \quad (19)$$

Экспериментально получают изменение среднего влагосодержания \bar{u} во времени. Тогда исходя из определения среднего влагосодержания материала находят:

$$\bar{u} = \frac{G_{вл}}{G_{св}} = \frac{\int_0^R u_p \gamma_M 4\pi\rho^2 d\rho}{\int_0^R \gamma_M 4\pi\rho^2 d\rho} = \frac{3}{R^3} \int_0^R u_p \rho^2 d\rho. \quad (20)$$

Подстановка из (18) величины u в уравнение (20) дает зависимость среднего влагосодержания \bar{u} от времени τ в периоде удаления влаги из пор материала:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{3}{R^3} \int_0^R u_p \rho^2 d\rho = \frac{3}{R^3} \int_0^R u_r + (u_r - u_{кр}) \times \\ &\times \frac{2R}{\pi\rho} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{\pi n \rho}{R} e^{-D(\tau - \tau_{кр})} \rho^2 d\rho = \\ &= u_r + (u_r - u_{кр}) \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} e^{-D(\tau - \tau_{кр})}. \quad (21) \end{aligned}$$

Среднее влагосодержание можно получить также интегрированием локального влагосодержания u по всему объему V :

$$\bar{u} = \frac{1}{V} \iiint_{(V)} u dV. \quad (22)$$

Тогда после перехода к сферическим координатам подстановка u из уравнения (20) в выражение (22) дает

$$\begin{aligned} \bar{u} &= u_r + (u_r - u_{кр}) \frac{3}{4\pi R^3} \frac{2R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \times \\ &\times e^{-D(\tau - \tau_{кр})} \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi \int_0^R \frac{1}{\rho} \sin \frac{\pi n \rho}{R} \rho^2 d\rho, \quad (23) \end{aligned}$$

откуда в результате интегрирования получаем

$$\bar{u} = u_r + \frac{6}{\pi^2} (u_r - u_{кр}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} e^{-D(\tau - \tau_{кр})}. \quad (24)$$

Решения (21) и (24) совпадают и представляют собой знакопеременный быстроходящийся ряд, в котором первый член намного больше остальных. Поэтому в качестве первого приближения модели кинетики сушки в рассматриваемом периоде можно использовать только первый член ряда в уравнении (24). В этом случае получаем

$$\bar{u} = u_r - (u_r - u_{кр}) \frac{6}{\pi^2} e^{-D(\tau - \tau_{кр})}. \quad (25)$$

Из последнего выражения можно найти формулу для коэффициента диффузии:

$$D = \frac{\ln \left[\frac{\pi^2 (\bar{u} - u_r)}{6 (u_{кр} - u_r)} \right]}{\tau_{кр} - \tau}. \quad (26)$$

Заключение. Сушка ТЖК – сложный массообменный многозональный процесс, исследование которого необходимо для определения действительных полей температуры и влажности сушильного агента во всех зонах. Проведен анализ статических и динамических режимов процесса сушки, что позволило установить основные статические закономерности и кинетические характеристики данного процесса.

Литература

1. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
2. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.