

Mathematical model of management of spray drying apparatus

Natalia Shiyanova, Alina Ostapenko, Konstantin Kolyazov

*Moscow state university of technology and management "K.G. Razumovsky",
branch in Meleuz.*

ABSTRACT

Keywords:

Drying
Spray
Humidity
Milk
Dairy

Article history:

Received 01.10.2013
Received in revised form
02.12.2013
Accepted 25.12.2013

Corresponding author:

Natalia Shiyanova
E-mail:
shianova58@mail.ru

Introduction. Mathematical model of the drying process of dairy products, which takes into account static and dynamic characteristics of the drying process, it is necessary for the automated control system of spray dryers.

Materials and methods. Universal programming languages and specialized algorithmic languages for situational descriptions of objects and modeling algorithms for compiling simulation models was used.

Result. A mathematical model based on the equations of material and thermal balance, taking into account the static and dynamic characteristics of the process of drying of milk and dairy products. During the development of process automated control system of drying of milk and dairy products in spray dryers, you must provide the desired humidity of the product and output of the installation. For a choice of optimum structure of inhomogeneous and non-stationary flow of materials in technological system of milk production should use a complex simulation model of production, reproducing the various alternatives on a computer for evaluation of their optimality on yield and quality of finished products, rational use of raw materials and optimization of technological regimes.

УДК 664

Математическая модель управления распылительными сушильными установками

Наталья Шиянова, Алина Остапенко, Константин Колязов

*Московский государственный университет технологии и управления
имени К.Г. Разумовского, филиал в г. Мелеузе*

Введение

С помощью средств вычислительной техники можно создавать модели самых разнообразных систем, описание которых может быть не связано с алгебраическими или дифференциальными уравнениями и сводится к машинной имитации их функционирования в алгоритмической форме.

При разработке автоматизированной системы управления процессом сушки молока и молочных продуктов в распылительных сушильных установках необходимо обеспечить заданную влажность продукта и производительность установки. При автоматизированном управлении сушильной установкой можно выделить два основных регулируемых параметра: влажность готового продукта на выходе из сушильной башни и температуру горячего воздуха на выходе из калорифера.

Целью настоящей работы явилось создание математической модели на основе уравнений материального и теплового баланса, учитывающая статические и динамические характеристики процесса сушки молока и молочных продуктов.

Материалы и методы

Использовано имитационное моделирование, заключающееся в воспроизведении на ЭВМ поведения управляемой производственной системы, сложных технологических комплексов и процессов, не поддающихся прямому экспериментальному исследованию или аналитическому решению. Для составления имитационных моделей наряду с универсальными языками программирования применяют специализированные алгоритмические языки для ситуационного описания объектов и алгоритмов моделирования.

Результаты и обсуждение

В процессе производства сухих молочных продуктов значения параметров технологического процесса могут изменяться, вызывая отклонения от нормального режима (регламента). Поддержание параметров технологического процесса в диапазоне заданных значений выполняет система автоматического регулирования (САР). В нашем случае объектом управления является сушильная установка, которая состоит из сушильной башни и калорифера для подогрева воздуха.

Явление высушивания влажных предметов широко распространено в природе и в быту. Обычным носителем процесса сушки является воздух. Чем выше температура воздуха и его скорость, тем сушка протекает интенсивнее.

В молочной промышленности для сушки применяется чистый воздух. В отличие от выпаривания, которое осуществляется под вакуумом, сушка ведется большей частью при атмосферном давлении. Влага при сушке поглощается и уносится воздухом. Количество поглощенной воздухом влаги зависит от свойств воздуха и его способности растворять водяные пары.

При конвективной сушке воздух не только поглощает и уносит влагу, но и одновременно является источником тепла, которое необходимо для того, чтобы превратить воду в пар. Эта двойственная роль воздуха в качестве влагопоглотителя и теплоносителя предопределяет построение математической модели объекта управления [Горбатюк В.И. (1999), *Процессы и аппараты пищевых производств*, Москва, Колос], [3].

Для выбора оптимальной структуры неоднородных и нестационарных материальных потоков в технологической системе молочного производства следует использовать комплексную имитационную модель производства, воспроизводящую различные альтернативные варианты на ЭВМ для оценки их оптимальности по выходу и качеству готовой продукции, рациональности использования сырья и оптимизации технологических режимов.

Создание математической модели производственной деятельности предприятия с воспроизведением различных технологических ситуаций, возникающих в процессе комплексной переработки сырья в заданный ассортимент продукции, базируется на следующих основных принципах:

- адекватное отражение структуры свойств и особенностей комплекса технологических процессов с возможностью варьирования параметров воспроизводимых процессов в исследуемой области;

- максимальное использование априорной информации об объекте, обеспечивающее возможную на этапе моделирования информационную разгрузку оператора в процессе принятия решения с оптимальным распределением функций между человеком и машиной;

- гибкость и самоорганизация модели с возможностью обновления, дополнения и усложнения выполняемых функций;

- реализация модели на ЭВМ с помощью пакета или системы прикладных программ с многоуровневой, иерархической модульной структурой управления совокупностью модулей, каждый из которых осуществляет законченное преобразование информации [2].

Процесс сушки молока и молочных продуктов осуществляется в сушильной установке следующим образом.

Очищенный свежий воздух с температурой t_0 и влажностью d_0 подается вентилятором 1 в калорифер 2, где при постоянном влажосодержании подогревается до температуры t_1 и затем снизу поступает в сушильную башню 3, внутри которой сверху на вращающийся распылительный диск 4 падает сгущенное молоко. Отработавший воздух выходит из сушильной башни с параметрами t_2 и d_2 .

Составим уравнение материального баланса процесса сушки:

$$G_H = G_K + U, \quad (1)$$

где G_H – количество влажного материала, подаваемого в сушилку с начальной влажностью $W_H(\%)$, кг/с;

G_K – количество сухого материала, выходящего из сушилки с конечной влажностью $W_K(\%)$, кг/с;

U – количество удаленной из материала влаги, кг/с.

Другое уравнение материального баланса можно написать, воспользовавшись тем, что количество сухого вещества в материале во время сушки не изменяется.

$$G_H \left(1 - \frac{W_H}{100}\right) = G_K \left(1 - \frac{W_K}{100}\right) \quad (2)$$

Комбинируя (1) и (2), получим количество удаляемой влаги

$$U = G_H \frac{W_H - W_K}{100 - W_K},$$

или

$$U = G_K \frac{W_H - W_K}{100 - W_H} \quad (3)$$

Составим таблицу материального баланса сушильной установки, полагая, что на сушку подается L кг/с сухого воздуха.

Таблица 1
Материальный баланс сушильной установки при L кг/с сухого воздуха

Приход, кг/с	Расход, кг/с
Сухой воздух L	Сухой воздух L
Влага, содержащаяся в свежем воздухе, $Ld_0 \cdot 10^{-3}$	Влага, содержащаяся в отработавшем воздухе, $Ld_2 \cdot 10^{-3}$
Влажный материал G_H	Высушенный материал G_K

Сложив входящие и выходящие количества, получим

$$L + Ld_0 \cdot 10^{-3} + G_H = L + Ld_2 \cdot 10^{-3} + G_K, \quad (4)$$

или

$$G_H - G_K = L(d_2 - d_0) \cdot 10^{-3}$$

Откуда с учетом количество удаляемой влаги равно:

$$U = L \frac{d_2 - d_0}{1000}, \quad (5)$$

а количество расходуемого воздуха равно

$$L = U \frac{1000}{d_2 - d_0} \quad (6)$$

Поделив последнее уравнение на U , получим

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0}, \quad (7)$$

здесь $l = \frac{L}{U}$ - удельный расход воздуха в сушильной башне – количество сухого воздуха, расходуемого на удаление из материала 1 кг влаги.

Сделаем следующие допущения:

1. Сушильную башню будем рассматривать как объект с сосредоточенными параметрами.

2. Изменение температуры воздуха от T_1 на входе в сушильную башню до T_2 на выходе из нее происходит по линейному закону.

3. Сгущенное молоко превращается в сухое молоко в течение 1,5-2 секунд.

Составим модель статики технологического процесса сушки молока на основе уравнения теплового баланса, причем можно пренебречь потерями тепла в окружающую среду через стены сушильной башни, так как они покрыты слоем теплозащитной изоляции [3]:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4, \quad (8)$$

где:

Q_1 – количество теплоты, отдаваемое поступающим в сушильную башню воздухом,

Q_2 - количество теплоты, отдаваемое поступающим в сушильную башню сгущенным молоком,

Q_3 - количество теплоты, получаемое сухим молоком в сушильной башне,

Q_4 - количество теплоты, уносимое отработавшим воздухом.

Причем,

$$Q_1 = LI_1 \quad (9)$$

$$Q_2 = G_H c_2 T_2 \quad (10)$$

$$Q_3 = G_K c_3 T_3 \quad (11)$$

$$Q_4 = LI_2, \quad (12)$$

где: c_2 и c_3 - соответственно удельная теплоемкость сгущенного и сухого молока (Дж/кг),

I_1 и I_2 - соответственно удельная энтальпия входящего и уходящего воздуха (Дж/(кг °С)),

T_2 и T_3 - соответственно температура входящего и уходящего воздуха.

Основная задача сушки - удаление влаги из материала, чему предшествует предварительное превращение этой влаги в пар. На это расходуется значительная часть теплоты воздуха, что в уравнении теплового баланса отражения не нашло. Образовавшийся пар, несущий в себе все количество теплоты, затраченной на его образование, поглощается воздухом и теплосодержание воздуха в этом процессе не изменяется.

Таким образом, уравнение теплового баланса примет вид:

$$LI_1 + G_H c_2 T_2 = G_K c_3 T_3 + LI_2 \quad (13)$$

Разрешая уравнение (2.2.13) относительно T_3 , получаем уравнение статики технологического процесса сушки молока

$$T_3 = \frac{L(I_2 - I_1)}{G_K c_3} - \frac{G_H c_2}{G_K c_3} \cdot T_2 \quad (14)$$

Далее задавая значениями теплофизических параметров и варьируя ими в допустимых пределах, в частности расход сгущенного молока может изменяться от 450 до 1150 кг/ч, можно построить семейство статических характеристик, описывающих различные установившиеся режимы сушильной башни.

В настоящее время хорошо изучены динамические характеристики объектов регулирования применительно к широко используемым сушильным установкам «Нема - 500», включающим в себя сушильную башню и калорифер, по каналам:

- «расход сгущенного молока - температура воздуха на выходе из сушильной башни»;

- «давление греющего пара на входе в калорифер (паровой) - температура воздуха на выходе из калорифера».

Практически не изученными являются динамические характеристики сушильной башни как объекта регулирования и управления по каналам:

- «расход воздуха на входе в сушильную башню - температура воздуха на выходе из сушильной башни»;

- «температура воздуха на входе в сушильную башню - температура воздуха на выходе из сушильной башни»;

- «влажность сгущенного молока - температура воздуха на выходе»;

- «температура сгущенного молока - температура воздуха на выходе».

Поэтому проводились исследования на реально действующем объекте - сушильной установке «Нема-500» ЗАО «Мелеузовский молочно-консервный комбинат», в результате получены переходные характеристики объекта

регулирования по различным каналам (рис. 1-4), которые использовались в дальнейшем для настройки параметров типовых регуляторов.

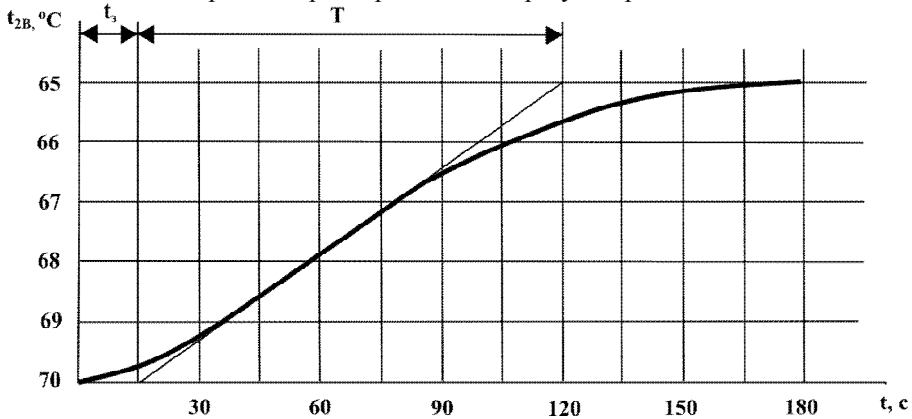


Рис. 1. Переходная функция сушильной башни по каналу «расход сгущенного молока – температура воздуха на выходе из сушильной башни»

Из графика на рисунке 1 видно, что время запаздывания для сушильной башни по данному каналу $\tau_3=15$ с, постоянная времени $T=105$ с.

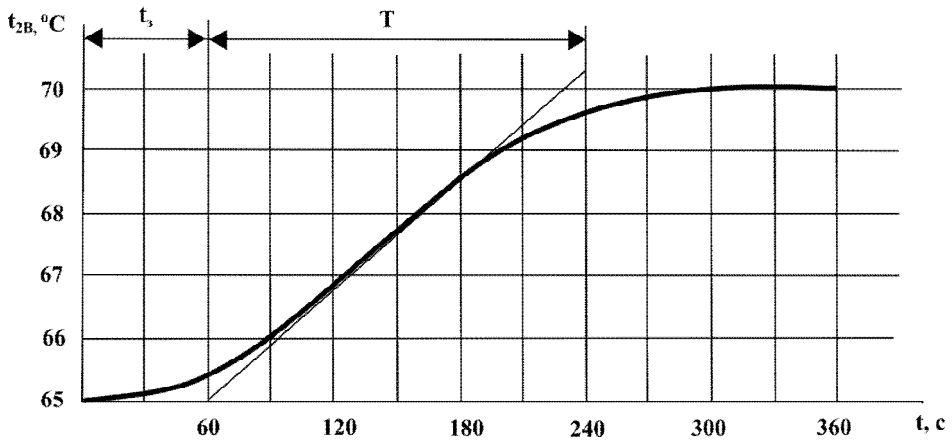


Рис. 2. Переходная функция сушильной башни по каналу «расход воздуха на входе в сушильную башню – температура на выходе из сушильной башни»

Из графика на рисунке 2 видно, что время запаздывания для сушильной башни по данному каналу $\tau_3=60$ с, постоянная времени $T=192$ с.

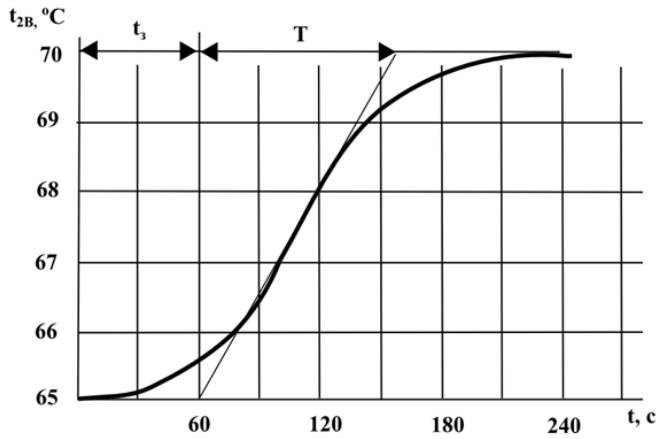


Рис. 3. Переходная функция сушильной башни по каналу «температура воздуха на входе в сушильную башню – температура на выходе из сушильной башни»

Из графика на рисунке 3 видно, что время запаздывания для сушильной башни по данному каналу $\tau_3=65$ с, постоянная времени $T=90$ с.

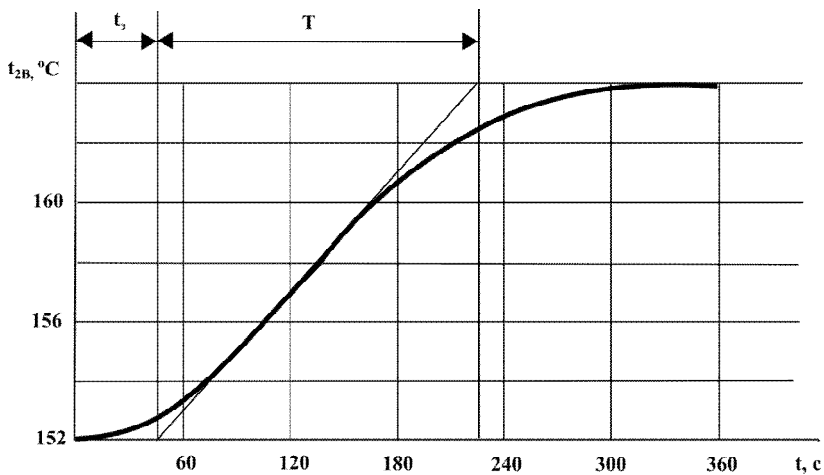


Рис. 4. Переходная функция калорифера по каналу «Давление греющего пара на входе в калорифер – температура воздуха на выходе из калорифера»

Из графика рисунок 4 видно, что время запаздывания для сушильной башни по данному каналу $\tau_3=40$ с, постоянная времени $T=180$ с.

На данном этапе нет практической возможности проводить исследования по каналам «влажность сгущенного молока – температура воздуха на выходе» и «температура сгущенного молока – температура воздуха на выходе», так как воздействовать на параметры влажность и температуру сгущенного молока весьма затруднительно.

Для разработки динамической модели сушильной башни представим уравнение

теплового баланса в виде:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = Q_{\text{вх}}(t) - Q_{\text{вых}}(t - \tau), \quad (15)$$

где $\frac{dQ(t)}{dt} = V \rho c \frac{dT_3(t)}{dt}$ – изменение количества тепла в объеме сушильной башни,

причем

V – объем сушильной башни, м³;

ρ – плотность смеси внутри сушильной башни, кг/м³;

c – удельная теплоемкость смеси внутри сушильной башни, Дж/кг;

τ – постоянная времени транспортного запаздывания, в секундах (с).

Раскрывая правую часть уравнения, получим дифференциальное уравнение первого порядка

$$V \rho c \frac{dT_3(t)}{dt} + G_k c_3 T_3(t) = L(I_1 - I_2) + G_H c_2 T_2(t - \tau) \quad (16)$$

Обозначив $V \rho c$ через k_1 , $G_k c_3 - k_2$, $G_H c_2 - k_3$, $L(I_1 - I_2) - k_0$, представим уравнение (16) в виде

$$k_1 \frac{dT_3(t)}{dt} + k_2 T_3(t) = k_0 + k_3 T_2(t - \tau) \quad (17)$$

Уравнение (17) представляет собой динамическую модель сушильной башни.

Приведем уравнение (17) к стандартному виду, для чего воспользуемся следующими обозначениями:

$$T = k_1 / k_2; \quad K_{об} = k_3 / k_2 \quad (18)$$

$$y(t) = T_3(t) - k_0 / k_2; \quad u(t - \tau) = T_2(t - \tau) \quad (19)$$

С учетом обозначений (18) и (19) уравнение объекта (17) принимает вид

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_{об} u(t - \tau) \quad (20)$$

На основании уравнения (20), устанавливающего взаимосвязь между входным $u(t)$ и выходным $y(t)$ сигналами объекта, получим выражение передаточной функции объекта (сушильной башни) по каналу управления

$$W_{об}(s) = K_{об} \frac{e^{-\tau s}}{1 + Ts} \quad (21)$$

Выводы

Разработана математическая модель на основе уравнений материального и теплового баланса, учитывающая статические и динамические характеристики процесса сушки молока и молочных продуктов. Модель может быть использована при разработке автоматизированной системы управления распылительных сушильных установок для молочных продуктов.

Литература

1. E. Refstrup, J. Bonke. Plant and Equipment | Milk Dryers: Drying Principles. *Encyclopedia of Dairy Sciences* (Second Edition). – 2011. - Pp. 208-215
2. Долинский А. А., Шелиманов В. А. К вопросу расчета температуры материала в первом периоде конвективной сушки нагретым воздухом // *Промышленная теплотехника*. 2000. - Т. 22. - №4. - С. 40-45.
3. Снежкин Ю. Ф., Хавин А. А. Оценка тепловой эффективности сушилок, работающих на материалах с различной начальной влажностью // *Промышленная теплотехника*. 1996. - Т. 18. - №4. - С. 30-32.
4. Формалев В. В., Колесник С. А., Чипашвили А. А. Численное моделирование теплопереноса в анизотропных телах с разрывными характеристиками // *Математическое моделирование*. 2004. - Т. 16. - №5. - С. 94-102.
5. Pierre Schuck, Anne Dolivet, Serge Méjean, Peng Zhu, Eric Blanchard, Romain Jeantet. Drying by desorption: A tool to determine spray drying parameters / *Journal of Food Engineering*. - Vol. 94. - Is. 2. - 2009, Pp. 199-204.
6. R. Paéz, L. Lavari, G. Vinderola, G. Audero, A. Cuatrin, N. Zaritzky, J. Reinheimer. Effect of heat treatment and spray drying on lactobacilli viability and resistance to simulated gastrointestinal digestion / *Food Research International*. – Vol. 48. - Is. 2. – 2012. – Pp. 748-754.

References

1. E. Refstrup, J. Bonke (2011), Plant and Equipment | Milk Dryers: Drying Principles. *Encyclopedia of Dairy Sciences* (Second Edition), pp. 208-215
2. Dolinskij A. A., Shelimanov V. A. (2000), K voprosu rascheta temperatury materiala v pervom periode konvektivnoj sushki nagretym vozduhom, *Promyshlennaja teplotehnika*, 22(4), pp. 40-45.
3. Snezhkin Ju. F., Havin A. A. (1996), Ocenka teplovoj jeffektivnosti sushilok, rabotajushhijh na materialah s razlichnoj nachal'noj vlazhnost'ju, *Promyshlennaja teplotehnika*, 18(4), pp. 30-32.
4. Formalev V. V., Kolesnik S. A., Chipashvili A. A. (2004), Chislennoe modelirovanie teploperenosa v anizotropnyh telah s razryvnymi harakteristikami, *Matematicheskoe modelirovanie*, 16(5), pp. 94-102.
5. Pierre Schuck, Anne Dolivet, Serge Méjean, Peng Zhu, Eric Blanchard, Romain Jeantet (2009), Drying by desorption: A tool to determine spray drying parameters, *Journal of Food Engineering*, 94(2), pp. 199-204.
6. R. Paéz, L. Lavari, G. Vinderola, G. Audero, A. Cuatrin, N. Zaritzky, J. Reinheimer (2012), Effect of heat treatment and spray drying on lactobacilli viability and resistance to simulated gastrointestinal digestion, *Food Research International*, 48(2), pp. 748-754.