

ПИЩЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 664.8.047

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ЯБЛОЧНЫХ ВЫЖИМОК В МНОГОЗОНАЛЬНОМ АППАРАТЕ ВИБРОКИПЯЩЕГО СЛОЯ

*З.В.Василенко, В.И.Никулин, М.М.Кожневников, Л.В.Лазовикова,
Л.А.Лоборева, И.В.Матюлин*

Предложена методика определения режимных параметров процесса сушки яблочных выжимок в многозональном аппарате виброкипящего слоя, при котором реализуется максимальная производительность по сухому продукту с единицы площади газораспределительной решетки.

Введение

Задачам отыскания оптимальной комбинации независимых технологических параметров, которая обеспечивает максимально или минимально возможное значение целевой функции, в последнее время придается большое значение. Существование достаточно большого числа различных методов, позволяющих из множества комбинаций независимых параметров выбрать оптимальный, при котором реализуется экстремум выбранной целевой функции, требует дифференцированного их использования при решении конкретной задачи. Выбор того или иного метода в значительной степени определяется математической формулировкой критерия оптимальности и уравнений, описывающих объект оптимизации.

Начальным и наиболее ответственным моментом оптимального проектирования является обоснованный выбор целевой функции, так как оптимальный режим всегда относится только по отношению к выбранному критерию оптимальности. При оптимизации процесса сушки пищевых продуктов существует ряд требований, которые необходимо выполнить – это минимизация продолжительности сушки и затрат энергии, достижение максимальной производительности, получение продукта высокого качества. Одновременный учет всех этих условий невозможен. В связи с этим проводят оптимизацию по одному комплексному критерию, который является функцией исходных критериев или рассматривают оптимум какого-либо одного при ограничениях, установленных на остальные.

При оптимизации сложных многофакторных технологических процессов, когда неизвестна связь между принятым критерием оптимальности и независимыми технологическими параметрами, наиболее эффективным является метод экстремального планирования эксперимента.

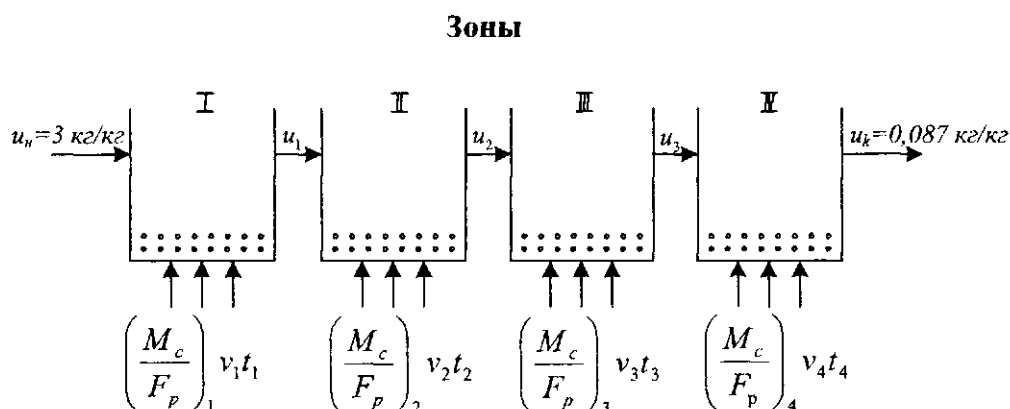
Для процесса сушки яблочных выжимок в виброкипящем слое зависимость между выбранной целевой функцией и независимыми технологическими параметрами может быть получена аналитически. В связи с этим в нашем случае отсутствует необходимость в применении метода экстремального эксперимента, а задача оптимизации сушки сводится к определению значений режимных параметров, при которых реализуется экстремум выбранной целевой функции. При этом на управляемые переменные установлены ограничения, обусловленные областью их возможных значений.

Задачи такого типа, т.е. с нелинейными соотношениями, определяющими критерий оптимальности и ограничения, являются предметом нелинейного программирования.

Целью работы явилось определение оптимального режима сушки яблочных выжимок в

Результаты исследований и их обсуждение

Предполагается, что сушилка непрерывного действия имеет четыре зоны, через которые последовательно проходит высушиваемый продукт (рисунок 1). Выбор количества зон связан с предполагаемым использованием результатов исследования для модернизации выпускаемой четырехзональной сушилки А1-ОГК. На основании изучения конкурирующих свойств оптимизируемого объекта в качестве критерия оптимизации принята величина удельной производительности по сухому продукту с единицы площади газораспределительной решетки.



Значение целевой функции при заданных начальном и конечном влагосодержании продукта будет зависеть от режимных параметров сушки в каждой из зон. К ним относятся температура сушильного агента на входе в зону t_{ex} , скорость воздуха на псевдоожигание v , удельная нагрузка по сухому продукту $\left(\frac{M_c}{F_p}\right)$ (рисунок 1).

На основании проведенных экспериментов по изучению кинетики сушки яблочных выжимок в виброкипящем слое [1] установлено, что зависимость влагосодержания u от продолжительности процесса τ может быть аппроксимирована выражением

$$u = u_n \exp(-k\tau), \tag{1}$$

где k — коэффициент сушки, зависящий от параметров сушки:

$$k = 4,49 \cdot 10^{-5} (t_{ex} + 13,33) \cdot \left[20,01 - \left(\frac{M_c}{F_p}\right) \right] \cdot (v + 1,89). \tag{2}$$

Если предположить, что закон идеального вытеснения продукта имеет место в каждой зоне, то удельная производительность по сухому продукту, получаемая с i -й зоны, может быть найдена так:

$$\left(\frac{G_c}{F_p}\right)_i = \left(\frac{M_c}{F_p}\right)_i \cdot \frac{k_i}{\ln \frac{u_{i-1}}{u_i}} \tag{3}$$

При оптимизации должен быть учтен ряд ограничений, связанных с протеканием процесса. Так, должно быть выполнено условие сопряжения влагосодержаний на соседних зонах, согласно которому влагосодержание продукта на выходе из зоны совпадает с влагосодержанием на входе в следующую зону. Из условия неразрывности по массе сухого продукта и равенства зон между собой следует равенство удельных производительностей по сухому продукту на каждой зоне:

$$\left(\frac{G_c}{F_p}\right)_1 = \left(\frac{G_c}{F_p}\right)_2 = \left(\frac{G_c}{F_p}\right)_3 = \left(\frac{G_c}{F_p}\right)_4 \quad (4)$$

Для получения высококачественного продукта его температура в процессе сушки не должна превышать 70 °С [2–3]. Учитывая, что температура продукта при сушке в псевдоожиженном слое практически совпадает с температурой отработанного воздуха, имеет место условие:

$$t_{\text{omp},i} \leq t_{\text{дон}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{дон}}=70$ °С

Температура отработанного воздуха связана с температурой входящего воздуха уравнением теплового баланса (3), в котором можно пренебречь затратами тепла на нагрев продукта ввиду их относительной малости по сравнению с затратами на испарение влаги при сушке яблочных выжимок, имеющих большую начальную влажность. Уравнение теплового баланса имеет вид

$$\rho_a \cdot c_a \cdot v \cdot (t_{\text{ex}} - t_{\text{omp}}) = \left(\frac{M_c}{F_p}\right) \cdot r \cdot \frac{du}{d\tau} \quad (6)$$

Заменив $\frac{du}{d\tau}$ на ku и подставляя выражение для t_{ex} , следующее из уравнения (6) в формулу для коэффициента сушки (2), получим:

$$k_i = \frac{4,49 \cdot 10^{-5} \cdot (t_{i\text{дон},i} + 13,33) \cdot \left[20,01 - \left(\frac{M_{\bar{n}}}{F_p}\right)_i\right] \cdot (v_i + 1,89)}{1 - \frac{4,49 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{M_c}{F_p}\right) \cdot r \cdot u_{i-1} \cdot \left[20,01 - \left(\frac{M_{\bar{n}}}{F_c}\right)_i\right] \cdot (v_i + 1,89)}{\rho_a \cdot \tilde{n}_a \cdot v_i}} \quad (7)$$

При вычислении коэффициента сушки k_i , входящего в основные формулы оптимизации, его значения принимались с запасом 15 %.

Исходя из условия стабильности псевдоожижения, должны быть наложены ограничения на удельную нагрузку по продукту и скорость псевдоожижающего воздуха.

По данным экспериментов, допустимая нагрузка по влажному продукту составляет 28,4 кг/м². Тогда для нагрузки по сухому продукту имеем:

$$\left(\frac{\dot{I}_{\bar{n}}}{F_p}\right)_i \leq \frac{28,4}{1 + u_{i-1}} \quad (8)$$

Скорость воздуха на псевдоожижение не должна быть меньше минимально допустимой. На основании экспериментальных результатов по зависимости начальной скорости псевдоожижения яблочных выжимок от его влагосодержания приняты следующие значения минимальных скоростей по зонам: $v_{1min}=2,7$ м/с; $v_{2min}=2,3$ м/с; $v_{3min}=1,7$ м/с; $v_{4min}=1,1$ м/с. Таким образом, имеем задачу определения максимума функции (3) при оптимизируемых переменных

$t_i, \left(\frac{M_c}{F_p}\right)_i, v_i [i=1, \dots, 4]$ с учетом ограничений (4), (5), (7), (8), а также условий сопряжения влагосодержания между зонами и ограничения скорости воздуха на псевдоожижение.

Анализируя вид функции (3) и ограничения (7), можно заменить в ограничениях знак неравенства на равенство. Особенностью полученной задачи является то, что целевая функция не может быть непосредственно вычислена по значениям оптимизируемых переменных. В связи с этим предлагается следующий метод решения задачи оптимизации с применением метода штрафных функций [4]. Будет отыскиваться минимум следующей функции:

$$\Phi = -\left(\frac{G_c}{F_p}\right)_1 + \alpha \left\{ \left[\left(\frac{G_c}{F_p}\right)_1 - \left(\frac{G_c}{F_p}\right)_2 \right]^2 + \left[\left(\frac{G_c}{F_p}\right)_2 - \left(\frac{G_c}{F_p}\right)_3 \right]^2 + \left[\left(\frac{G_c}{F_p}\right)_3 - \left(\frac{G_c}{F_p}\right)_4 \right]^2 \right\}, \quad (9)$$

при варьировании влагосодержаний на выходе из первой, второй и третьей зоны: u_1, u_2, u_3 .

Очевидно, что минимум этой функции реализуется при максимальном значении исходной целевой функции и выполнении ограничения (4). По найденным оптимальным значениям влагосодержания из ограничений (5), (6) могут быть найдены оптимальные значения режимных параметров.

Поиск наилучшего значения α начинался при достаточно малом значении $\alpha=2$, после этого решение оптимальной задачи с обобщенным критерием повторялось при дальнейших различных значениях α . Эту процедуру повторяли до тех пор, пока «штраф» – фигурная скобка в (9) не стал достаточно малым. Расчеты показали, что величина α в уравнении (9) может быть принята $\alpha=20$. Поставленная задача нахождения минимума функции (9) решалась по методу последовательного квадратичного программирования [5] с помощью ЭВМ, в результате чего при заданных исходных параметрах в качестве «оптимального» получены следующие режимные параметры процесса:

1 зона – температура сушильного агента 120 °С, его скорость 2,7 м/с, удельная нагрузка на газораспределительную решетку $\frac{M_c}{F_p}=7,1$ кг/м²;

2 зона – температура сушильного агента 86 °С, его скорость 2,3 м/с, удельная нагрузка на газораспределительную решетку $\frac{M_c}{F_p}=10$ кг/м²;

3 зона – температура сушильного агента 77 °С, его скорость 1,7 м/с, удельная нагрузка на газораспределительную решетку $\frac{M_c}{F_p}=10$ кг/м²;

4 зона – температура сушильного агента 74 °С, его скорость 1,1 м/с, удельная нагрузка на газораспределительную решетку $\frac{M_c}{F_p}=10$ кг/м².

Текущие значения влагосодержания яблочных выжимок при переходе их из зоны в зону, в соответствии с принятой схемой оптимизации (рисунок 1) и обозначениями составляют:

$u_n=3,000$ кг/кг; $u_1=0,852$ кг/кг; $u_2=0,331$ кг/кг; $u_3=0,158$ кг/кг; $u_k=0,087$ кг/кг

Заключение

При использовании метода штрафных функций в результате численного расчета минимума функции Φ обеспечивается выполнение равенства производительностей по зонам с достаточной большой точностью. Представляется, что с помощью этого метода, не исключая другие возможности решения, достаточно удобно согласовывать заранее неизвестные величины производительностей каждой из зон многозонного аппарата.

Литература

- 1 Василенко, З.В. Исследование процесса сушки яблочных выжимок в виброкипящем слое / Василенко З.В., Никулин В.И., Соловьев А.И., Азарова Л.В. // Хранение и переработка сквашенного сыра. – 2009. – №5. – С. 10–12.
- 2 Донченко, Л.В. Технология пектина и пектиновых продуктов / учебное пособие для вузов / Л.В. Донченко. – М.: Дели, 2000. – 248 с.
- 3 Гинзбург, А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищ. пром-сть, 1973. – 528 с.
- 4 Измаилов, А.Ф. Численные методы оптимизации / Измаилов А.Ф., Солодов М.В. – М.: Физматлит, 2005. – 304 с.
- 5 Мэтьюз, Д. Численные методы. Использование MATLAB / Мэтьюз Д., Финк Г., Куртис Д. – М.: Вильямс, 2001. – 720 с.

Поступила в редакцию 29.03.2013