

А.Н. Поперечный /д.т.н./, Н.А. Миронова

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли
им. М. Туган-Барановского» (Донецк)

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЛОДОВЫХ КОСТОЧЕК ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ВИБРОКИПЯЩЕМ СЛОЕ

На основе анализа данных экспериментальных исследований процесса сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое установлена связь между скоростью сушки и влажностью исследуемого продукта, в результате получены уравнения обобщенных кривых скорости сушки плодовых косточек. Получены графики изменения числа Ребиндера в зависимости от влажностного содержания и теплового потока, поглощаемого косточками в процессе сушки. Знание кинетических закономерностей процесса сушки создает предпосылки для выявления рациональных режимов сушки и инженерного расчета промышленных сушильных установок.

Ключевые слова: кинетика сушки, плодовые косточки, инфракрасное излучение, виброкипящий слой.

Постановка проблемы

В условиях увеличения объема выпускаемой продукции в консервной промышленности остро стоит необходимость комплексного использования сельскохозяйственного сырья, более полного вовлечения вторичных материальных ресурсов в народное потребление.

Основными направлениями работы по обеспечению эффективного комплексного использования отходов консервной промышленности, в частности плодовых косточек, являются: организация малоотходных энергосберегающих технологий промышленной переработки продуктов питания с учетом их качества, разработки процессов и оборудования, обеспечивающих полное комплексное использование природных ресурсов и материалов.

Проблема сохранения и переработки плодовых косточек как ценного сырья для масложировой промышленности решается их сушкой на плодоовощных предприятиях.

Улучшение показателей процесса сушки плодовых косточек, в частности, сокращение расхода энергоресурсов, продолжительности протекания процесса с сохранением качества продукта возможно путем применения комбинированного способа с использованием инфракрасного (ИК) нагрева и виброкипящего слоя. При таком способе тепловой обработки достигается интенсивное перемешивание продукта, максимальная поверхность испарения, равномерное импульсное нагревание материала, что позволяет использовать высокие температуры, а также высушивать материал до низкой остаточной

влажности (1,7-5 %).

Анализ известных научных исследований в области применения инфракрасного нагрева и вибрации показывает, что механизм их влияния на многослойные пищевые продукты все еще далеко не изучен. В частности, это касается нагрева сложных биокolloидных многокомпонентных систем. К таким системам относятся также и плодовые косточки.

Кроме того, требует дополнительного изучения вопрос тепло-массообмена в плодовых косточках, а также их ядрах при воздействии на них инфракрасного излучения и вибрации, что позволит выявить рациональные параметры процесса сушки, разработать инженерную методику расчета сушилки, а также создать и внедрить способ и конструкцию промышленной сушильной установки с учетом вышеперечисленных потребностей.

Анализ последних исследований и публикаций

Теоретические основы тепло- и массообмена в процессах сушки пищевого растительного сырья и их аппаратное оформление отражены в работах А.В. Лыкова, М.В. Лыкова, П.Д. Лебедева, П.Г. Романкова, А.С. Гинзбурга, А.М. Голдовского, В.В. Белобородова, В.В.Красникова, В.Е. Куцаковой, В.Ф. Фролова, Е.П. Кошеного, Г.К. Филоненко, И.А. Рогова, Б.А. Вороненко и др. ученых.

Специфические свойства плодовых косточек как объекта сушки – неоднородность состава (наличие ядра, косточковой оболочки, воздуш-

ного пространства между ядром и оболочкой), естественная неоднородность косточек по размерам, массе и влажности, высокая прочность косточковой оболочки, влагоинерционность, низкая теплопроводность, термолабильность белковой и липидной частей косточки – предъявляют особые требования к способу сушки и к конструкции сушильных устройств [1-3].

Непосредственным исследованием процесса сушки плодовых косточек и их ядер посвящено всего несколько работ [4-6].

При сушке плодовых косточек с конвективным подводом теплоты в шахтных прямооточных барабанных сушилках явление термовлагопроводности препятствует перемещению влаги изнутри к поверхности ядер косточек, и интенсивность потока влаги равна разности между интенсивностью потока влаги в результате влагопроводности и интенсивностью потока влаги в результате термовлагопроводности. В барабанных сушилках процесс сушки происходит в перемешивающемся слое косточек, а сушильный агент выполняет дополнительную функцию по транспортированию их внутри сушилки [7]. Продолжительность пребывания в сушилке отдельных косточек может различаться на 30 %, что отрицательно влияет на равномерность их нагрева и сушку. Увеличивается количество обрубленных семян. Съём влаги составляет 2-4 % за один проход.

При сушке косточек в шахтных сушилках выявлен ряд существенных недостатков: неравномерность скорости движения внутри шахты и распределения сушильного агента в зонах сушки [8]. Следствием этого является неодинаковое и местами очень сильное нагревание косточек по всей ширине шахты, что приводит к ухудшению качества ядер и содержащегося в них масла.

Широкое применение для сушки вторичного сырья в пищевой промышленности имеет сушка ИК-излучением.

В работе [9] произведен системный анализ процесса тепловой обработки ядер плодовых косточек путем инфракрасного облучения, с целью изучения тепло-, массообменных биохимических явлений, протекающих в ядрах плодовых косточек.

В работе [10] авторы провели исследования процесса сушки лепестков ядер плодовых косточек абрикоса. Исследования проводились на экспериментальной установке, которая работает следующим образом. Лепестки ядер плодовых косточек через распределительный шнек загружаются на сетчатую ленту конвейера. Перед их поступлением в рабочую камеру регулируется толщина слоя продукта. При поступлении в пер-

вую зону установки продукт подвергается мощному импульсному воздействию инфракрасного облучения. При этом температура продукта достигает 50-55 °С в течение 50-60 с, далее начинается вторая зона, которую продукт проходит без тепловых воздействий в течение 50-60 с. В третьей зоне продукт подвергается тепловой обработке в течение 20-25 с, температура его достигает 80-85 °С, и так далее процесс продолжается 430-440 с, в течение которых продукт подвергается импульсному инфракрасному облучению. Несмотря на недостатки экспериментальной установки, проведенные исследования подтвердили хорошее качество высушенных ядер (по сравнению с ленточными и барабанными печами), высокую интенсивность процесса.

Среди преимуществ сушки инфракрасным излучением по сравнению с другими способами можно выделить следующие [11,12]:

- инфракрасные лучи преодолевают путь от источника излучения до объекта облучения в миллионные доли секунды, не встречая сопротивления приграничного слоя;

- инфракрасные лучи проникают на некоторую глубину в середину материала в зависимости от его оптической характеристики, что приводит к объемному поглощению энергии;

- применение инфракрасного излучения позволяет использовать плотность теплового потока возле поверхности обрабатываемого продукта больших величин, чем при очень интенсивных режимах конвективной теплоотдачи (в 30-70 раз);

- при правильной установке отражателей затраты излучаемой энергии сводятся к минимуму;

- обработка инфракрасным излучением повышает качество получаемого продукта в процессе правильно выбранных режимов сушки.

Значительное количество публикаций, которые посвящены экспериментальным исследованиям сушки вторичного растительного сырья, в частности плодовых косточек, подтверждают отсутствие одного или нескольких рациональных способов сушки и необходимость дальнейших поисков новых перспективных способов сушки и соответствующего оборудования.

Одним из таких способов является способ, в котором применяют перемещение продукта и комбинированный способ обработки инфракрасным излучением в виброкипящем слое.

Анализ движения продукта в виброкипящем слое при воздействии инфракрасных излучений показывает, что в хаотичном движении материала существует элемент периодичности. Продукт, который перемешивается в данном слое, кратковременно присутствует в зоне облучения, успе-

вая нагреться. При этом происходит испарение влаги с его поверхности. Пребывая вне зоны излучения, продукт охлаждается. Температурный градиент изменяет свое направление, совпадая с направлением градиента содержания влаги. В этот период термодиффузия способствует перемещению влаги – интенсифицирует процесс [13,14].

Высокая плотность теплового потока при инфракрасном излучении в виброкипящем слое обеспечивает быстрый нагрев и сушку пищевого сырья.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование кинетических закономерностей процесса сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое.

Основной материал исследования

Установление взаимосвязи между теплообменом и массообменом процесса сушки плодовых косточек при помощи критерия Ребиндера возможно путем использования основного уравнения кинетики сушки, которое позволяет рассчитать тепловой поток, поглощаемый продуктом в процессе сушки [15]:

$$q = \rho_0 R_v r_g \frac{du}{d\tau} (1 + Rb), \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность сухого продукта, кг/м³; R_v – отношение объема частиц продукта к площади испарения; r_g – удельная теплота испарения влаги продукта, кДж/кг; $du/d\tau$ – скорость сушки, %/с; Rb – число Ребиндера.

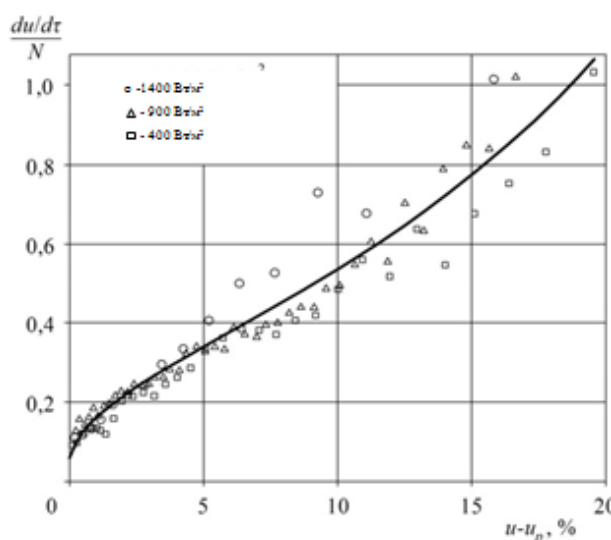
Первые две составляющие уравнения (1) являются практически постоянными величинами. Остальные три изменяются в процессе сушки и являются функциями влагосодержания продукта и его температуры. Поэтому расчет теплового потока проведем в три этапа.

Для построения кривых скорости сушки плодовых косточек [16] во втором периоде, исходя из их достаточно сложной формы, воспользуемся уравнением Г.К. Филоненко [17]:

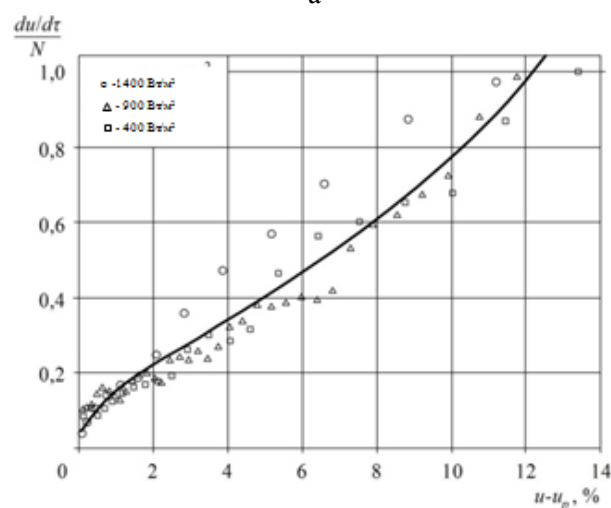
$$\frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u - u_p)^n}{A + B(u - u_p)^n}, \quad (2)$$

где N – скорость сушки в первом периоде; n – константа уравнения, которая определяется видом продукта; A и B – константы уравнения, которые зависят от размеров продукта, удельной нагрузки и потенциала сушки.

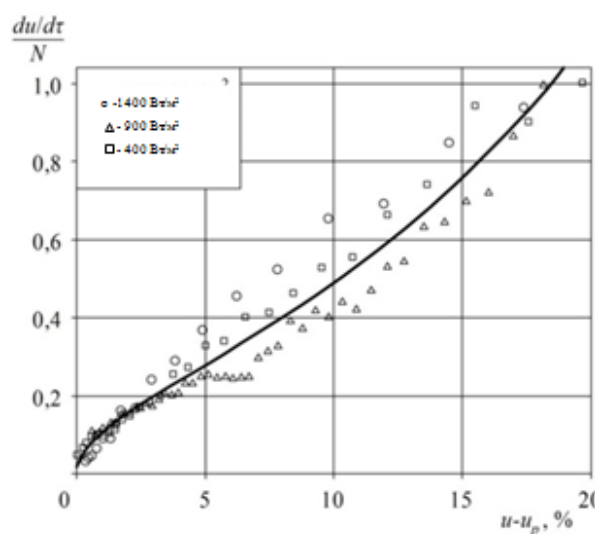
Для каждого исследуемого вида плодовых косточек нами рассчитаны уравнения обобщенных



а



б



в

Рис. 1. Обобщенная кривая скорости сушки плодовых косточек: а – абрикоса; б – вишни; в – черешни

кривых скорости сушки в координатах $(u-u_p)$ - $-(du/d\tau)/N$ по данным, приведенным в [16]. Эти кривые изображены на рис. 1.

Соответствующие вычисления проведены нами в математическом пакете Mathcad с помощью метода наименьших квадратов. Значения коэффициентов регрессии и показатели статистической оценки соответствующих уравнений приведены в табл. 1.

Таким образом, для второго периода сушки получены следующие уравнения обобщенных кривых скорости сушки:

– для косточек абрикоса

$$\frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u-u_p)^{0,198}}{11,77-5,6(u-u_p)^{0,198}};$$

– для косточек вишни

$$\frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u-u_p)^{0,365}}{9,59-2,85(u-u_p)^{0,365}};$$

– для косточек черешни

$$\frac{du/d\tau}{N} = \frac{(u-u_p)^{0,403}}{12,22-2,78(u-u_p)^{0,403}}.$$

Сравнение рассчитанного значения критерия Фишера с критическим для соответствующих степеней свободы свидетельствует об адекватности полученных уравнений.

Для вычисления продолжительности сушки до заданного конечного влагосодержания u_k воспользуемся выражением, которое Г.К. Филоненко получил в результате интегрирования уравнения (2):

$$\tau = \frac{1}{N} \left[\frac{(u_0 - u'_{kp}) + \frac{A}{1-n} \left[(u'_{kp} - u_p)^{1-n} - (u_k - u_p)^{1-n} \right] + B(u'_{kp} - u_k)}{1-n} \right], (2)$$

где u_0 – начальное влагосодержание, u'_{kp} – приведенное первое критическое влагосодержание, %; u – равновесное влагосодержание, %.

Для определения приведенного первого критического влагосодержания левая часть уравнения (2) была приравнена 1 и полученное уравнение с помощью логарифмирования преобразовано к следующему виду:

$$u'_{kp} = e^{\frac{\ln A}{1-n}} + u_p (4)$$

В табл. 2 представлены полученные по (4) значения приведенного первого критического влагосодержания.

Плодовые косточки содержат достаточно большую долю связанной влаги, для удаления которой, кроме теплоты парообразования, необходимо подвести теплоту, которая пойдет на разрушение связи влаги с продуктом (она численно равна энергии этой связи).

Для определения энергии связи влаги с продуктом воспользуемся методикой, приведенной в [18]. По этой методике энергия L , которую необходимо потратить для отрыва от продукта 1 моль воды, определяется уравнением, полученным П.А. Ребиндером из основных термодинамических отношений:

$$L = RT \ln \varphi_n, (5)$$

где $R=8,31$ Дж/(моль·К) – газовая постоянная; T – абсолютная температура сушильного агента (воздуха); φ_n – относительная влажность воздуха, которая соответствует влажности продукта в состоянии равновесия.

Зависимость относительной влажности воздуха от влажности продукта W_p определяется из изотермы десорбции. Для косточек абрикоса при температуре воздуха $T=293^\circ$ К (при этой температуре проводились наши экспериментальные исследования по сушке косточек абрикоса) изотерма десорбции определяется следующим уравнением [18]:

$$W_p = \begin{cases} \frac{30 + \varphi_n}{7,21} \text{ при } \varphi_n < 45\%, \\ \frac{6(\varphi_n - 45)}{48 - (\varphi_n - 45)} + 10,4 \text{ при } \varphi_n > 45\%. \end{cases} (6)$$

С учетом (6) уравнение (5) в пересчете на 1 кг воды принимает вид:

$$L = \begin{cases} RT \ln \left(\frac{100}{7,21W_p - 30} \right) \cdot \frac{1000}{18} \text{ при } W_p < 10,4\%, \\ RT \ln \left[\frac{100}{45 + \frac{48(W_p - 10,4)}{(W_p - 10,4) + 6}} \right] \cdot \frac{1000}{18} \text{ при } W_p > 10,4\%. \end{cases} (7)$$

Изменение удельной теплоты испарения влаги, которая равна сумме теплоты парообразования свободной влаги (2240 кДж/кг) и энергии связи влаги с продуктом, представлено на рис. 2 как функция влагосодержания продукта.

Табл. 1. Результаты вычислений коэффициентов регрессии уравнений обобщенных кривых скорости сушки плодовых косточек

| Вид косточек | Показатели | | | | | | |
|-------------------|------------|----------|----------|-------------------------------|------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| | <i>n</i> | <i>A</i> | <i>B</i> | Стандартное отклонение оценки | Коэффициент корреляции | Критерий Фишера | Критическое значение критерия Фишера |
| Косточки абрикоса | 0,198 | 11,77 | -5,6 | 0,068 | 0,959 | 500,9 | 3,1 |
| Косточки вишни | 0,365 | 9,59 | -2,85 | 0,065 | 0,958 | 364,7 | 3,14 |
| Косточки черешни | 0,403 | 12,22 | -2,78 | 0,057 | 0,966 | 376,9 | 3,11 |

Табл. 2. Приведенное критическое влагосодержание

| Вид косточек | Плотность теплового потока, Вт/м ² | | |
|-------------------|---|------|------|
| | 1400 | 900 | 400 |
| Косточки абрикоса | 23 | 23,9 | 27,9 |
| Косточки вишни | 14,3 | 15,2 | 18,2 |
| Косточки черешни | 20,4 | 20,8 | 25 |

Число Ребиндера определяли по формуле [1]:

$$Rb = \frac{c_n}{r_s} b, \quad (8)$$

где c_n – удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·К); $b=100dt/du$ – температурный коэффициент сушки.

Для определения температурного коэффициента сушки в координатах t_{cp} - u были построены температурные кривые, приведенные на рис. 3.

Среднеобъемная температура продукта t_{cp} определялась при этом по термограммам [19] в предположении параболического распределения температуры по сечению косточки и ее сферической формы [20,21].

С помощью графического дифференцирования построенных температурных кривых вычислялись значения температурного коэффициента для различных значений влагосодержания продукта.

Для определения удельной теплоемкости плодовые косточки рассматривались как продукт, состоящий из следующих составляющих: воды, масла, белков, углеводов и целлюлозы. Каждая i -тая составляющая имеет свое влияние на общую удельную теплоемкость пропорционально массовой доле ω_i в продукте:

$$c_n = \omega_w c_w + \omega_m c_m + \omega_b c_b + \omega_{ygl} c_{ygl} + \omega_c c_c, \quad (9)$$

где c_w – удельная теплоемкость воды; c_m – удельная теплоемкость масла; $c_b=c_{ygl}=1,41$ кДж/(кг·К) – удельная теплоемкость белков и углеводов [22]; $c_c=1,33$ кДж/(кг·К) – удельная теплоем-

кость целлюлозы [22].

Удельные теплоемкости воды и масла задавались как функции среднеобъемной температуры продукта. В первом случае использовались табличные данные (для промежуточных значений температуры удельная теплоемкость воды определялась с помощью интерполяции). Во втором случае использовалось следующее уравнение:

$$c_m = \begin{cases} 1,66(0,439 + 0,00185T_{cp}) & \text{при } 273 < T_{cp} < 363, \\ 1,66(0,275 + 0,0023T_{cp}) & \text{при } 363 < T_{cp} < 423, \end{cases} \quad (10)$$

где T_{cp} – абсолютная среднеобъемная температура продукта.

Графики изменения удельной теплоемкости косточек абрикоса в зависимости от текущего влагосодержания, которые построены по уравнению (9) с учетом массовых долей составляющих продукта (их значения приняты из [22]), приведены на рис. 4.

На основании графиков, приведенных на рис. 3 и 4, а также с помощью графического дифференцирования температурных кривых на рис. 5 представлены кривые изменения числа Ребиндера косточек абрикоса в процессе сушки.

Характер кривых для всех опытов одинаков – в начале процесса сушки число Ребиндера резко уменьшается от начального влагосодержания до влагосодержания 20-25 %. Этот участок отража-

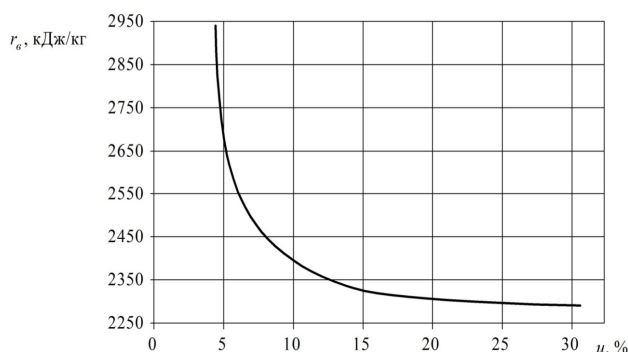


Рис. 2. График зависимости удельной теплоты испарения влаги из косточек абрикоса от влагосодержания

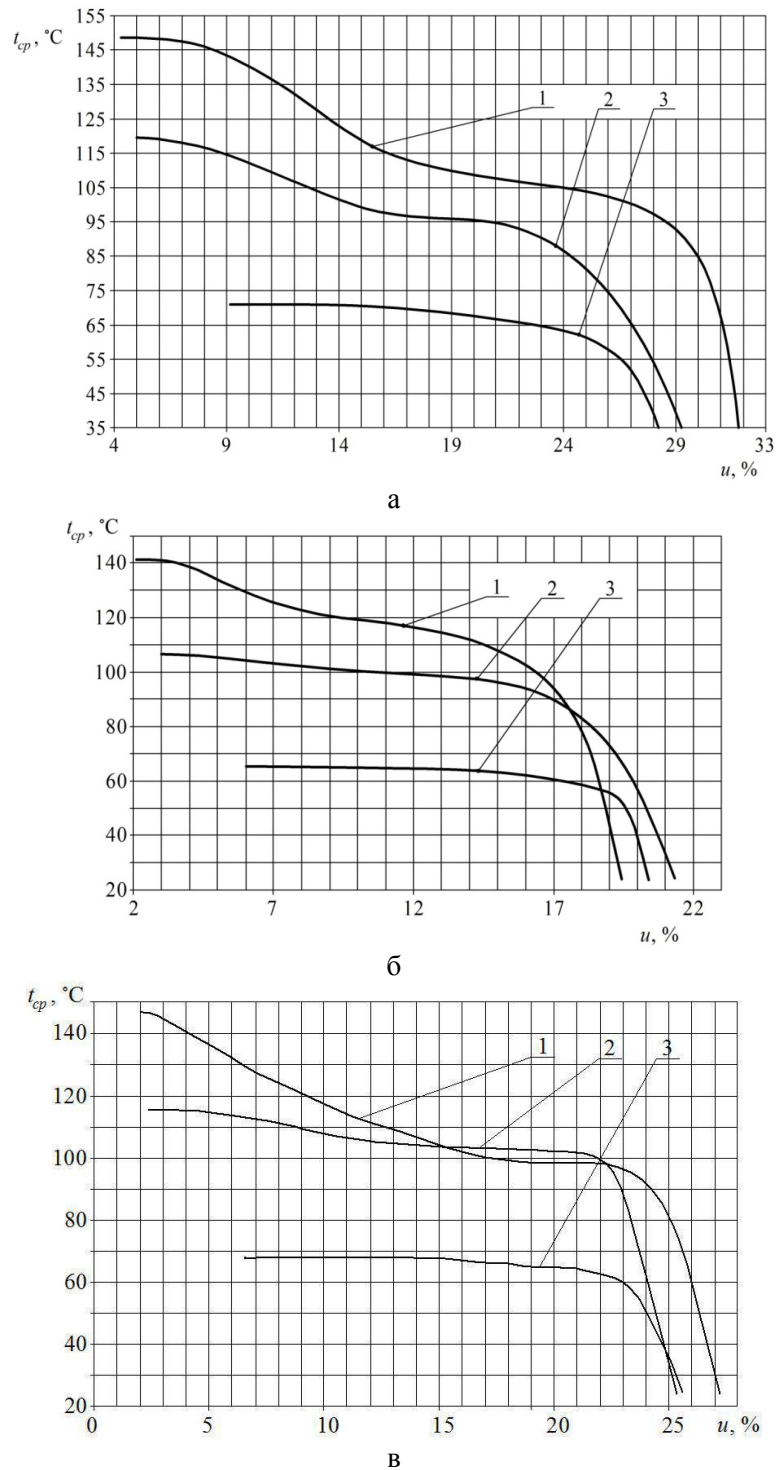


Рис. 3. Температурные кривые косточек абрикоса (а), вишни (б), черешни (в) при разных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения, Вт/м^2 :
 1 – 1400; 2 – 900; 3 – 400

ет период максимального расхода теплоты на нагрев продукта. Далее число Ребиндера медленно уменьшается к концу процесса. Для кривых 1 и 2 при влагосодержании около 15% имеет место локальный максимум, который соответствует началу второго участка интенсивного повышения температуры продукта на соответствующих температурных кривых [20,21]. Крутизна этого экстремума увеличивается с повышени-

ем плотности теплового потока инфракрасного облучения.

По определению, чем меньше значение числа Ребиндера, тем эффективнее осуществляется процесс сушки. Число Ребиндера при сушке в процессе прогрева продукта уменьшается, т.к. возрастает доля теплоты, подошедшая на испарение влаги.

Результаты, полученные ранее, позволили,

используя уравнение (1), рассчитать тепловой поток, поглощаемый косточками абрикоса в процессе сушки.

На рис. 6 приведены графики изменения этой величины в зависимости от влагосодержания продукта при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения. Все кривые имеют похожую форму – участок резкого уменьшения теплового потока в начале процесса соответствует интенсивному прогреву продукта, который сменяется участком плавного уменьшения теплового потока до равновесного влагосодержания. Для плотности теплового потока 1400 Вт/м² имеет место промежуточный горизонтальный участок, который отвечает периоду постоянной скорости сушки.

Снижение величины теплового потока, поглощаемого продуктом в процессе сушки, можно

объяснить повышением температуры продукта и, как следствие, уменьшением температурного напора между ним и излучателями, а также снижением влагосодержания продукта, который уменьшает коэффициент поглощения теплоты.

Выводы

Кинетические закономерности процесса сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое позволяют установить взаимосвязь между скоростью сушки и влагосодержанием продукта, изменение характера перемещения влаги внутри продукта в зависимости от влагосодержания, а также затраты теплового потока, поглощаемого косточками в процессе сушки. Полученные результаты могут быть использованы в инженерных расчетах промышленных сушильных аппаратов.

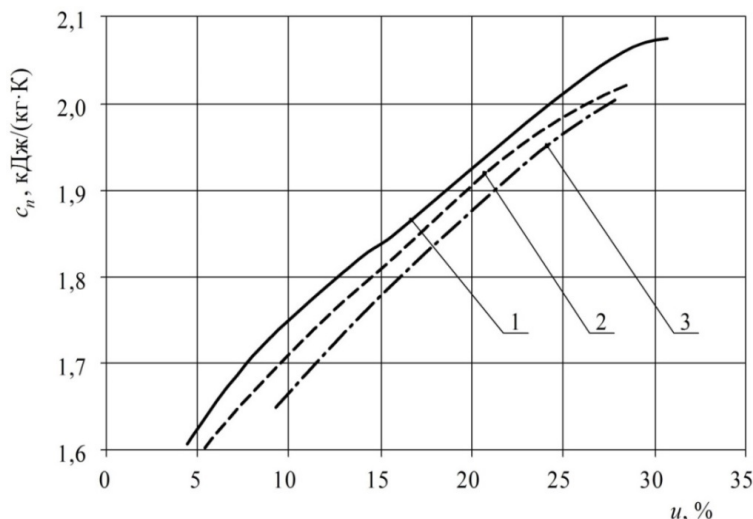


Рис. 4. Изменение удельной теплоемкости косточек абрикоса в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения, Вт/м²: 1 – 1400; 2 – 900; 3 – 400

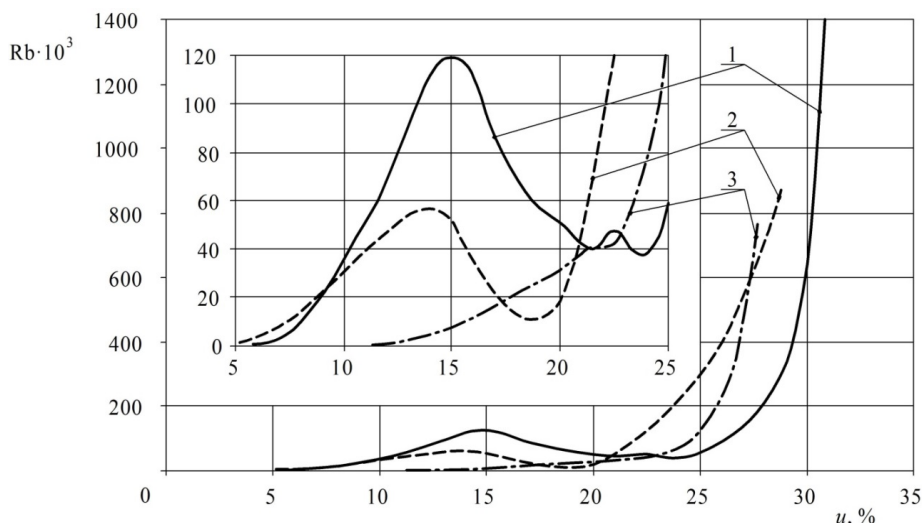


Рис. 5. Изменение числа Рейбиндера косточек абрикоса в процессе сушки при различных значениях плотности теплового потока инфракрасного облучения, Вт/м²: 1 – 1400; 2 – 900; 3 – 400

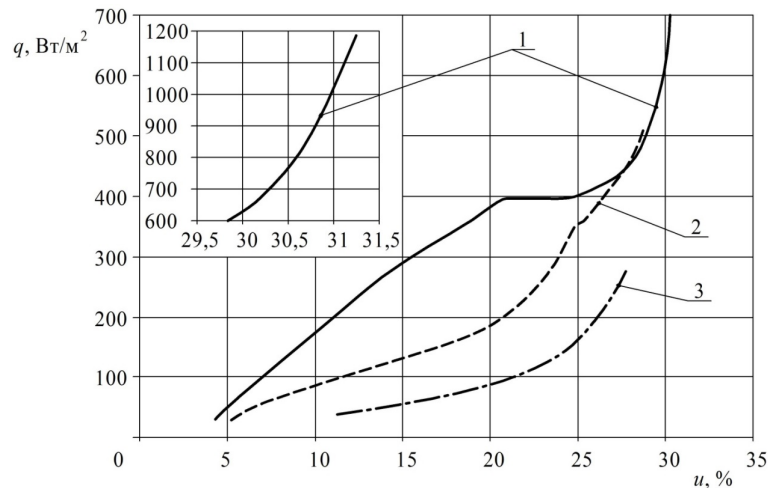


Рис. 6. Изменение теплового потока, поглощаемого косточками абрикоса в процессе сушки, в зависимости от плотности теплового потока инфракрасного облучения, Вт/м²:
1 – 1400; 2 – 900; 3 – 400

Список литературы

1. Филатов В.В. Исследования термической обработки капиллярно-пористых коллоидных материалов инфракрасным излучением // *Хранение и переработка сельхозсырья*. – 2010. – №5. – С. 16-23.
2. Завалий А.А. Устройства инфракрасной сушки термолабильных материалов // *Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сб. тр. V Межд. науч.-техн. конф.* – Иваново: Ивановский гос. хим. технолог. ун-т, 2014. – Т.1. – С. 91-96.
3. *Modern Drying Technology. Volume 5: Process Intensification* / Edited by Evangelos Tsotsas and Arun S. Mujumdar. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2014. – 372 p.
4. Шодиев С.С. Интенсификация процесса тепловой обработки косточковых маслосодержащих материалов с использованием нетрадиционных методов подвода энергии: дис. ... маг. техн. наук. – Бухара, 2010. – 81 с.
5. Алейникова А.В. Разработка метода и сушилки для сушки плодовых косточек: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Алейникова. – Киев, 1988. – 134 с.
6. Гафуров К.Х. Изменение биохимических свойств ядер плодовых косточек и качества масла при тепловой обработке // *Техника и технология пищевых производств: тезисы докладов IX Межд. науч.-техн. конф., 25-26 апреля 2013 г.* – Могилев: Могилевский гос. ун-т продовольствия, 2013. – С. 84.
7. Куцакова В.Е. Некоторые кинетические закономерности процесса сушки в барабанных агрегатах при кондуктивно-конвективном теплоподводе // *Журнал прикладной химии*. – 2012. – Т.3, Вып.1. – С. 146-150.
8. Атаназевич В.И. Сушка пищевых продуктов. – М.: ДеЛи, 2000. – 295 с.
9. Гафуров К.Х. Системный анализ процесса термообработки ядер плодовых косточек // *Техника и технология пищевых производств*. – 2011. – С. 62-63.
10. Гаджиев А.К. Исследование технологии комплексной переработки плодовых косточек: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.К. Гаджиев. – Ташкент, 1974. – 24 с.
11. Плаксин Ю.М. Аналитическое исследование полей энергетического облучения на поверхности изделий в инфракрасных установках: тез. докл. межд. конф. СЭТТ 2008. – М.: МГУПБ, 2008. – Т.1. – С. 66-68.
12. Безбах И.В. Повышение энергоэффективности технологической линии с применением комбинированного способа сушки / И.В. Безбах, Е.В. Воскресенская // *Наук. пр. ОНАХТ*. – 2008. – Вып.32. – С. 86-92.
13. *Drying in the Process Industry* / C.M. van't Land. – John Wiley & Sons, 2012. – 381 p.
14. Современные подходы к исследованию и описанию процессов сушки пористых тел / под ред. В.Н. Пармона. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – 300 с.
15. Лыков А.В. Теория сушки: учеб. пособие для высших технических учебных заведений. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
16. Поперечный А.Н. Кинетика сушки плодовых косточек инфракрасным излучением в виброкипящем слое / А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова // *Научный журнал НИУ ИТМО*. – 2015. – №1. – С. 142-149. (сер.: процессы и аппараты пищевых производств).
17. Филоненко Г.К. Сушка пищевых растительных материалов. – М.: Пищевая пром-ть, 1971. – 440 с.

18. Гинзбург А.С. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов: справочник / А.С. Гинзбург, И.М. Савина. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 280 с.
19. Влияние параметров сушки плодовых косточек на качество получаемого масла / А.Н. Поперечный [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. – 2016. – №2. – С. 3-12. (сер.: процессы и аппараты пищевых производств).
20. Сушка нетрадиционного пищевого и лекарственного сырья / А.Н. Поперечный [и др.]. – Краматорск: Каштан, 2016. – 250 с.
21. Drying of Plant Materials in a Vibro-Fluidized Bed with Infrared Heating / A.N. Poperechnyi, [et al.] // Academic message at the 4th edition of BIOATLAS Int. Conf., Transilvania University of Brasov, May, 15-17, 2014. – P. 66-70.
22. Щербаков В.Г. Биохимия и товароведение масличного сырья: учебник. – М.: Агропромиздат, 1991. – 304 с.

A.N. Poperechnyi /Dr.Sci. (Eng.)/, N.A. Myronova

Donetsk National University of Economics and Trade Named after M. Tugan-Baranovsky (Donetsk)

KINETIC REGULARITIES OF THE PROCESS OF FRUIT PITS DRYING BY INFRARED RADIATION IN A VIBRO BOILING LAYER

Background. *A mandatory step in the design of industrial installations for fruit pits drying by infrared radiation in a vibro boiling layer is the investigation of kinetic and quantitative regularities of the process that would allow accounting the initial characteristics of the product, the physical and chemical properties, type of connection of moisture with the material, and carry out the drying under conditions which provide a dried product with minimal residual moisture and conservation of valuable properties, in particular the quality of the oil contained in the kernels of fruit pits.*

Materials and/or methods. *Using the method of the reduced drying rate, on the basis of analysis of experimental investigations of the process of fruit pits drying by infrared radiation in a vibro boiling layer, established the relation between the speed of drying and the moisture content of the product, demonstrated how to determine the main indicators affecting the change of the drying process (the latent heat of vaporization, specific heat capacity, temperature coefficient, the number Reh binder, heat flux) depending on the heat flux density of the infrared radiation. The method of the reduced drying rate eliminates the influence of parameters of the agent on the drying process intensity. The dependence of the method of the reduced drying rate only on physical and chemical properties of the material and a type of connection with the material allows using the equation of the drying duration calculations for drying installations of any capacity. By integrating the formula of the reduced drying rate from the initial to critical moisture content the duration of the drying process is determined.*

Results. *The resulting equations of generalized curves of the drying rate of fruit pits allow calculating the change in drying rate depending on the moisture content of the product, as well as the duration of the process, studying the nature of the moisture transfer within the material depending on the temperature changes in the drying process.*

Conclusion. *The obtained results can be used in engineering calculations of industrial drying machines, as they allow establishing the relationship between the drying rate and the moisture content of the product, identifying the changing nature of moisture transfer within the product depending on the moisture content, the process duration and the heat flux absorbed by the pits in the course of drying.*

Keywords: *drying kinetics, fruit pits, infrared radiation, vibration.*

Сведения об авторах

А.Н. Поперечный

Эл. почта: obladrn@kaf.donduet.edu.ua

Н.А. Миронова

SPIN-код: 5375-8228

Телефон: +380 (50) 876-38-08

Эл. почта: mironova_nad@mail.ru

Статья поступила 10.12.2016 г.

© А.Н. Поперечный, Н.А. Миронова, 2016

Рецензент д.т.н., проф. А.Б. Бирюков