

УДК 644.8:658.562.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47777

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО- ЭФФЕКТИВНОЙ ИК-СУШИЛКИ ДЛЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

А. И. Черевко

Доктор технических наук, профессор*

Л. В. Киптелея

Доктор технических наук, профессор*

В. М. Михайлов

Доктор технических наук, профессор*

А. Е. Загорулько

Кандидат технических наук, доцент*

А. Н. Загорулько

Аспирант*

E-mail: match_andrey@mail.ru

*Кафедра процессов, аппаратов и автоматизации пищевых производств Харьковской государственной академии образования и торговли ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051

У зв'язку з погіршенням екологічної ситуації в Україні та інших Європейських країнах головною метою переробної промисловості є виробництво високоякісної сушеної продукції з великим вмістом біологічно активних речовин (БАВ). Оскільки існуюче технологічне обладнання для переробки рослинної сировини має високу продуктивність, тривалий період теплової обробки, що призводить до погіршення якості продукції, актуальним напрямком є розробка енергоефективних ІЧ-сушарок

Ключові слова: вітаміни, ІЧ-технологія, розробка, моделювання, без інерційність, динаміка, інтенсифікація, енергозбереження, рослинна сировина, струшування

В связи с ухудшением экологической ситуации в Украине и других Европейских странах главной целью перерабатывающей промышленности является производство высококачественной сушеной продукции с большим содержанием биологически активных веществ (БАВ). Поскольку существующее технологическое оборудование для переработки растительного сырья имеет высокую производительность, длительный период тепловой обработки, что приводит к ухудшению качества продукции, актуальным направлением является разработка энергоэффективных ИК-сушилок

Ключевые слова: витамины, ИК-технологии, разработка, моделирование, безынерционность, динамика, интенсификация, энергосбережение, растительное сырье, встряхивание

1. Введение

На сегодняшний день наблюдается ухудшение экологической ситуации в Украине и других Европейских странах, поэтому главной целью большинства отраслей перерабатывающей промышленности является создание современного пищевого оборудования, позволяющего производить высококачественную продукцию с большим содержанием биологически активных веществ (БАВ) [1]. Следует отметить, что именно использование ИК-технологий позволяет осуществлять «мягкий» режим тепловой обработки (45...60 °С) растительного сырья, тем самым сохраняя максимальное содержание БАВ в полученных полуфабрикатах с одновременной их стерилизацией.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Современное технологическое оборудование, применяемое для переработки растительного сырья, имеет высокую производительность, длительный период тепловой обработки, значительную энерго- и металлоемкость, что приводит к ухудшению качества готовой продукции [2, 3].

Известно, что одной из основных проблем при проектировании ИК-сушилок является достижение равномерного распределения теплового потока в рабочем объеме камеры от ИК-генератора на приемные поверхности (лотки с продуктом) без использования фокусирующих рефлекторов [4–6]. Также возникают сложности при автоматизации технологического процесса сушки за счет использования инерционных ИК-генераторов с различными спектрами поглощения и высокой температурой рабочей поверхности (свыше 250 °С), это затрудняет эксплуатацию аппаратов и снижает качество сушеных растительных полуфабрикатов [5, 7].

Следует также обратить внимание, что существующие сушильные аппараты в большинстве случаев не используют отработанный воздух для интенсификации процессов как непосредственно в аппарате, так и вспомогательных, а просто отводят нагретый воздух в окружающую среду [8].

3. Цель и задачи исследований

Целью работы является разработка современного мало энерго- и металлоемкого оборудования для производства сушеных растительных полуфабрикатов высокого качества.

Для реализации данной цели работы необходимо решить следующие задачи:

- исследовать современные ИК-генераторы и обосновать использование безынерционного пленочного электронагревателя (ПЛЭН);
- разработать ИК-сушилку с оптимальной формой рабочей камеры и смоделировать распределение теплового потока на приемной поверхности с помощью компьютерной программы TracePro;
- разработать на базе ИК-аппарата энергосберегающий комплекс и механизм для встряхивания сетчатых лотков.

4. Материалы и методы исследования процессов ИК-сушки

Во время проведения экспериментальных исследований процессов ИК-сушки растительного сырья была разработана экспериментальная вертикальная цилиндрическая ИК-сушилка с оптимальной формой рабочей камеры (рис. 1).

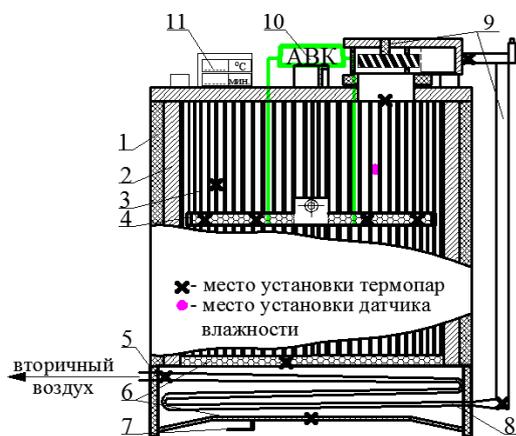


Рис. 1. Схема экспериментальной вертикальной цилиндрической ИК-сушилки с оптимальной формой рабочей камеры: 1 – цилиндрическая рабочая камера; 2 – теплоизолирующий листовой алюминий; 3 – ПЛЭН; 4 – лоток с сырьем; 5 – стойки; 6 – распределительная решетка; 7 – регулирующая задвижка; 8 – спиральный трубчатый теплообменник; 9 – вытяжная улитка с вентилятором и трубопроводом; 10 – аналого-весовой комплекс (АВК); 11 – регулятор температуры

Следует отметить, что предложенное расположение датчика влажности и термодпар в рабочей камере ИК-сушилки (рис. 1), позволяет максимально исследовать равномерность температурного поля на приемных поверхностях (сетчатых лотках). А данное расположение аналого-весового комплекса с ПК-интерфейсом позволяет в реальном времени наблюдать об изменение массы образцов растительного сырья в процессе ИК-сушки.

5. Результаты исследований процессов ИК-сушки растительного сырья

В современных ИК-аппаратах применяемых для сушки растительного сырья используют в основном

ТЕНы и кварцевые лампы. Недостатком указанных ИК-генераторов является: высокая температура рабочей поверхности; фиксированные геометрические размеры; значительная металлоемкость и необходимость использования фокусирующих рефлекторов.

Известно, что ИК-генераторы определяют в значительной мере технологические параметры проведения процесса сушки и тепловое воздействие на растительное сырье. При выборе современного и актуального типа ИК-генератора необходимо учитывать не только технологические, но и теплотехнические параметры (толщина нарезки и укладки, поглощающие и отражающие характеристики растительного сырья, и технические характеристики ИК-генераторов).

С технологической точки зрения целесообразно применять двухстороннее облучение, поскольку исчезает необходимость учета несимметричности лучистого теплообмена для верхней и нижней частей рабочей камеры

$$P = Q_p K_m \Omega, \quad (1)$$

где Q_p – результирующая интегральная плотность лучистого потока единичной мощности, Вт/м²; K_m – коэффициент, учитывающий требования технологического процесса (качество спектрального состава); Ω – энергетический показатель (коэффициент, характеризующий количество теплоты, передаваемой радиацией).

Величину Q_p определяют из уравнения (1) для облучения поверхности слоя растительного сырья:

$$Q_p = \frac{q_b D_{cb} A}{1 - RD_{cb}^2 R_b - (TRD_c)^2}, \quad (2)$$

где q_b – суммарный лучистый поток, излучаемый на слой сырья, как от ИК-генератора, так и в результате отражения, Вт/м²; R_b – отражающая способность отражателей, установленных на ИК-генератор; D_{cb} – пропускная способность паровоздушной среды в рабочей камере ИК-сушилки; R, A – отражательная и поглощающая способность поверхности слоя растительного сырья; R, D – среднее значение отражающей и пропускной способности сырья; D_c – среднее значение пропускной способности паровоздушной среды рабочей камеры ИК-сушилки.

Величину q_b определяют по уравнению:

$$q_b = \frac{q_u (1 + R_b)}{2}, \quad (3)$$

где q_u – лучевой поток, излучаемый ИК-генератором.

Указанные в уравнении (2) оптические характеристики являются усредненными значениями, которые определяются согласно спектру ИК-генератора [9]. Данное уравнение подтверждает, что паровоздушная среда при проведении технологического процесса ИК-сушки оказывает существенное влияние на теплопередачу лучистой энергии. Пропускная способность паровоздушной среды рабочей камеры ИК-сушилки зависит от углекислого газа, парциального давления паров воды, температуры окружающей среды и среднего значения пути излучения, проходящего лучевой поток от излучателя L_u и ограждающих конструкций рабочей камеры L_l к слою сырья, которое сушится.

Во время расчета энергетической эффективности работы излучателей величина Ω принимается равной лучезарному КПД ИК-генератора:

$$\eta_{\text{пром}} = \frac{P_{\text{пром}}}{P}, \tag{4}$$

где $P_{\text{пром}}$ – величина лучевого теплового потока ИК-излучателя; P – мощность, затрачиваемая ИК-генератором.

Данные расчеты позволяют при отсутствии всех экспериментальных данных провести предварительный расчет эффективности расположения ИК-излучателей. Так же следует отметить, что при выборе источника ИК-излучения необходимо учесть связь оптических характеристик объекта ИК-сушки со спектральной составляющей лучевого потока, это позволит эффективно управлять процессом сушки в необходимых технологических пределах, повышая качество полуфабриката и экономичность.

С целью снижения энерго- и металлоемкости ИК-генераторов предложено использовать современный безынерционный пленочный электронагреватель ПЛЭН (рис. 2), который способен создавать высокую плотность потока энергии в диапазоне длин волн от 9...15 мкм (рис. 3).



Рис. 2. Внешний вид ПЛЭН

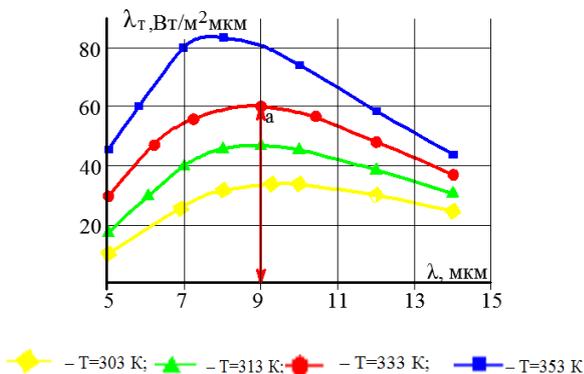


Рис. 3. Графическая зависимость спектральной плотности потока излучения от длины волны на поверхности ПЛЭН

Следует отметить, что ИК-генератор должен иметь четкую динамику нагрева и охлаждения, поскольку именно нагреватели с малой продолжительностью данных параметров уменьшают вспомогательное время для выхода на стационарный режим работы, тем самым не позволяя растительному сырью портиться в первые минуты сушки, тем самым сохранить БАВ с момента загрузки в рабочую камеру ИК-сушки.

Благодаря использованию системы автоматического управления (рис. 4), с помощью регулятора температуры ТРМ-200 для исследования продолжительности пауз, а также оценивалась динамика в циклическом режиме во время работы.

Для обеспечения эффективности процесса ИК-сушки была выбрана температура в пределах 52...58 °С, именно снижение температуры на 6 °С, позволяет сохранять длину ИК-волны нагревателя практически неизменной в пределах ошибки эксперимента.

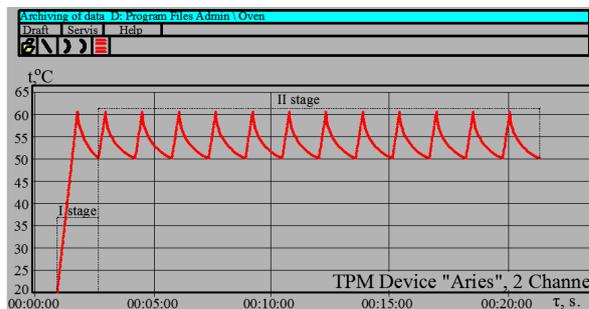


Рис. 4. Визуальное отображение процесса работы ИК-нагревателя ПЛЭН в циклическом режиме с помощью программы ТРМ «Oven»

Анализируя динамические характеристики ПЛЭН, можно сделать вывод, что данный тип электронагревателей является безынерционным, с монотонным переходным процессом. В свою очередь, это позволяет управлять температурным параметром в автоматическом режиме при выходе на постоянную мощность ИК-нагрева и рабочую длину волны излучения с продолжительностью 1 мин 45 с, при этом циклический режим позволит не только управлять градиентом температуры, но и получить экономию энергии.

Для исследования температурного потока на приемной поверхности в ИК-сушилках с оптимальной формой рабочей камеры, авторами предложено использовать компьютерную программу TracePro, которая основывается на физическом законе: угол падения теплового луча равен углу его отражения.

Данная компьютерная программа моделирует ход лучей в рабочей камере и на ее приемных поверхностях, а также позволяет указывать спектр теплового потока и мощность ИК-излучателей, что позволяет получить количественные характеристики тепловых потоков.

Перед моделированием в TracePro сначала устанавливается необходимая мощность ИК-излучателей и длина волны. После этого программа произвольно выбирает точки на поверхности излучателей и модулирует направление движения лучей, исходящих из них, а также автоматически вычисляет их траекторию. Пример компьютерного моделирования с распределения теплового потока на приемной поверхности в ИК-сушилках с оптимальной формой рабочей камеры приведен на рис. 5.

Полученные результаты компьютерного моделирования подтверждают равномерный прогрев всей приемной поверхности, следует также отметить, что незначительные цветовые переходы объясняются погрешностями метода вычислений программы TracePro и попадает в заданный диапазон погрешностей. При этом необходимо отметить 4 зоны более интенсивного теплового потока на приемной поверхности – это объясняется тем, что разработанная ИК-сушилка имеет 4 секции по 24 полосы карбоновых излучателей ПЛЭН (рис. 6), между которыми предусмотрено пространство, позволяющее нейтрализовать возможное электромагнитное поле от излучателей.

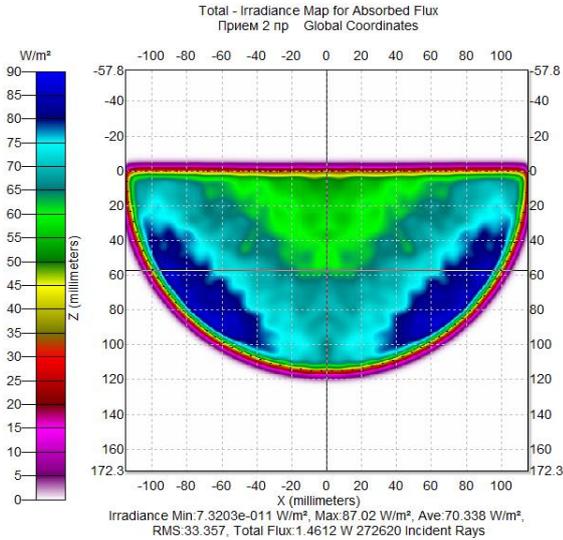


Рис. 5. Распределение теплового потока на приемной поверхности

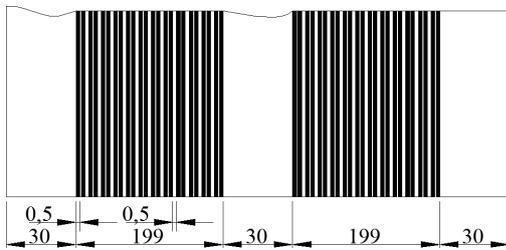


Рис. 6. Схема расположения секций карбоновых ИК-излучателей ПЛЭН

Проанализируем полученные экспериментальные графические данные компьютерного моделирования с выборочной траекторией ИК-лучей при использовании ПЛЭН (рис. 7), можно заметить, что наблюдается равномерное облучение верхней и нижней части приемной поверхности (сетчатого поддона) с шагом в 50 мм между ними. При уменьшении предложенного шага осложняется прохождение через сырье воздушного потока, уменьшая тем самым эффективность ИК-сушки. А увеличение данного шага с конструктивной точки зрения является нецелесообразным, поскольку это приводит к нецелесообразному использованию площади ИК-сушилки, а, следовательно, уменьшению ее загрузки. Также для обеспечения равномерного ИК-облучения верхнего и нижнего сетчатого поддона необходимо учитывать удаления их от не технологических зон примерно на 25 мм, это позволит создать рациональные условия для проведения процесса ИК-сушки, а также конструктивно рассчитать количество сетчатых поддонов.

Рассмотрим изменение относительной влажности растительного сырья при ИК-сушке (рис. 8) на примере яблок «Белого налива» в зависимости от формы их нарезки при температуре 50 °С и массе загрузки – 5 кг.

Во время анализа графика, можно сделать следующий вывод: максимальная скорость ИК-сушки яблок «Белого налива» наблюдается при нарезке формой параллелепипеда сечением 5х5 мм и кубиками 5х5х5 мм. Увеличение сечения параллелепипеда нарезанных яблок размерами 7х10 мм приводит к некоторому увеличению длительности процесса сушки.

Для интенсификации процесса сушки растительного сырья, авторами был разработан трубчатый спиральный энергосберегающий комплекс (рис. 9), который обеспечивает 100 %-использование отработанного воздуха для подогрева свежего, поступающего в рабочую камеру ИК-сушилки, тем самым уменьшая энергозатраты на проведение технологического процесса.

Был проведен теоретический расчет для определения количества тепла, которое передает от не изолированной алюминиевой трубы при следующих условиях параметров: $d_{тр}=10$ мм, $L_{тр}=2$ метра, тепловой напор $\Delta t=31,5$ °С.

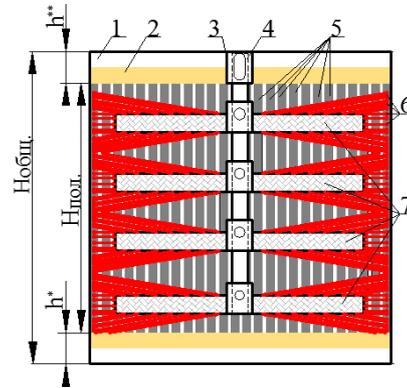


Рис. 7. Графическое изображение направления движения ИК-лучей в рабочей камере: 1 – зона фиксации ПЛЭН; 2 – зона подключения к электросети в виде медной шины; 3 – фиксатор штатива; 4 – штатив; 5 – ИК-генератор; 6 – направление ИК-лучей; 7 – сетчатые поддоны; h^* – техническая зона нижняя; h^{**} – техническая зона верхняя; $H_{пол}$ – зона полезной высоты ПЛЭН; $H_{общ}$ – общая высота ПЛЭН

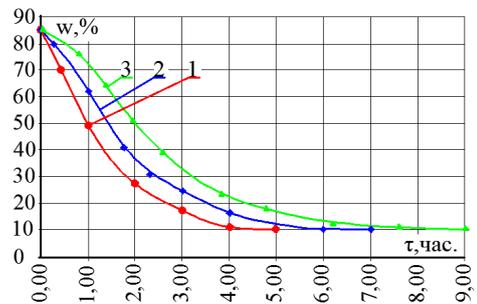


Рис. 8. Графики изменения относительной влажности яблок «Белого налива» при ИК-сушке и температуре 50 °С и формы нарезки: 1 – сечением 5х5 мм; 2 – кубиками 5х5х5 мм; 3 – сечением 7х10 мм

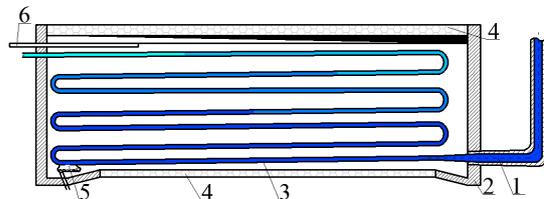


Рис. 9. Трубчатый спиральный энергосберегающий комплекс: 1 – теплоизолирующий трубопровод; 2 – термоизолирующая камера; 3 – трубчатый спиральный теплообменник; 4 – распределительная решетка; 5 – сборника конденсата; 6 – регулирующая задвижка

Предварительный расчет теплоотдачи:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t = 21,495 \cdot 0,628 \cdot 31,5 = 42,52 \text{ ккал/час} = 49,45 \text{ Вт,}$$

где Q – теплоотдача, ккал/час; K – коэффициент теплопроводности алюминиевой трубы, ккал/(м²·час·С); F – площадь поверхности нагрева трубы, м²; Δt – тепловой напор, °С;

Из литературных данных известно, что основным недостатком ИК-сушилок является ограничение по толщине сырья во время сушки, поэтому было предложено рассмотреть использование вибрационных механизмов для устранения этой проблемы, а также предотвратить слипание растительного сырья во время технологического процесса. Поскольку вибрационные механизмы редко используются в сушильных аппаратах за счет значительной металлоемкости и сложности механизмов, авторами было предложено заменить вибрационный механизм на разработанный встряхивающий механизм, который менее металлоемкий, и занимает незначительную часть полезной плоскости ИК-сушилки.

Разработанный встряхивающий механизм (рис. 10) с регулируемой частотой вращения мотора-редуктора от 2 до 15 об/мин. Во время экспериментальных исследований была определена достаточная частота вращения мотора-редуктора, которая составляет 4 об/мин., то есть каждые 15 с.

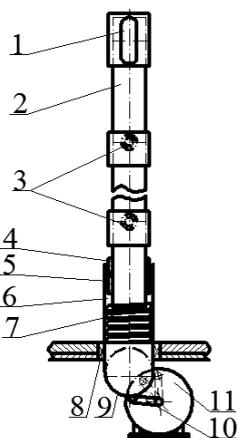


Рис. 10. Встряхивающий механизм: 1 – сквозное отверстие; 2 – штатив; 3 – отверстия для фиксации сетчатых поддонов; 4 – прямоугольный выступ; 5 – канавка для вхождения прямоугольного выступа; 6 – цилиндрический стакан; 7 – противоударная пружина; 8 – металлический фиксатор; 9 – цилиндрическая канавка; 10 – палец; 11 – мотор-редуктор

Полученные конструктивно-экспериментальные данные позволили спроектировать энергоэффективный промышленно-исследовательский образец вертикальной цилиндрической ИК-сушки "ВЦ-ИК-20" (рис. 11) [10]. Принцип работы аппарата "ВЦ-ИК-20" заключается в следующем: растительное сырье загружается на сетчатые лотки 14, которые фиксируются с помощью монтажной шпильки 16 на штативе 13.

После этого штатив с сетчатыми лотками устанавливается в фиксирующем устройстве 12 крышки 8 с затяжными фиксаторами и вытяжным вентилятором 10 и загружается в цилиндрическую вертикаль-

ную рабочую камеру ИК-сушилки 1, установленной на стойках 2, где сырье сушится при температуре 40...60 °С. Отработанный нагретый воздух подается вентилятором 10 установленным в вытяжной улитке по нагнетающему каналу 11 в трубчатый теплообменник 4 для подогрева поступающего свежего воздуха на 5 °С, а разработанный встряхивающий механизм 5 предназначенный для встряхивания сетчатых лотков 14 и предотвращает слипание растительного сырья.

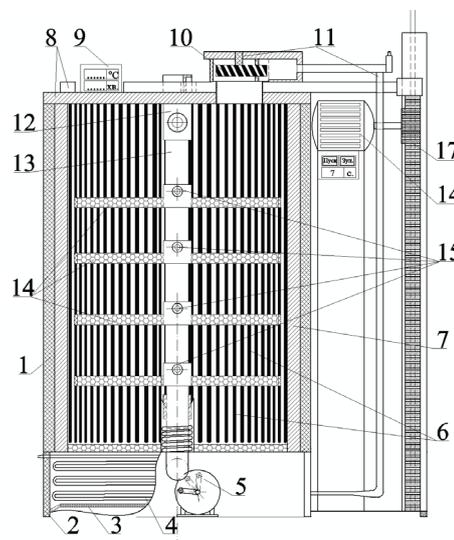


Рис. 11. Промыленно-исследовательский образец вертикальной цилиндрической ИК-сушки "ВЦ-ИК-20": 1 – вертикальная цилиндрическая рабочая камера; 2 – стойки; 3 – распределительная решетка для поступления свежего воздуха; 4 – трубчатый теплообменник; 5 – функциональный механизм, что встряхивает; 6 – продольные рабочей камере ИК-излучатели; 7 – отражающая фольга с теплоизолирующим листовым алюфомом; 8 – крышка с затяжными фиксаторами; 9 – блок САУ; 10 – вентилятор, установленный в вытяжной улитке соединенной с нагнетающим каналом – 11; 12 – фиксатор; 13 – штатив; 14 – сетчатые лотки; 15 – поднимающий механизм; 16 – монтажные шпильки; 17 – прямозубая направляющая

6. Обсуждение результатов экспериментальных исследований интенсификации процессов ИК-сушки растительного сырья

Во время экспериментальных исследований были определены преимущества при использовании разработанной энергоэффективной вертикальной цилиндрической ИК-сушилки:

– данная конструкция ИК-сушилки, уменьшает металлоемкость существующих конструкций сушильных аппаратов за счет не использования рефлекторов и, как следствие, габаритно-весовых характеристик аппарата;

– за счет разработанной вертикальной цилиндрической рабочей камеры аппарата обеспечивается максимально равномерное распределение тепловых потоков на приемных поверхностях (сетчатых лотках),

это позволяет значительно повысить эффективность процесса сушки;

– за счет мягкого обогрева при ИК-нагреве и одновременной стерилизации растительного сырья обеспечивается высокое качество полученного сушеного полуфабриката.

7. Выводы

В ходе проведенных исследований была разработана вертикальная цилиндрическая ИК-сушилка ("ВЦ-ИК-20"), которая обладает энерго- и ресурсосберегающими характеристиками для производства высококачественных сушеных растительных полуфабрикатов со значительным содержанием биологически активных веществ (БАВ), которые могут быть использованы в большинстве пищевых производствах, фармакологии, как примеси, так и в натуральном виде.

Благодаря предложенной разработчиками геометрической формы камеры (вертикальная цилиндрическая) обеспечивается максимальное равномерное температурное поле на приемных поверхностях (сетча-

тых лотках) как верхней, так и в нижней их площадях, что подтверждается компьютерным моделированием в программе TracePro.

С целью снижения энерго- и металлоемкости конструкции ИК-сушилки авторами предложено использовать в качестве ИК-генератора современный безынерционный пленочный электронагреватель (ПЛЭН) с длиной волны в 9 мкм, которая также является рациональной при ИК-сушке сырья растительного происхождения. Данный тип нагревателей является мало энергоемким, поскольку потребляет 210 Вт/час, а также позволяет создавать аппараты без рефлекторного типа, что является существенным преимуществом по сравнению с существующими аналогами.

Также для интенсификации процесса ИК-сушки в данном аппарате предложено установить встряхивающий механизм, для предотвращения слипания растительного сырья в процессе высушивания, а также увеличить толщину сырья, что очень важно при ИК-сушке. А благодаря разработанному энергосберегающему комплексу, вторичный (нагретый) воздух 100 %-но используется в аппарате для подогрева свежего (холодного) воздуха и его осушки.

Литература

1. Шаззо, Р. И. Продукты детского питания из растительного и мясного сырья инфракрасной сушки. Хранение и переработка сельхозсырья [Текст] / Р. И. Шаззо, Г. П. Овчарова. – 2005. – № 1. – С. 50–52.
2. Лебедев, П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок [Текст] / П. Д. Лебедев. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с.
3. Kolesnichenko, S. L. Solving the problem of achieving the food safety of population on the example of prepared apple sauce [Текст]: VII Mezinárodní vědecko-praktická conference / S. L. Kolesnichenko, N. Y. Sapozhnikova // Aktuální vymoženosti vědy. – Praha, 2011. – P. 77–80.
4. Касаткин, В. В. Сушка термолabileльных материалов на установках непрерывного действия [Текст] / В. В. Касаткин, И. Ш. Шумилова // Пищевая промышленность. – 2006. – № 10. – С. 12–13.
5. Алексанян, И. Ю. Высокоинтенсивная сушка пищевых продуктов. Пеносушка. Теория. Практика. Моделирование [Текст]: монография / И. Ю. Алексанян, А. А. Буйнов. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. – 380 с.
6. Черевко, А. И. Прогрессивные процессы концентрирования нетрадиционного плодоовощного сырья [Текст]: монография / А. И. Черевко, Л. В. Киптелея, В. М. Михайлов, А. Е. Загорулько. – Харьковский государственный университет питания и торговли, 2009. – 241 с.
7. Мачкаши, А. Лучистое отопление [Текст] / А. Мачкаши, Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.
8. Киптелея, Л. В. ИК-сушка плодоягодного сырья [Текст] / Л. В. Киптелея, А. Н. Загорулько // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Процессы и аппараты пищевых производств. – 2014. – Вып. 2. – С. 80–86.
9. Ружицкая Н. В. Комбинированные процессы при сушке растительного сырья [Текст] / Н. В. Ружицкая // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Т. 3, № 1 (5). – С. 23–24. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4731/4382>
10. ІЧ-сушарка органічної рослинної сировини. Патент № 106461 Україна, А23N 12/08 В01D 1/00 [Текст] / Черевко О. І., Киптелея Л. В., Загорулько А. М. – № а 2013 14949; заявл. 20.12.2013; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16. – 3 с.