

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /
 POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION
 УДК 664.8.039.51
 DOI: 10.26897/2687-1149-2020-3-55-59

АНАЛИЗ ТЕРМОГРАММ ИМПУЛЬСНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

ЗАВАЛИЙ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ, докт. техн. наук, доцент¹

E-mail: zavalym@mail.ru

ЛАГО ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА¹

E-mail: Luda_Lago@mail.ru

РЫБАЛКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ, младший научный сотрудник²

E-mail: alex_ark_simf@mail.ru

¹ Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского; 295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4

² Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма; 295493, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150

На основе анализа термограмм растительного сырья, подвергаемого импульсной инфракрасной сушке при постоянной температуре поверхности сырья с использованием релейного регулятора, установлена взаимосвязь изменения частоты срабатывания регулятора и кинетики влагоудаления из сырья. Термограммы, представляющие собой массивы численных значений моментов времени и температур в местах размещения термопар в высушиваемом сырье, подвергали процедуре цифровой фильтрации с использованием преобразования Фурье, реализованного в алгоритме быстрого преобразования Кули-Тьюки. В результате анализа получено, что изменение частоты срабатывания регулятора в процессе сушки описывается динамической моделью двухъёмкостного инерционного звена, характеризующего процесс влагоудаления из сырья как общее снижение содержания влаги в объёме сырья при наличии изменяющегося во времени градиента содержания влаги по глубине сырья. Окончание процесса сушки характерно снижением скорости роста частоты срабатывания релейного регулятора. Своевременное окончание процесса сушки позволяет снизить удельные затраты энергии и сохранить в продукте сушки большее количество биологически активных веществ.

Ключевые слова: растительное сырье, импульсная инфракрасная сушка, релейное регулирование, кинетика влагоудаления.

Формат цитирования: Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. Анализ термограмм импульсной инфракрасной сушки растительного сырья // *Агроинженерия*. 2020. № 3(97). С. 55-59. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-3-55-59.

THERMOGRAM ANALYSIS OF PULSE-TYPE IR DRYER

ALEKSEI A. ZAVALIY, Head of Department, DSc (Eng), Associate Professor¹

E-mail: zavalym@mail.ru

LYUDMILA A. LAGO¹

E-mail: luda_lago@mail.ru

ALEKSANDR S. RYBALKO, Junior Research Engineer²

E-mail: alex_ark_simf@mail.ru

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University; 295007, the Republic of Crimea, Simferopol, Vernadskogo Ave., 4

² Research Institute of Agriculture of Crimea; 295493, the Republic of Crimea, Simferopol, Kievskaya Str., 150

In the course of the study, the authors analysed the thermograms of plant raw materials that were dried in the pulse-type IR dryer at a constant surface temperature using a relay controller. Therefore, they identified the relationship between the changes in the frequency of the regulator functioning and the kinetics of moisture removal from raw materials. Thermograms, in the considered case, are arrays of numerical values of time points and temperature variations at those points of the dried raw materials where thermocouples are located. These thermograms were digitally filtered using the Fourier transform (FT) using the Cooley-Tukey algorithm. This analysis showed that the frequency of the regulator functioning during the drying process can be described as a dynamic model of a bi-capacity inertial link that characterizes the process of dehumidification as a general decrease in moisture content in the raw materials in the presence of a time-varying gradient of moisture content over the depth of the raw materials. The end of the drying process is characterized by a decrease in the frequency of the relay controller

operation. The timely finishing of the drying process allows reducing the waste of energy for drying and saving a larger amount of biologically active substances in the dried products.

Keywords: plant raw material, pulse infrared dryer, relay control, kinetics of moisture removal.

For citation: Zavaliy A.A., Lago L.A., Rybalko A.S. Thermogram analysis of pulse-type ir dryer // Agricultural Engineering, 2020; 3 (97): 55-59. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-3-55-59.

Введение. В разрабатываемых компактных шкафных многоярусных устройствах инфракрасной сушки растительного сырья в качестве источников теплового излучения используются высокотемпературные линейные галогеновые лампы накаливания [1]. Малая масса нити накала ламп определяет их малую тепловую инерционность. Применение таких источников позволяет использовать импульсные режимы теплового воздействия на высушиваемое сырье, задаваемые релейным законом регулирования. Эффективность импульсных режимов инфракрасной сушки растительного сырья как способа интенсификации процесса сушки исследована в работах [2-6]. В разработанном устройстве измерительным сигналом обратной связи регулятора служит температура поверхностного слоя сырья толщиной от 1 до 3 мм, измеряемая контактным преобразователем – термопарой типа К (хромель-алюмель) с открытым спаем диаметром 0,3...0,35 мм [7].

Сырьём для сушки являются фрукты, овощи, ягоды в виде целых или нарезанных ломтиками или дольками толщиной 4...9 мм плодов, размещенных на лотках устройства в 1...2 слоя.

Для контроля температуры сырья в эксперименте использовали такие же, как и для регулятора, термопары, чувствительные элементы (рабочие спаи) которых устанавливали в поверхностном слое сырья в плодах, размещённых на различных ярусах устройства сушки. Регистрация показаний термопар осуществлялась в памяти персонального компьютера с использованием специализированного 8-ми

канального контроллера с частотой опроса каждого канала 1 Гц. В результате получены термограммы процессов сушки различного сырья. На рисунке 1 представлена термограмма сушки ягод малины при заданных значениях температуры сырья 48°C и гистерезисе регулирования $\pm 1^\circ\text{C}$. На всех термограммах наблюдалось увеличение частоты срабатывания релейного регулятора в ходе сушки.

Очевидным обоснованием наблюдаемых процессов нагрева и охлаждения сырья в процессе сушки является наличие значительного количества теплоёмкой влаги в сыром материале и затрат энергии на испарение влаги в начальном периоде сушки и малое содержание влаги при окончании процесса сушки. Таким образом, частота срабатывания релейного регулятора является характерным признаком окончания процесса сушки. В период интенсивного влагоудаления частота растёт, а в конце процесса сушки стабилизируется, так как доступное для заданного теплового режима сушки количество влаги уже удалено из сырья. Своевременное окончание процесса сушки существенно влияет на энергоэффективность сушки: раннее окончание процесса не позволяет получить продукт длительного хранения, позднее окончание процесса приводит к дополнительным потерям качества продукта сушки и дополнительным затратам энергии [8]. Возможность использования частоты срабатывания релейного регулятора для определения момента окончания процесса сушки реализована в техническом решении, защищённом патентом РФ [9].

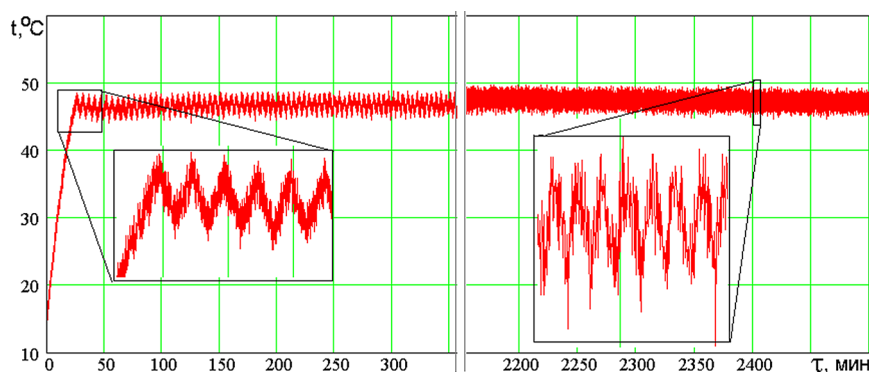


Рис. 1. Термограмма сушки ягод малины

Fig. 1. Thermogram of raspberry drying

Цель исследований: изучение характера изменения частоты срабатывания регулятора в ходе сушки и установление взаимосвязи изменения частоты срабатывания регулятора и кинетики влагоудаления из сырья.

Материал и методы. Исходными данными для установления характера изменения частоты срабатывания регулятора в ходе сушки являются термограммы, представляющие собой массивы численных значений

моментов времени и температур в местах размещения термопар, примеры которых приведены на рисунке 1. Для определения частоты необходимо знать моменты времени пиков периодически изменяющейся кривой температуры. Определение моментов времени пиков существенно затруднено, так как зарегистрированные сигналы термопар «зашумлены» пульсирующими помехами (рис. 1).

Для сглаживания массива данных температур использовали процедуру цифровой фильтрации с использованием преобразования Фурье, реализованного в алгоритме быстрого преобразования Кули-Тьюки [10]. В массиве данных выделяли выборки размером, кратным 2^n (n – натуральное число), затем устраняли тренд каждой выборки линией регрессии, вычисляли спектр мощности выборки прямым преобразованием Фурье, обнуляли в спектре мощность на частотах, превышающих частоты с наибольшей мощностью, вычисляли значения временного ряда с использованием обратного преобразования Фурье.

После получения сглаженной линии изменения температуры определение максимумов колебаний тривиально. На рисунке 2 представлен результат сглаживания с указанием точек максимумов выборки колебательного процесса изменения температуры для сушки ломтиков яблок при температуре 55°C с гистерезисом $\pm 1^\circ\text{C}$. Изменение частоты срабатывания регулятора в течение всего периода сушки представлено на рисунке 3. На графике представлены также экспериментально определенные значения влажности и затрат электроэнергии на испарение килограмма влаги в ходе сушки.

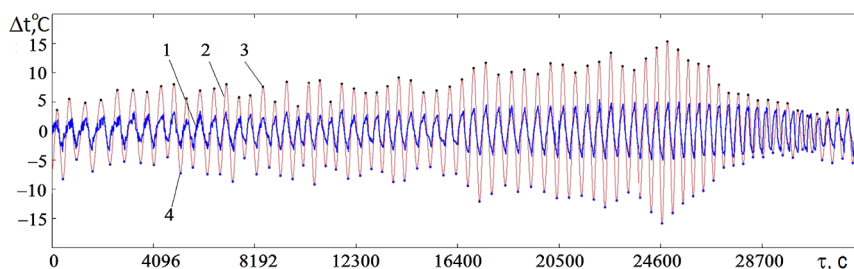


Рис. 2. Сглаживание данных термограммы:

- 1 – исходная термограмма (тренд устранен);
2 – сглаженная термограмма (для наглядности построена в увеличенном масштабе по оси ординат);
3 – точки максимумов колебаний; 4 – точки минимумов колебаний

Fig. 2. Smoothing thermogram data:

- 1 – initial thermogram (trend eliminated);
2 – smoothed thermogram (for clarity purposes, it is constructed on an enlarged scale along the ordinate axis);
3 – points of maximum oscillations; 4 – points of minimum oscillations

Результаты и обсуждение. В изменении частоты срабатывания реле в течение процесса сушки можно выделить три периода: первый период характеризуется постоянной частотой срабатывания реле, второй период – ростом частоты с увеличивающейся скоростью; третий период – ростом частоты с уменьшающейся скоростью, в котором частота срабатывания

реле асимптотически стремится к постоянному значению. Массив данных изменения частоты на рисунке 3 удовлетворительно описывается линией регрессии 2, представляющей собой сумму экспоненциальных зависимостей:

$$\nu(\tau) = 0,01063 \cdot e^{-0,455 \cdot 10^{-4} \cdot \tau} - 0,01611 \cdot e^{-0,285 \cdot 10^{-4} \cdot \tau} + 7,1834 \cdot 10^{-3}. \quad (1)$$

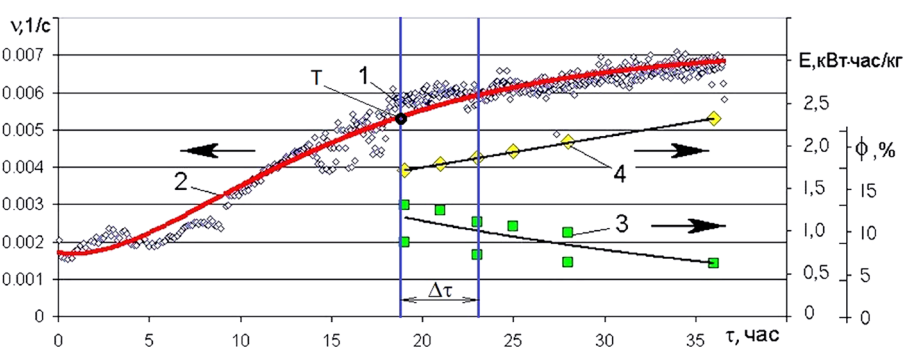


Рис. 3. Зависимость частоты срабатывания регулятора от времени для процесса сушки ломтиков яблок при температуре 55°C :

- 1 – экспериментальное значение; 2 – линия регрессии; 3 – влажность (экспериментальные значения и линия регрессии);
4 – затраты электроэнергии на испарение 1 кг влаги (экспериментальные значения и линия регрессии)

Fig. 3. Relationship between the response frequency of the regulator and time required for drying apple slices at a temperature of 55°C :

- 1 – an experimental value; 2 – a regression line; 3 – humidity (experimental values and a regression line);
4 – energy consumption for the evaporation of 1 kg of moisture (experimental values and a regression line)

Изменение частоты, описываемое моделью (1), соответствует двухъёмкостному динамическому звену,

отражающему процесс влагоудаления из подвергаемого сушке сырья при постоянной температуре его поверхности

как общее снижение содержания влаги в объёме сырья при наличии изменяющегося во времени градиента содержания влаги по глубине сырья. Полученный в эксперименте характер изменения частоты срабатывания реле и приведённое обоснование такого характера хорошо согласуется с изменениями температуры по глубине образцов сырья в ходе инфракрасной сушки при постоянном значении температуры поверхностного слоя сырья, описанными в [1]. Модель (1) для процесса сушки отражает также аналогию процессов массообмена и теплообмена теплопроводностью в телах симметричной формы (цилиндры, пластины) [11-13].

Приведённые на рисунке 3 данные изменения влажности и затрат электроэнергии показывают, что снижение скорости роста частоты срабатывания регулятора соответствует достижению достаточной для продукта сушки влажности в пределах 10...12% (интервал времени Δt на рисунке 3 от 18 до 23 часов). Характерной точкой, свидетельствующей о необходимости окончания процесса сушки, служит точка Т на рисунке 3, соответствующая максимуму темпа снижения скорости роста частоты срабатывания регулятора. Устойчивое наблюдение уменьшения темпа снижения скорости роста частоты срабатывания регулятора в течение некоторого времени (достаточного для

построения достоверной линии регрессии частоты срабатывания регулятора) свидетельствует о том, что сушка завершена. Следует отметить, что абсолютные значения частоты срабатывания регулятора не являются критерием окончания процесса сушки, так как зависят не только от влажности сырья, но и от размеров ягод или ломтиков, интенсивности вентиляции устройства сушки.

Выводы

1. При осуществлении инфракрасной сушки при постоянном значении температуры поверхности сырья с использованием релейного регулятора электрического питания источников теплового излучения частота срабатывания регулятора является признаком окончания процесса сушки.

2. Изменение частоты срабатывания регулятора в процессе сушки описывается динамической моделью двухёмкостного инерционного звена.

3. Окончание процесса сушки характерно снижением скорости роста частоты срабатывания релейного регулятора. Своевременное окончание процесса сушки позволяет снизить удельные затраты энергии и сохранить в продукте сушки большее количество биологически активных веществ.

Библиографический список

1. Завалий А.А., Снежкин Ю.Ф. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолabileльных материалов. Симферополь: ИТ «Ариал», 2016. 263 с.
2. Рудобашта С.П., Проничев С.А. Организация осциллирующего режима ИК-сушки зерна с помощью информационно-измерительной и управляющей системы // Хранение и переработка сельхозсырья. 2006. № 8. С. 72-75.
3. Григорьев И.В., Рудобашта С.П. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2009. № 4. С. 7-10.
4. Зуев Н.А., Рудобашта С.П., Зотова Е.Ю., Зуева Г.А. Стимуляция семян путём импульсной инфракрасной сушки // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 5. С. 27-29.
5. Рудобашта С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 8. С. 85-90.
6. Снежкин Ю.Ф., Боряк Л.А., Избасаров Д.С. Энергосбережение и интенсификация процесса сушки импульсным ИК-облучением // Промышленная теплотехника. 2001. № 4-5. С. 90-94.
7. Завалий А.А., Рыбалко А.С., Лаго Л.А. Устройство инфракрасной сушки сельскохозяйственного сырья при пониженном давлении // Аграрный вестник Урала. 2017. № 06 (160). С. 42-49.
8. Завалий А.А., Лаго Л.А. Исследование равномерности процесса инфракрасной сушки растительного сырья в многоярусном шкафом устройстве // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2019. Вып. № 17(180). С. 115-124.
9. Устройство для импульсной инфракрасной сушки термолabileльных материалов: патент № 193685 Российская

References

1. Zavaliy A.A., Snezhkin Yu.F. Razrabotka i teplovoye modelirovaniye ustroystv infrakrasnoy sushki termolabilelykh materialov [Development and thermal modeling of infrared drying devices for thermolabile materials]. Simferopol', IT «Ariyal», 2016: 263. (In Rus.)
2. Rudobashta S.P., Pronichev S.A. Organizatsiya ostsiliruyushchego rezhima IK-sushki zerna s pomoshch'yu informatsionno-izmeritel'noy i upravlyayushchey sistemy [Organization of the oscillatory mode of IR grain drying by means of an information-measuring and operating system]. *Storage and processing of farm products*, 2006; 8; 72-75. (In Rus.)
3. Grigor'yev I.V., Rudobashta S.P. Impul'snaya infrakrasnaya sushka semyan ovoshchnykh kul'tur [Pulse infrared drying of vegetable seeds]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2009; 4; 7-10. (In Rus.)
4. Zuyev N.A., Rudobashta S.P., Zotova Ye.Yu., Zuyeva G.A. Stimulyatsiya semyan putom impul'snoy infrakrasnoy sushki [Stimulation of seeds by the pulse infra-red drying]. *Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya*, 2012; 5; 27-29. (In Rus.)
5. Rudobashta S.P., Grigor'yev I.V. Impul'snaya infrakrasnaya sushka semyan ovoshchnykh kul'tur, netraditsionnykh i redkikh rasteniy [Pulse infrared drying of vegetable seeds, unconventional and rare plants]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2011; T. 33; 8; 85-90. (In Rus.)
6. Snezhkin Yu.F. Energoberezheniye i intensifikatsiya protsessa sushki impul'snym IK-oblucheniym [Energy saving and intensification of drying by pulsed IR irradiation]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2001; 4-5; 90-94. (In Rus.)
7. Zavaliy A.A., Rybalko A.S., Lago L.A. Ustroystvo infrakrasnoy sushki sel'skokhozyaystvennogo syr'ya pri ponizhenom davlenii [Device for infrared drying of agricultural raw materials under reduced pressure]. *Agrarian bulletin of the Urals*, 2017; 6(160): 42-49 (In Rus.)

Федерация, МПК7 F26B9/06 (2019.05); F26B3/30 (2019.05); F26B25/22 (2019.05) / А.А. Завалий, В.С. Паштецкий, В.С. Рутенко, А.С. Рыбалко, Л.А. Лаго; заявл. 20.03.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 32.

10. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.

11. Исаченко В.П. Теплопередача: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1975. 488 с.

12. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

13. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. 2-е изд., перераб. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1990. 256 с.

8. Zavaliiy A.A., Lago L.A. Issledovaniye ravnomernosti protsessa infrakrasnoy sushki rastitel'nogo syr'ya v mnogoyarusnom shkafnom ustroystve [Study of the uniformity of infrared drying of plant raw materials in a multi-tier cabinet device]. *Transactions of Taurida agricultural science*. 2019; 17(180): 115-124 (In Rus.).

9. Zavaliiy A.A., Pashtetskiy V.S., Rutenko V.S., Rybalko A.S., Lago L.A. Ustroystvo dlya impul'snoy infrakrasnoy sushki termolabil'nykh materialov: patent No. 193685 Rossiyskaya Federatsiya, МПК7 F26B9/06 (2019.05); F26B3/30 (2019.05); F26B25/22 (2019.05) [Device for pulsed infrared drying of thermolabile materials]: Patent RF No. 193685, 2019. (In Rus.)

10. Marpl-ml. S.L. Tsifrovoy spektral'niy analiz i yego prilozheniya [Digital spectral analysis and its application]. Translated from English. Moscow, Mir, 1990: 584. (In Rus.)

11. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat transfer]. ucheb. dlya vuzov. Moscow, Energiya, 1975: 488. (In Rus.)

12. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti [Theory of drying]. Moscow, Vysshaya shkola, 1967: 600. (In Rus.)

13. Yaryshev N.A. Teoreticheskiye osnovy izmereniya nestatsionarnoy temperatury [Theoretical grounds for the measurement of unsteady temperature]. 2nd ed., reviewed. L., Energoatomizdat, Leningr. otd-nie., 1990: 256. (In Rus.)

Критерии авторства

Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. выполнили теоретические исследования, на их основании провели эксперимент. Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 03.03.2020

Опубликована 29.06.2020

Contribution

A.A. Zavaliiy, L.A. Lago, A.S. Rybalko carried out the experimental work, summarized the material based on the experimental results, and wrote the manuscript. A.A. Zavaliiy, L.A. Lago, A.S. Rybalko have equal author's rights and bearequal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on March 3, 2020

Published 29.06.2020