

Инфракрасная сушка с применением конвекционно-вакуумной технологии для высушивания продуктов растительного происхождения

Д.Н. Савенков, А.А. Щербаков, Р.Э. Мехралиев, В.А. Сердюк

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону

Аннотация: В данной статье объектом изучения выступает сушка продуктов растительного происхождения в комбинированном сушильном аппарате с применением инфракрасного излучения, конвекции и пониженного давления. Процесс сушки продуктов в пищевой отрасли является актуальной и по сегодняшний день в связи с оптимизацией эффективности и уменьшения энергопотребления. В представленном экспериментальном исследовании используются следующие продукты: яблоки, болгарский перец, бананы. Толщина нарезки варьируется в пределах от 5 до 10 мм. Наблюдения показывают, что, при оптимальных параметрах и режимах сушки, возможность использования описываемой сушильной установки полностью целесообразна.

Ключевые слова: сушка, инфракрасное излучение, пониженное давление, конвекция, сушеные продукты, экспериментальная установка.

Сушка – это актуальный способ обработки продуктов животного и растительного происхождения, с обеспечением сохранности в них питательных и полезных свойств. Путем сушки достигается консервирование фруктов, овощей, зелени и мяса, уменьшающее не только объем, но и вес обрабатываемого сырья. Высушивание продуктов обеспечивает удаление жидкого компонента, основой которого является вода, однако в большинстве случаев испаряются и органические растворители [1].

Существуют различные способы сушки, они основаны на различных физико-механических методах переноса внутренней влаги в окружающее пространство. Основным ограничением в таких процессах является скорость испарения влаги из внутренней структуры продукта на его поверхность, а также изменение агрегатного состояния в окружающей среде, превращение в газообразную форму и переход в состав воздушной смеси вблизи продукта. Механизм такого переноса обусловлен количеством, формой и энергией связи влаги с материалом [2, 3].

Целью данного исследования является применение оптимальных параметров и режимов экспериментальной сушильной установки для сохранения полезных веществ в продукте и увеличения срока продолжительности хранения сырья.

Параметры и режимы сушки были определены в ходе экспериментальной части на плодах бананов, яблок и перца.

Проведение экспериментов осуществляли следующим методом:

1. Продукт сушки проходит предварительную подготовку в виде обмыва и очистки от испорченных (гнилых) частей от основной части [4].

2. Осуществляется нарезка плодов по следующим размерностям: бананы – кружками толщиной 7 – 10 мм; яблоки – кружками толщиной 5 – 8 мм; перец – кольцами толщиной 5 – 10 мм.

2. Происходит измерение массы и относительной влажности нескольких образцов продукта сушки, определяются средние значения данных показателей.

3. Отмеренная порция исследуемого продукта массой m загружается в сушильную камеру.

4. Запускается автоматизированный процесс сушки по заданным параметрам времени, температуры и внутрикамерному давлению (параметры изменяются под каждый вид продукта).

5. После завершения процесса, продукт сушки извлекается из камеры и остывает до комнатной температуры.

6. Образец сушеного продукта повторно проходит процесс измерения массы и относительной влажности, после чего отправляется на анализ качественных характеристик высушенного сырья [5, 6].

1. Измерение и регулирование параметров сушки происходит автоматически непосредственно во время работы установки. Для анализа физико-химических параметров сушеных продуктов были использованы

лабораторные методы, в соответствии с ГОСТ (ГОСТ Р 8.633-2007. - Инфракрасный термогравиметрический метод определения влажности) (по каждому сырью независимо), а также статистическая обработка полученных данных.

Для точного проведения экспериментальной части, параметры сушки различных продуктов подбираются индивидуально, в зависимости от разных физико-химических параметров сырья.

1. Рассчитывается и задается в программе коэффициент теплообмена, который определяется как отношение:

$$\alpha = \frac{\lambda_f}{y}, \quad (1)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности жидкости; y – толщина теплового пограничного слоя, величину которой связывают с толщиной гидродинамического пограничного слоя аналогией Рейнольдса [7].

2. Определяется загруженность камеры через взвешивание массы и измерения площади поверхности продукта, происходит расчет полезного объема сушки.

3. В зависимости от расположения верхнего и нижнего лотков, для наибольшего охвата и равномерного высушивания продукта, определяется положение ламп в камере и выставляются соответственно [8].

4. Вычисляется угловой коэффициент в соответствии с законом Ламберта:

$$dF = \frac{\cos \varphi}{2} d\phi, \quad (2)$$

где $\cos \varphi$ – угол между нормалью от источника к плоскости и вектором излучения; $d\phi$ – приращение угла.

5. Описывается процесс испарения, представленный функциональной связью скорости испарения с давлением водяного пара на поверхности и над поверхностью испарения:

$$U = C \cdot F \cdot (pn - pp)^m, \quad (3)$$

где F – площадь поверхности испарения; pn – давление насыщенных паров при температуре поверхности испарения; pp – парциальное давление водяного пара в воздухе над поверхностью испарения; C, m – коэффициенты, значения которых зависят от скорости движения воздуха над поверхностью испарения, геометрических размеров поверхности испарения и воздушного пространства над поверхностью продукта [9].

6. По завершению процедуры сушки, снимаются показатели в электрооборудовании и производятся расчеты затраченной тепловой мощности на испарение:

$$Q = \frac{U_r \cdot I}{S}, \quad (4)$$

где Q – тепловая мощность, Вт/м²; U – напряжение в цепи электропитания, В; I – сила тока, А; S – площадь поверхности испарения.

Для эффективного процесса сушки спроектирован и сконструирован сушильный аппарат периодического действия камерного типа, в основе которого происходит процесс инфракрасного нагрева продукта под пониженным внутрикамерным давлением и обдувом обрабатываемого сырья. Постоянное внутрикамерное пониженное давление поддерживается автоматически в области 0,5 атм. Камера оснащена инфракрасными источниками нагрева, представляющими из себя цилиндрические лампы накаливания температурой спирали 2500 °С. Электрическая мощность ламп составляет 800 Вт. Стенки камеры сделаны из нержавеющей стали, толщиной 3 мм. Внутренние стенки оборудованы отражателями, для наименьшей потери тепла. Воздух снаружи в камеру попадает через отверстие,

автоматически регулируемое заборным клапаном, расположенным на дне камеры. Воздух проходит по всему объёму нагретой камеры, через сетку лотка с продуктом и через 3 конфузора, расположенные в верхней части камеры. После сухой воздух насыщается испаренной влагой и попадает в вакуумный водокольцевой насос, который фильтрует смесь из камеры и выдает сухой, очищенный, горячий воздух. При продолжительной работе установки, нагретый воздух закольцовывается и не уходит в окружающую среду. Клапан забора воздуха автоматически закрывается, и температура обдува влажного продукта увеличивается, что приводит к ускоренной сушке сырья. Для принудительной циркуляции воздуха внутри герметичной камеры, у стенок камеры установлены вентиляторы общим объемным расходом 100 м³/час. В экспериментах была исследована убыль массы продукта сушки, температура внутри камеры и относительная влажность воздуха в камере. Рабочий диапазон измерений массы от 0 до 2000 г, температуры от 0 °С до 100 °С, относительной влажности воздуха от 1 % до 95 %. Разрешающая способность - 0,1 г; 0,1 °С; 0,1 %, соответственно. Погрешность измерения массы - $\pm 0,5$ г, температуры - $\pm 1,5$ °С, влажности 2 %. Экспериментальные данные регистрировались в память персонального компьютера с интервалом 5 с [10].

Основные достоинства и преимущества установки по сравнению с аналогичными сушильными аппаратами, это единовременная обработка продукта ИК-лучами под пониженным давлением, при котором высушивание продуктов осуществляется при более низких температурах, конвекция воздушных потоков внутри сушильной камеры, которая обеспечивает ускоренное удаление влажного воздуха с поверхности продукта, и полная автоматизация процесса сушки любого продукта растительного и животного происхождения по заранее вычисленным и программируемым параметрам [11]. Следует отметить, что автоматизация процесса сушки обеспечивает

наилучшее качество высушенного продукта и высокую точность измерительных показаний массы продукта, влажности, температуры и давления во время работы внутри камеры сушки [12].

На рис. 1 показан общий вид комбинированного сушильного аппарата камерного типа, периодического действия, с пониженным внутрикамерным давлением и обдувом высушиваемого продукта.



Рис. 1. – Общий вид инфракрасного сушильного аппарата камерного типа с пониженным внутрикамерным давлением. 1 – сушильная камера; 2 – ящик автоматизированного управления; 3 – водокольцевой вакуумный насос; 4 – резервуар с водой

В ходе исследований образцы растительного сырья помещаются на поднос, покрытый тефлоновой сеткой, защищающей продукт от пригорания.

На первых этапах сушки растительного сырья, были рассчитаны температура и время, при которых влажность продуктов становилась приемлемой для потребления [12].

Результаты экспериментов по определению относительной влажности продуктов от давления, интенсивности излучения инфракрасных ламп и скорости воздушного потока представлены в виде таблице 1 и рис. 2.

На рис. 2 показаны основные параметры сушки в режиме реального времени.

Из графика видно, что давление (P) снижается со 101 кПа до 60 кПа, после чего включаются инфракрасные лампы для прогрева продукта. При этом давление продолжает понижаться до его рабочего состояния – 50-55 МПа и сохраняет свое состояние в течение всего процесса сушки.

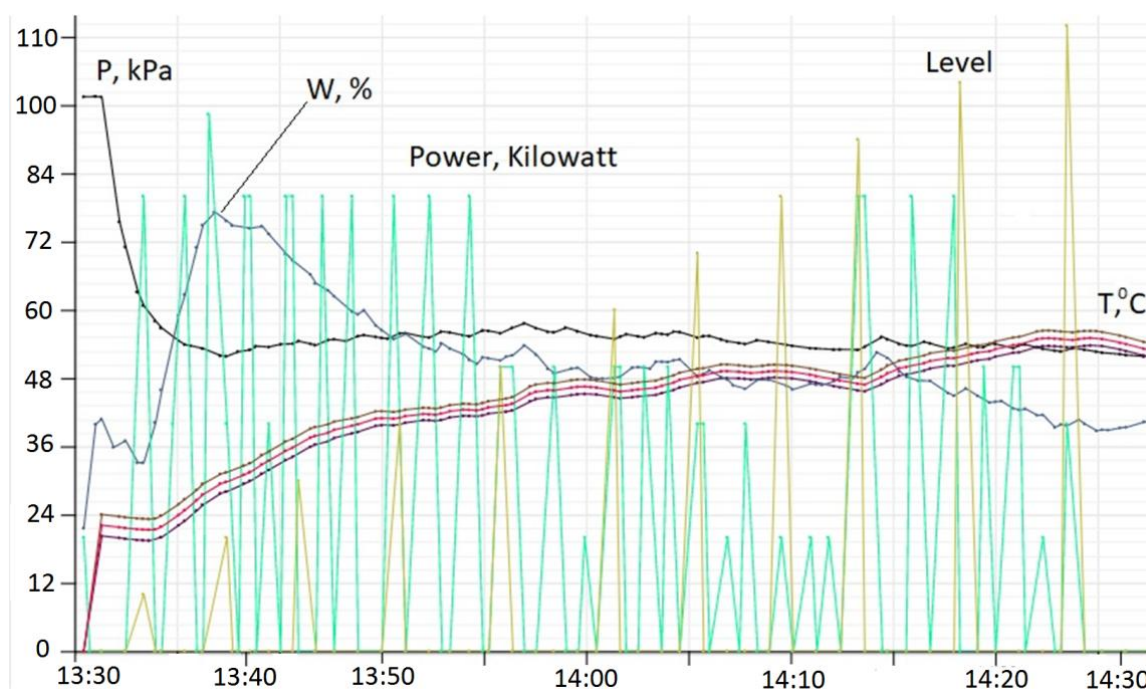


Рис. 2. – Параметры и показатели сушки в режиме реального времени

Относительная влажность воздуха во время откачки воздуха из вакуумной камеры уменьшается до 33 %, а после включения инфракрасных ламп увеличивается за счет испарения влаги из поверхности продукта сушки. Достигает своего предельного состояния 78 %, после чего постепенно падает. Это происходит за счет удаления молекул воздуха и паров жидкости водокольцевым насосом и увеличения температуры воздуха [13].

Температура остаточного воздуха в камере увеличивается в течении всего периода сушки с 20 °С до 55 °С.

Весь период сушки был разбит на 11 этапов, в каждом этапе имеется своя интенсивность нагрева ИК-ламп. Это необходимо для периодического воздействия интенсивностью ИК-ламп на продукт сушки.

По предварительным результатам сушки можно сделать вывод, что наибольший эффект получается при толщине продукта сушки в 5 мм., а при толщине продукта в 10 мм - наихудший. Это связано с тем, что чем толще продукт, тем влаге из внутренней части продукта труднее дойти до его поверхности и основная ее часть остается внутри продукта. Более того, визуально было установлено, что при толщине нарезки банана в 10 мм., на его поверхности образуется пленка, которая препятствует проникновению влаги на его поверхность и сам банан начинает «вариться».

В таблице 1 показана потеря относительного веса продукта после сушки различных продуктов в зависимости от их толщины.

Таблица № 1

Потеря веса после сушки в зависимости от толщины продукта

Толщина, мм	Продукт	Вес до, гр	Вес после, гр	Потеря веса, %
5	Перец	79,84	23,43	70,65
	Яблоко	116,7	35	70,01
	Банан	51,7	17,57	66,02
10	Перец	96,47	52,6	45,48
	Яблоко	84,12	54,1	35,69
	Банан	79,86	57,5	28,00

Вывод. Первые эксперименты показали повышенную эффективность сушки, в которой комбинированы способы сушки инфракрасным излучением и конвекцией с использованием пониженного внутрикамерного давления.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на составление полнофакторного эксперимента, где варьируемыми факторами будут давление, интенсивность излучения инфракрасных ламп, скорость

воздушного потока, а функциями отклика – энергопотребление и количественная сохранность полезных веществ в продукте.

Наибольший эффект получается при толщине продукта сушки в 5 мм., а при толщине продукта в 10 мм - наихудший. Перец уменьшился в весе с 79,84 гр. до 23,43 гр., что составляет потерю веса на 70,65%.

Литература

1. Сахно В.И., Горшкова М.М., Акулин В.Н. Патент РФ № 2115321 С1, МПК А23В 4/03. Способ сушки пищевых продуктов и устройство для его осуществления / - Оpubл. 20.07.1998. – С 6.

2. Завалий А.А., Лаго Л.А., Рыбалко А.С. Устройство инфракрасной сушки сельскохозяйственного сырья при пониженном давлении // АБУ. 2017. №6 (160). URL: cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-infrakrasnoy-sushki-selskohozyaystvennogo-syrya-pri-ponizhennom-davlenii (дата обращения: 11.06.2021).

3. Алексанян И.Ю., Давидюк В.В., Артемьева Н.Н. Новые технологии сухих продуктов животного и растительного происхождения // Известия вузов. Пищевая технология. 1998. №2-3. URL: cyberleninka.ru/article/n/novye-tehnologii-suhih-produktov-zhivotnogo-i-rastitelnogo-proishozhdeniya (дата обращения: 19.08.2021).

4. Юнин В.А., Зыков А.В., Захаров А.М., Перекопский А.Н. Исследование сушильной установки барабанного типа с инфракрасным источником тепла // МНИЖ. 2020. №6-1 (96). URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sushilnoy-ustanovki-barabannogo-tipa-s-infrakrasnym-istochnikom-tepla (дата обращения: 02.09.2021).

5. Пузырев Е.М., Афанасьев К.С., Голубев В.А. Разработка шахтных воздухонагревательных установок нового типа // Уголь. 2021. №5 (1142). URL: cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-shahtnyh-vozduhonagrevatelnyh-ustanovok-novogo-tipa (дата обращения: 11.11.2021).

6. Гришин А.М., Голованов А.Н., Долгов А.А., Лобода Е.Л., Барановский Н.В., Русаков С.В. Экспериментальное и теоретическое исследование сушки лесных горючих материалов // Известия ТПУ. 2002. №2. URL: cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-i-teoreticheskoe-issledovanie-sushki-lesnyh-goryuchih-materialov (дата обращения: 11.11.2021).

7. Ермольев Ю.И. Основы научных исследований в сельскохозяйственном машиностроении: учеб, пособие. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. – С 276.

8. Erbay Z., Icier F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Crit Rev Food Sci Nutr* 50:441–464.

9. Datta A.K., Ni H. (2002) Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. *J Food Eng* 51: 355–364.

10. Baptestini F.M., Correa P.C., Oliveira GHHD, Botelho F.M., Oliveira APLRD (2017) Heat and mass transfer coefficients and modeling of infrared drying of banana slices. *Revista Ceres* 64:457–464.

11. Nowak D., Lewicki P.P. (2004) Infrared drying of apple slices. *Innov Food Sci Emerg* 5:353–360.

12. Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R., Chen G. (2019) The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *J Food Eng* 241:75–87.

13. Lukyanov A.D. i dr. Potato thin layer convective dehydration model and energy efficiency estimation. // *E3S Web of Conferences* 273, 07028 (2021), «Interagromash 2021». 2021. – pp. 3-8.

References

1. Saxno V.I., Gorshkova M.M., Akulin V.N. Patent RF № 2115321 S1, МПК А23V 4/03. Sposob sushki pishhevy`x produktov i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya [Method for drying food products and device for its implementation]. Opubl. 20.07.1998. p. 6.

2. Zavalij A.A., Lago L.A., Ry`balko A.S. AVU. 2017. №6 (160). URL: cyberleninka.ru/article/n/ustroystvo-infrakrasnoy-sushki-selskohozyaystvennogo-syrya-pri-ponizhenom-davlenii (date assessed 11.06.2021).
 3. Aleksanyan I.Yu., Davidyuk V.V., Artem`eva N.N. Izvestiya vuzov. Pishhevaya texnologiya. 1998. №2-3. URL: cyberleninka.ru/article/n/novye-tehnologii-suhih-produktov-zhivotnogo-i-rastitelnogo-proishozhdeniya (date assessed: 19.08.2021).
 4. Yunin V.A., Zy`kov A.V., Zaxarov A.M., Perekopskij A.N. MNIZh. 2020. №6-1 (96). URL: cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sushilnoy-ustanovki-barabannogo-tipa-s-infrakrasnym-istochnikom-tepla (date assessed: 02.09.2021).
 5. Puzy`rev E.M., Afanas`ev K.S., Golubev V.A. Ugol`. 2021. №5 (1142). URL: cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-shahtnyh-vozduhonagrevatelnyh-ustanovok-novogo-tipa (date assessed 11.11.2021).
 6. Grishin A.M., Golovanov A.N., Dolgov A.A., Loboda E.L., Baranovskij N.V., Rusakov S.V. Izvestiya TPU. 2002. №2. URL: cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-i-teoreticheskoe-issledovanie-sushki-lesnyh-goryuchih-materialov (date assessed: 11.11.2021).
 7. Ermol`ev Yu.I. Osnovy` nauchny`x issledovanij v sel`skoxozyajstvennom mashinostroenii [Fundamentals of scientific research in agricultural engineering: textbook, manual]: ucheb, posobie. Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2013. P. 276.
 8. Erbay Z., Icier F. 2010. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. Crit Rev Food Sci Nutr 50:441–464
 9. Datta A.K., Ni H. 2002. Infrared and hot-air-assisted microwave heating of foods for control of surface moisture. J Food Eng 51: 355–364.
 10. Baptestini F.M., Correa P.C., Oliveira GHHD, Botelho F.M., Oliveira APLRD 2017. Heat and mass transfer coefficients and modeling of infrared drying of banana slices. Revista Ceres 64:457–464.
-



11. Nowak D., Lewicki P.P. (2004) Infrared drying of apple slices. *Innov Food Sci Emerg* 5:353–360.
12. Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R., Chen G. 2019. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. *J Food Eng* 241:75–87.
13. Lukyanov A.D. i dr. *E3S Web of Conferences* 273, 07028 (2021), «Interagromash 2021». pp. 3-8.