

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 631.365.34:001.8

doi: 10.15507/2658-4123.033.202303.417-434


Оригинальная статья



Исследование влияния режимных параметров ленточной ИК-сушилки на кинетику процесса сушки моркови

А. В. Гаврилов , **Ю. Б. Гербер**

*Агротехнологическая академия Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского
(г. Симферополь, Российская Федерация)*

 tehfac@mail.ru

Аннотация

Введение. При конвективной сушке возникает противоречие между скоростью сушки и энергоэффективностью. Одно из решений этого противоречия – использование адресного подведения энергии к продукту. Таким методом адресного подвода энергии является применение в процессе сушки электромагнитного излучения. ИК-излучение позволяет передать энергию непосредственно к продукту, избегая нагрева больших объемов промежуточного теплоносителя (сушильного агента).

Цель статьи. Получить коэффициенты логарифмической модели для расчета производительности ленточной ИК-сушильной установки для сушки моркови.

Материалы и методы. Исследования проводились на модульной ленточной ИК-сушилке с возможностью регулирования скорости ленты и мощности излучателей. Для описания процесса использованы стандартные модели зависимости относительного влагосодержания от времени сушки.

Результаты исследования. Анализ кривых скорости сушки показал наличие влияния экстремального характера скорости ленты на скорость сушки. При скоростях ленты выше 10 мм/с увеличение скорости приводит к увеличению продолжительности процесса сушки. Для описания кинетики процесса сушки при значениях мощности ИК-излучения 170, 300 и 450 Вт была использована логарифмическая модель, как наиболее адекватно описывающая экспериментальные данные.

Обсуждение и заключение. Рекомендуется использовать в сушилке данного типа скорость ленты около 10 мм/с. Полученные коэффициенты логарифмической модели используются для расчета производительности установки. Целесообразно получить аналогичные данные для определения рациональных параметров процесса сушки сжогого плодово-овощного сырья и исследовать комбинированное влияние ИК- и СВЧ-излучения на кинетику и энергетику процесса сушки.

© Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: инфракрасная сушка, коэффициент диффузии, влагосодержание, ленточная сушилка, скорость ленты, кинетика процесса сушки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гаврилов А. В., Гербер Ю. Б. Исследование влияния режимных параметров ленточной ИК-сушилки на кинетику процесса сушки моркови // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 3. С. 417–434. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.417-434>

Original article

Investigating the Influence of the Belt IR Dryer Regime Parameters on Kinetics of Carrot Drying Process

A. V. Gavrilo[✉], Yu. B. Gerber

Academy Agrotechnological of the V. I. Vernadsky
Crimean Federal University (Simferopol, Russian Federation)

✉ tehfac@mail.ru

Abstract

Introduction. In the process of convective drying, there is a contradiction between drying speed and energy efficiency. One of the solutions to this contradiction is the use of targeted energy supply to the product. The method of targeted energy supply is the use of electromagnetic radiation in the drying process.

Aim of the Article. The study was aimed at obtaining the coefficients of a logarithmic model for calculating the performance of a belt IR dryer for drying carrots.

Materials and Methods. There were studied a modular belt IR dryer with the ability to control the speed of the belt and the power of the emitters. To describe the process, there were used standard models of the dependence of relative water content on drying time.

Results. An analysis of the drying rate curves showed an extreme effect of the belt speed on the drying rate. At belt speeds above 10 mm/s, an increase in belt speed leads to an increase in the duration of the drying process. To describe the kinetics of the drying process at IR powers of 170, 300, and 450 W, there was used a logarithmic model, as it most adequately describes the experimental data.

Discussion and Conclusion. For this type of dryers it is recommended to use the belt speed of about 10 mm/sec. The obtained coefficients of the logarithmic model are used to calculate the capacity of the drying unit.

Keywords: infrared drying, diffusion coefficient, water content, belt dryer, belt speed, the kinetics of the drying process

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gavrilo A.V., Gerber Yu.B. Investigating the Influence of the Belt IR Dryer Regime Parameters on Kinetics of Carrot Drying Process. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(3):417–434. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.417-434>

Введение

В настоящее время большая часть обезвоженных фруктов и овощей производится методом конвективной сушки, который является наиболее простым. Однако конвективные способы связаны

с перемещением значительных объемов теплоносителя. Выбросы теплового отработавшего теплоносителя предопределяют низкую эффективность использования энергетических ресурсов. Совершенствование способов подвода

тепла непосредственно связано с интенсификацией теплообмена и снижением удельных расходов тепла. Традиционным способом интенсификации процессов теплообмена при конвективной сушке является увеличение температуры и расхода сушильного агента. В современных конвективных сушилках температура сушильного агента обычно лимитируется предельной температурой нагрева сырья. Повышение скорости движения сушильного агента, с одной стороны, интенсифицирует процессы теплообмена продукта с сушильным агентом, а с другой – приводит к повышению потерь теплоты с отработанным сушильным агентом. Таким образом, возникает противоречие между скоростью конвективной сушки и ее энергоэффективностью. Кроме того, при конвективной сушке в продукте возникает температурный градиент, направленный в сторону, противоположную градиенту влагосодержания, что также замедляет процесс конвективной сушки.

Совершенствование методов подвода теплоносителя – одна из возможностей повышения эффективности организации сушильных процессов. Перспективным путем такого совершенствования представляется организация непосредственной доставки энергии к продукту или даже к влаге, находящейся в продукте без использования промежуточного теплоносителя. Такую доставку можно организовать, используя электромагнитное излучение инфракрасного диапазона. Для организации непрерывного процесса ИК-сушки удобно использовать ленточные сушилки с ИК-модулями. Алгоритмы проектирования промышленных образцов сушилок должны учитывать прерывистый характер энергоподвода и особенности массопередачи с учетом конструктивных особенностей конкретного оборудования. Цель работы – создание моделей кинетики процесса сушки с целью определения влияния режимных

параметров на время ИК-сушки в комбинированной ленточной сушилке, позволяющей реализовать при необходимости ИК-, СВЧ- и комбинированную (ИК + СВЧ) сушки [1].

Обзор литературы

В настоящее время ИК-излучение широко используется для сушки растительного сырья. Многие авторы указывают на преимущества и недостатки использования ИК-сушки [2–6]. Преимуществами ИК-сушки пищевых продуктов являются сокращение времени сушки, универсальность ИК-нагрева, простота необходимого оборудования, легкое расположение ИК-нагревателей в конвективных, контактных и микроволновых сушилках, короткие переходные процессы, высокая эффективность преобразования электрической энергии в тепло, проникновение излучения непосредственно в изделие, без нагрева при этом окружающей среды, меньшая стоимость источников ИК-излучения по сравнению с диэлектрическими и микроволновыми источниками, длительный срок службы и низкие эксплуатационные расходы.

Ввиду ряда обозначенных преимуществ ИК-сушка в сочетании с конвективной или вакуумной становится все более популярной. Известно исследование, которое показало улучшение качества сушеного картофеля, повышение тепловой эффективности процесса сушки и снижение энергозатрат на получение готового продукта за счет использования ступенчатого режима радиационно-конвективной сушки [7–10]. Исследователи отмечают высокую пищевую ценность полученных картофельных чипсов, что обусловлено высокой сохранностью ценных термолабильных веществ из-за применения «мягких» температурных режимов сушки и высокой интенсивностью влагоудаления. Сушку картофельных чипсов в ИК-диапазоне исследовали также Т. М. Афзал и Т. Абэ [11].

Интенсивность излучения составляла от 0,125 до 0,500 Вт/см². Они заметили, что скорость сушки возрастала с увеличением толщины слоя из-за более низкой энергии активации для десорбции влаги. Позже они продемонстрировали, что сушка картофеля с помощью ИК-излучения – это процесс с падающей скоростью, и скорость сушки зависит от уровня интенсивности излучения [12; 13].

Прерывистая (пространственная или временная) подача инфракрасного излучения потенциально способна сберечь энергию, снизить потребление воздуха в конвективных сушилках и повысить качество термочувствительных продуктов [14; 15]. И. В. Григорьев, С. П. Рудобашта и В. Д. Очиров показали, что при использовании импульсного ИК-облучения и при обеспечении на облучаемом объекте высоких значений энергетической освещенности необходимый для достижения предельной температуры промежуток времени существенно короче, чем при обычных режимах постепенного непрерывного облучения, и при этом объекты с высокой удельной теплоемкостью нагреваются быстрее [16]. В исследованиях [17; 18] отмечается необходимость учитывать спектральные характеристики излучателя и облучаемого сырья при определении параметров импульсного ИК-нагрева. И. В. Алтухов [19] показал, что благодаря высокой проникающей способности ИК-излучения определенной мощности с соответствующей длиной волны органические и биоорганические молекулы диссоциируют микроорганизмы, споры, грибки, а также разрушают и уничтожают вирусы. Данные особенности импульсного ИК-излучения позволяют получать продукты длительного хранения. Многочисленные исследования показали эффективность применения

импульсного ИК-излучения для получения продукции высокого качества при сушке сахаросодержащих корнеплодов и моркови [17; 19–21]¹. Благодаря применению «мягких» температурных режимов сушки и высокой интенсивности влагоудаления прерывистая радиационно-конвективная сушка позволяет получить такие продукты, как грушевые чипсы, персиковые чипсы и чипсы из хурмы [22]. Исследователи отмечают их высокую пищевую ценность [23–26].

Чтобы полностью использовать потенциал технологий ИК-сушки, необходимо провести много фундаментальных и промышленных исследований и разработок. Проведенные ранее исследования позволяют моделировать процесс в период постоянной скорости сушки [27; 28]. Для учета специфики возрастания скорости при прогреве такого материала, как слайсы моркови, и падения скорости во втором периоде сушки необходимо провести дополнительные исследования.

Материалы и методы

Характеристика объектов сушки

Для исследования кинетики процесса сушки в ленточной сушилке были использованы образцы свежей, недавно собранной моркови, которая не имела признаков загнивания или порчи. Образцы подбирались хорошего качества, без повреждений, трещин или пятен. Для проведения исследования морковь нарезалась слайсами одинакового размера толщиной 1 и 3 мм. Среднее влажностное содержание образцов моркови было $(5,60 \pm 0,35)$ кг, что соответствовало начальной влажности 84–86 %.

Описание экспериментального стенда для сушки в движущемся слое

Установка представляет собой ленточный транспортер (рис. 1), на котором размещены ИК-модули и камеры с вентиляторами, позволяющие при

¹ Алтухов И. В., Очиров В. Д. Технология инфракрасной сушки сахаросодержащих корнеплодов // Engineering problems in agriculture and industry : материалы Междунар. конф. Улан-Батор, 2010. С. 87–92.

необходимости подключать СВЧ-модуль. Камера решает задачи отвода водяных паров из внутреннего пространства сушилки. Модуль ИК-обработки содержит два кварцевых ИК-излучателя, расположенных на расстоянии 13 см от поверхности ленты транспортера. Мощность излучателей регулируется тиристорными регуляторами напряжения в диапазоне от 0 до 1100 Вт.

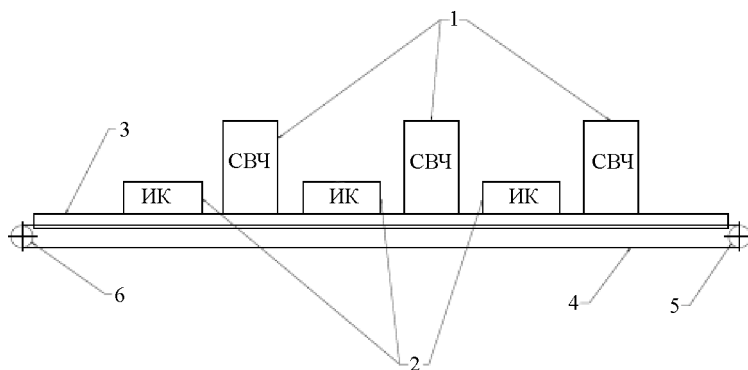
Лента приводится в движение электродвигателем Oriental Motor 6 – 90 W, с регулируемым количеством оборотов, что позволяет изменять скорость движения ленты в широком диапазоне от 0 до 35 мм/с.

Задачами экспериментальной установки было провести испытания для определения зависимостей, которые

характеризовали бы кинетику процесса удаления влаги в подвижном слое растительного сырья.

Методика определения влажности исходного сырья

Влажность исходного продукта определялась методом высушивания до постоянной массы при температуре 80 °С. В предварительно высушенный бюкс с известной массой помещалось 5 г продукта. Время высушивания составляло около 10–15 ч. После этого бюкс помещался в эксикатор для охлаждения на 30 мин, по истечению которых проводилось взвешивание на аналитических весах Radwag AS 220/С с точностью $\pm 0,0004$ г. Затем бюкс вновь помещался в сушильный шкаф на 1–1,5 ч, после чего операция повторялась.



Р и с. 1. Экспериментальная опытно-промышленная ленточная сушилка: 1 – камеры; 2 – ИК-модули; 3 – транспортный канал; 4 – лента; 5 – приводной барабан; 6 – натяжной барабан

F i g. 1. Experimental pilot belt dryer: 1 – cameras; 2 – IR modules; 3 – transport channel; 4 – belt; 5 – drive drum; 6 – tension drum

Данные манипуляции проводились до тех пор, пока разница между показаниями массы бюксы не превышала 0,0005 г. Таким образом определялась масса сухих веществ в образце, что позволяло определить влажность и влагосодержание образца.

Методика определения скорости движения ленты

В движение лента приводится низкооборотным двигателем, регулирование производительности которого осуществляется посредством многооборотного потенциометра. Таким образом, представляется возможность организовать несколько режимов скоростей ленты в диапазоне 0,5...35 мм/с.

Измерение скорости движения ленты проводится следующим образом. Параллельно ленте на вращающиеся барабаны натягивается нить, к которой крепится флажок. В таком случае нить движется с той же скоростью, что и лента. Заведомо зная геометрические данные сушильной установки, с помощью секундомера фиксируется время прохождения флажка определенного расстояния. При длине нити (6000 ± 3) мм на максимальной скорости время прохождения флажком полного круга составляет (171,4 ± 0,5) с. Погрешность определения скорости составит ±0,12 мм/с или 0,3 %.

Определение относительного влагосодержания и модели кинетики процесса

Относительное влагосодержание определяется как отношение разности текущего и равновесного влагосодержания к разности начального и равновесного влагосодержания. Как указано во многих работах [29–33] для овощного сырья равновесное влагосодержание является пренебрежимо малым по сравнению с текущим и тем более начальным влагосодержанием. Тогда относительное влагосодержание может быть определено как отношение текущего влагосодержания к начальному или как отношение текущей массы влаги

в продукте к начальной. Текущая масса влаги в продукте определялась при помощи взвешивания на весах как разница между начальной массой влаги в образце и убылью массы продукта в течение процесса.

В литературе [32; 34; 35] имеется множество эмпирических моделей кинетики процесса сушки основанных на определении зависимости относительного влагосодержания от времени процесса сушки. Из них наиболее простую форму имеют модели:

$$\begin{aligned} \text{Ньютона } w^c / w_0^c &= e^{-k \cdot t}, \\ \text{Хендерсона } w^c / w_0^c &= a \cdot e^{-k \cdot t}, \\ \text{Пэйджа } w^c / w_0^c &= e^{-k \cdot t^n}, \end{aligned}$$

и логарифмическая модель $w^c / w_0^c = a \cdot e^{-k \cdot t} + c$,

где w^c – текущее влагосодержание, w_0^c – начальное влагосодержание, t – время процесса, k, a, c – эмпирические коэффициенты.

Неизвестные эмпирические коэффициенты находятся с использованием метода наименьших квадратов, применяя методы линеаризации и стандартные функции программы Mathcad.

Определение эффективного коэффициента диффузии и энергии активации

Эффективный коэффициент диффузии может быть получен с использованием имеющихся решений уравнения нестационарной диффузии, известного как 2-й закон Фика, для бесконечной пластины [30–34].

$$D_{eff} = \frac{4 \cdot L^2}{\pi^2} \cdot slope(t, \ln(w^c / w_0^c))$$

где $slope(x, y)$ – функция определения углового коэффициента линейной зависимости $y = f(x)$.

Энергия активации E_a может быть найдена из известной формулы Аррениуса

$$D_{eff} = D_0 \cdot e^{-\frac{E_a \cdot m}{P}}, \quad (1)$$

где m – масса образца, кг; P – мощность излучения, Вт; D_0 – числовой коэффициент, m^2/c .

Тогда

$$E_a = -\text{slope}(m/P, \ln(D_{\text{eff}})).$$

Результаты исследования

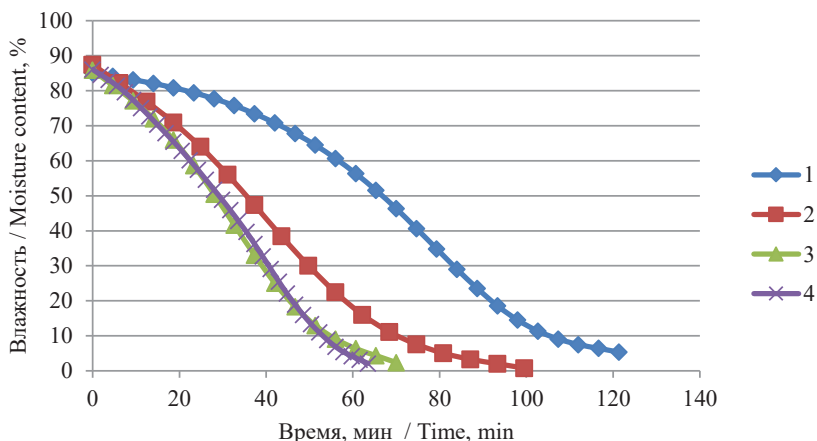
Ранее проведенные исследования инфракрасной сушки плодов и овощей в неподвижном слое [27; 35; 36] показали существенное влияние мощности излучения и толщины слоя на кинетику процесса сушки. В случае использования ленточной сушилки для организации непрерывного процесса инфракрасной сушки еще одним параметром, влияние которого на кинетику процесса было исследовано, является скорость ленты (рис. 2).

Для определения этого влияния опыты проводили при средней интенсивности излучения в камерах равной $2,25 \text{ кВт/м}^2$ и толщине слоя 3 мм. В процессе сушки происходило снижение влажности от начальной 85 % до нормативной 8 % за 55 мин при скорости ленты до 10 мм/с. Рост скорости ленты до 15 мм/с приводит к увеличению времени

сушки до 70 мин, а при скорости ленты 20 мм/с время сушки составит 105 мин. Видимо, это связано с тем, что при скорости ленты выше 10 мм/с ее скорость становится слишком большой и продукт может не успеть получить необходимое количество тепла для испарения влаги, что приводит к увеличению времени сушки. При более высоких скоростях ленты может происходить снижение температуры продукта в результате его быстрого перемещения через зону инфракрасного излучения, что также может увеличить время сушки.

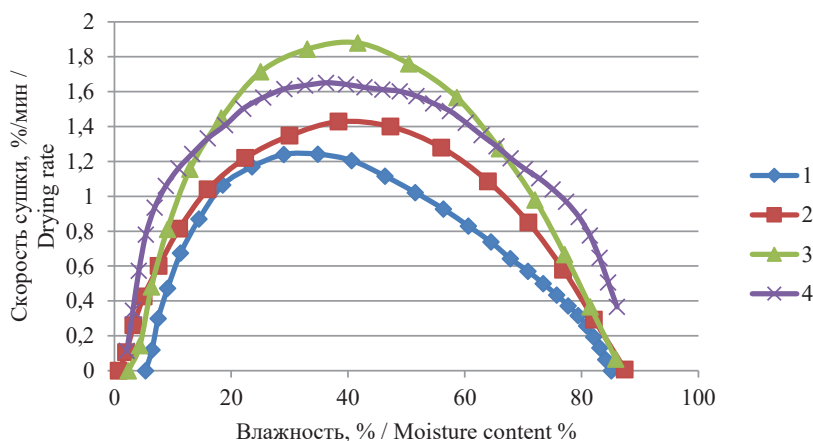
При скорости ленты ниже 10 мм/с наблюдаемые кривые сушки идентичны кривым, полученным при сушке слайсов моркови в неподвижном слое [27; 36; 37]. Высказанное выше предположение о причинах снижения скорости сушки при увеличении скорости ленты выше 10 мм/с косвенно подтверждается характером кривых скорости сушки (рис. 3).

Так, при скорости ленты 20 мм/с на кривой отчетливо наблюдается длительный период, при котором происходит нарастание скорости сушки до максимума за счет медленного прогрева материала.



Р и с. 2. Кривые сушки моркови на ленте: 1 – скорость ленты 20 мм/с; 2 – скорость ленты 15 мм/с; 3 – скорость ленты 10 мм/с; 4 – скорость ленты 5 мм/с

F i g. 2. Carrot drying curves: 1 – belt speed 20 mm/s; 2 – belt speed 15 mm/s; 3 – belt speed 10 mm/s; 4 – belt speed 5 mm/s



Р и с. 3. Кривые скорости сушки моркови на ленте: 1 – скорость ленты 20 мм/с; 2 – скорость ленты 15 мм/с; 3 – скорость ленты 10 мм/с; 4 – скорость ленты 5 мм/с
 F i g. 3. Curves of drying carrots on the belt: 1 – belt speed 20 mm/s; 2 – belt speed 15 mm/s; 3 – belt speed 10 mm/s; 4 – belt speed 5 mm/s

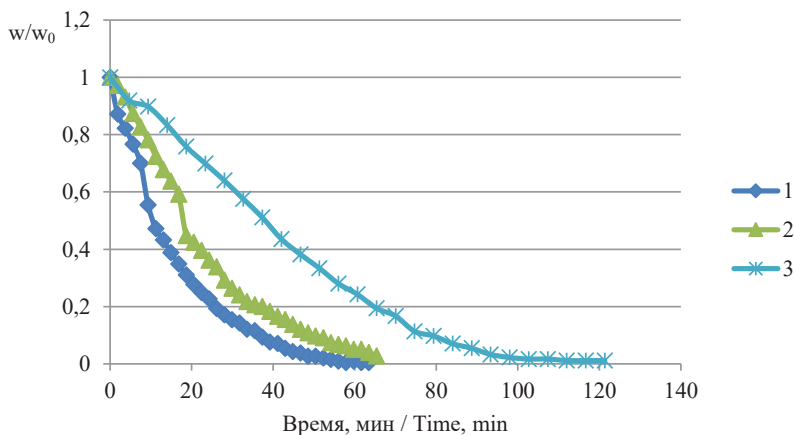
С уменьшением скорости ленты до 10 мм/с происходит увеличение максимальной скорости сушки, причем максимум достигается раньше, при более высоких значениях влажности. Дальнейшее уменьшение скорости ленты приводит к снижению максимальной скорости сушки, а характер кривой 4 (рис. 3) близок к виду классической кривой скорости сушки с выраженным периодом почти постоянной скорости сушки при влажности от 60 до 25 %, в котором скорость сушки находится в пределах $1,4 \pm 0,1$ %/мин.

Такое изменение характера влияния скорости ленты, по-видимому, связано с тем, что увеличение скорости ленты от 0 мм/с до 10 мм/с может приводить к более эффективному удалению влаги из зоны воздействия инфракрасного излучения, так как продукт будет быстрее перемещаться из зоны высокой влажности в зону более сухого воздуха. Это повлияет на ускорение процесса сушки и сокращение времени, необходимого для высушивания продукта. Увеличение скорости ленты в этом диапазоне способно привести к более эффективному массообмену между продуктом и воздухом, что может

ускорить процесс сушки. Кроме того, это может привести к более равномерной температуре и влажности продукта, что также повлияет на ускорение процесса сушки. Таким образом, оптимальное значение скорости ленты находится в диапазоне от 5 до 15 мм/с, и дальнейшие опыты были проведены на скорости ленты 10 мм/с.

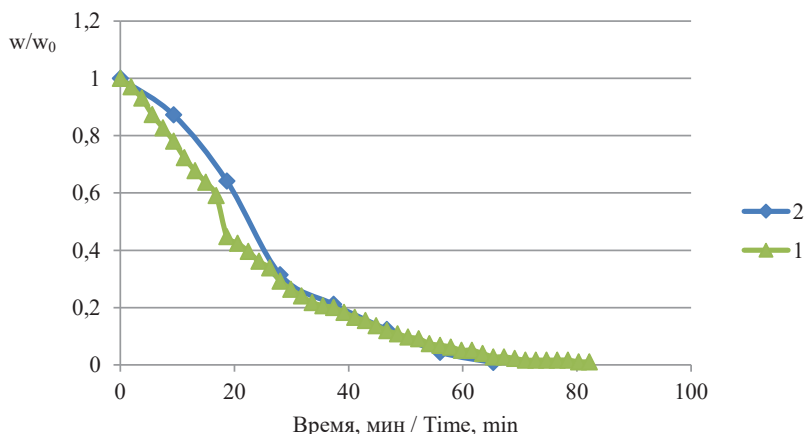
Так как режим сушки в ленточной сушилке отличается от непрерывного режима сушки в неподвижном слое, исследованного ранее [36–38], то было оценено влияние мощности ИК-излучения и толщины слоя на кинетику процесса (рис. 4 и 5). Так как при ИК-сушке слайсов моркови в данной установке практически не наблюдалось постоянной скорости сушки при выбранном значении скорости ленты, то для уточненного расчета продолжительности процесса сушки рассмотрено влияние этих параметров на безразмерное влагосодержание.

Как видно (рис. 5), при толщине слоя до 3 мм при сушке слайсов моркови в ленточной сушилке ее влиянием можно пренебречь, и ключевым фактором, влияющим на продолжительность процесса сушки, остается мощность ИК-излучения (рис. 4).



Р и с. 4. Кривые изменения безразмерного влагосодержания при мощности излучателей: 1 – 450Вт; 2 – 300Вт; 3 – 170Вт

Fig. 4. Curves of changes in water content ratio (MR) at emitter power: 1 – 450W; 2 – 300W; 3 – 170W



Р и с. 5. Кривые изменения безразмерного влагосодержания при толщине слоя: 1 – 3 мм; 2 – 1 мм

Fig. 5. Curves of changes in dimensionless water content ratio (MR) at layer thickness: 1 – 3 mm; 2 – 1 mm

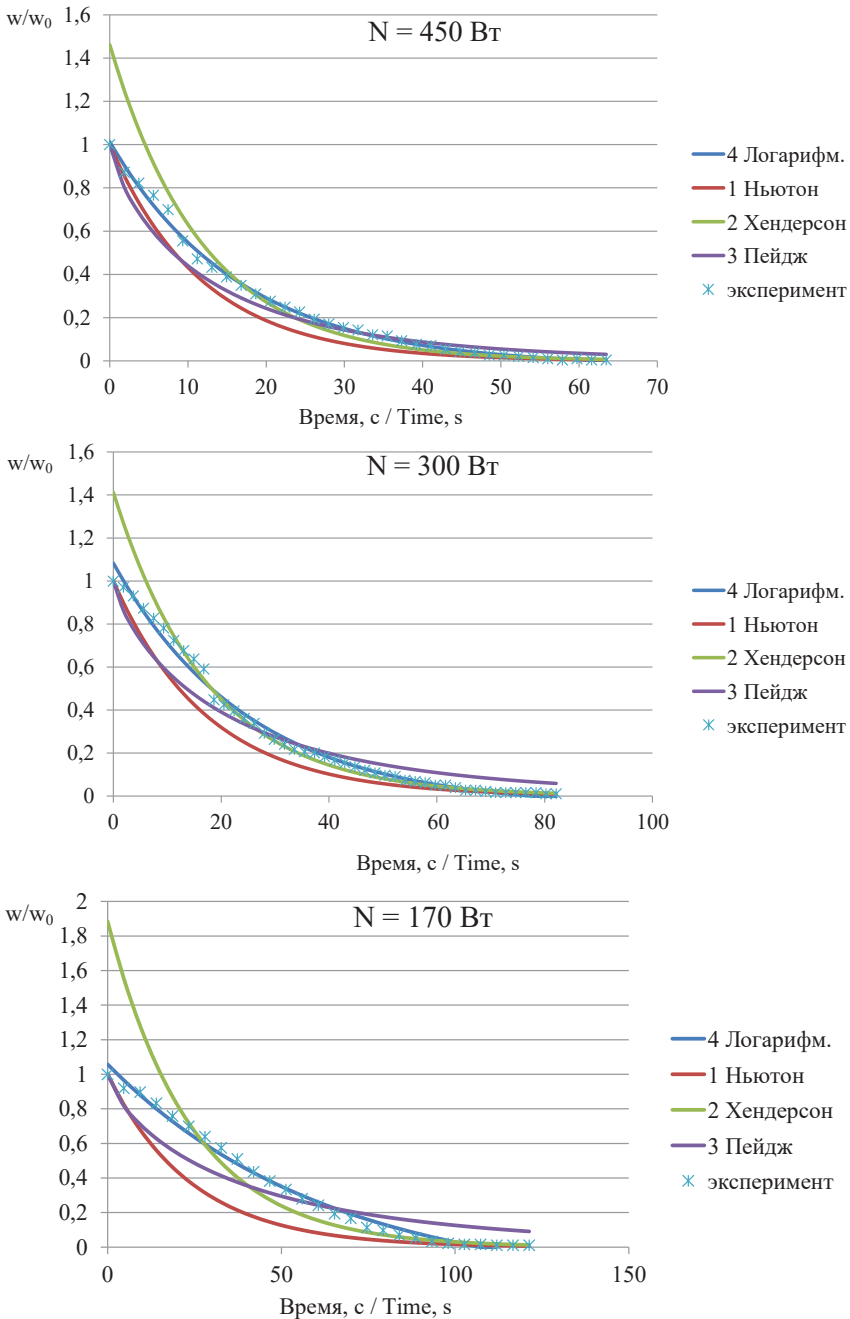
Для определения возможности практического применения в системах расчета и проектирования данного типа установок были проанализированы известные теоретические модели.

Модель Ньютона совпадает с экспериментальными данными только в крайних точках и расхождение модели с экспериментом растет с уменьшением подводимой мощности. Так, среднеквадратическое отклонение для 450 Вт составляет 0,072, для 300 Вт – 0,095 и 0,18 – для 170 Вт.

Electrical technologies and equipment

Модель Хендерсона удовлетворительно описывает экспериментальные данные спустя 1000 с после начала процесса для 450 и 300 Вт мощности излучателей. Однако для 170 Вт среднеквадратическое отклонение составит 0,234 и эти отклонения можно наблюдать визуально (рис. 6).

Модель Пейджа для всего диапазона мощностей характеризуется заниженными значениями безразмерного относительного влагосодержания в начале процесса сушки и завышенными значениями – в конце.



Р и с. 6. Сравнение различных моделей с экспериментальными данными: 1 – модель Ньютона; 2 – модель Хендерсона; 3 – модель Пейджа; 4 – логарифмическая модель; * – экспериментальные данные

Fig. 6. Comparison of various models with experimental data: 1 – Newton model; 2 – Henderson model; 3 – Page model; 4 – logarithmic model; * – experimental data

Среднеквадратичное отклонение находится в диапазоне 0,061–0,115. Наилучшее совпадение достигается для логарифмической модели. Значения среднеквадратичных отклонений приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены значения коэффициентов логарифмической модели для различных значений мощности излучателей. Процедура интерполяции позволяет использовать эти данные для определения времени процесса сушки слайсов моркови в ленточной ИК-сушилке до заданной влажности в диапазоне мощностей излучателей от 170 до 450 Вт.

Коэффициент диффузии ($Deff$)

Ключевым показателем, характеризующим скорость сушки во втором периоде, является эффективный коэффициент диффузии. Значения $Deff$ в сушилке лежат в пределах от 10^{-8} до 10^{-10} м²/с для фруктов и овощей [39–41]. Значения $Deff$ при различных условиях сушки слайсов моркови, полученные

по уравнению (1), и расчетные значения показаны в таблице 3. Средние значения эффективных коэффициентов диффузии лежат в диапазоне $3 \cdot 10^{-10}$ – $8,14 \cdot 10^{-10}$ м²/с, что согласуется с данными [29], согласно которым для моркови $Deff = 2,01 \times 10^{-10}$ – $12,10 \times 10^{-10}$.

Значения $Deff$ увеличивались с ростом мощности ИК-излучения ввиду более высоких температур образца. Текущие значения $Deff$ в процессе сушки для различной мощности ИК-излучения могут быть рассчитаны по уравнению (1), используя полученные значения энергии активации.

Обсуждение и заключение

Характер кинетики процесса сушки моркови в рассмотренной ленточной ИК-сушилке имеет принципиальные отличия от кинетики процесса сушки в неподвижном слое. В связи с конструктивными особенностями сушилки наблюдается экстремальный характер влияния скорости ленты на скорость сушки.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Расчетные модели Calculation models

Модель / Model	Среднеквадратичное отклонение / RMSE		
	Мощность, Вт / Power, W		
	170	300	450
Ньютона / Newton	0,072	0,095	0,180
Хендерсона / Henderson	0,118	0,088	0,234
Пейджа / Page	0,061	0,083	0,115
Логарифмическая / Logarithmic	0,033	0,027	0,017

Т а б л и ц а 2

Table 2

Значения коэффициентов логарифмической модели Values of the coefficients of the logarithmic model

Коэффициент / Coefficient	Значения коэффициентов / Values of the coefficients		
	Мощность, Вт / Power, W		
	170	300	450
a	1,037	1,135	1,298
k	$0,99 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$
c	-0,024	-0,052	-0,24

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3Значения коэффициентов логарифмической модели
Values of the diffusion coefficients of the logarithmic model

Коэффициент / Coefficient	Значения коэффициентов / Values of the coefficients		
	Мощность, Вт / Power, W		
	450	300	170
Средний эффективный коэффициент диффузии $D_{eff} \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$ / Average effective diffusion coefficient $D_{eff} \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$	8,14	5,28	3,03
Энергия активации E_a , кВт/кг / Activation energy E_a , kW/kg	21,20	14,50	11,30
$D_0 \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	1,29	1,06	0,08

Если вначале с ростом скорости ленты происходит увеличение скорости сушки, то после достижения скоростью ленты значения в 10 мм/с наблюдается обратная зависимость. Кривые сушки имеют зону возрастающей скорости сушки, связанную с прогревом материала, и с увеличением скорости ленты, максимум на кривой скорости сушки смещается в сторону меньших влагосодержаний. Такой характер зависимостей делает неприменимыми имеющиеся зависимости для расчета процесса ИК-сушки моркови при постоянной скорости сушки. Из рассмотренных наиболее употребительных моделей описания процесса наилучшая корреляция с экспериментальными данными наблюдалась

у логарифмической модели, которую предлагается использовать для расчета продолжительности времени сушки при заданных параметрах мощности ИК-излучателей. Полученные значения эффективных коэффициентов диффузии согласуются с данными других исследователей. Целесообразно получить аналогичные данные для определения рациональных параметров процесса сушки схожего плодово-овощного сырья. Также представляется перспективным исследовать комбинированное влияние ИК- и СВЧ-излучения на кинетику и энергетику процесса сушки для определения оптимального соотношения мощностей и времени воздействия ИК- и СВЧ-излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems / O. G. Burdo [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2021. Vol. 57, Issue 3. P. 330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
2. Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F. G. A Review of Drying Methods for Improving the Quality of Dried Herbs // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. Vol. 61, Issue 11. P. 1763–1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>
3. Boateng I. D., Yang X. M., Li Y. Y. Optimization of Infrared-Drying Parameters for Ginkgo Biloba L. Seed and Evaluation of Product Quality and Bioactivity // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 160. Article no. 113108. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113108>
4. Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances / P. Sakare [et al.] // Food Engineering Reviews. 2020. Vol. 12, Issue 3. P. 381–398. <https://doi.org/10.1007/S12393-020-09237-W>

5. Mohammadi Z., Kashaninejad M., Ziaifar A. M. Peeling of Kiwifruit Using Infrared Heating Technology: A Feasibility and Optimization Study // LWT. 2019. Vol. 99. P. 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.037>
6. Омаров М. М., Исламов М. Н., Абду З. А. Сушка моркови с использованием инфракрасных излучателей СФ-4 // Пищевая промышленность. 2009. № 8. С. 18–19. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sushka-morkovi-s-ispolzovaniem-infrakrasnyh-izluchateley-sf-4> (дата обращения: 30.03.2023).
7. Drying Kinetics of Food Materials in Infrared Radiation Drying: A Review / D. S. Delfiya [et al.] // Journal of Food Process Engineering. 2022. Vol. 45, Issue 6. Article no. e13810. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13810>
8. Желтоухова Е. Ю., Каданцев А. А., Яницкий В. И. Исследование радиационно-конвективной сушки картофеля при переменном теплоподводе // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79, № 1. С. 46–49. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-kartofelya-pri-priemennom-teplopodvode/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).
9. The Effectiveness of Combined Infrared and Hot-Air Drying Strategies for Sweet Potato. D. I. Onwude [et al.] // Journal of Food Engineering. 2019. Vol. 241. P. 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.foodeng.2018.08.008>
10. Modelling the Mid-infrared Drying of Sweet Potato: Kinetics, Mass and Heat Transfer Parameters, and Energy Consumption / D. I. Onwude [et al.] // Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung. 2018. Vol. 54. P. 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/S00231-018-2338-Y>
11. Afzal T. M., Abe T. Diffusion in Potato During Far Infrared Radiation Drying // Journal of Food Engineering. 1998. Vol. 37, Issue 4. P. 353–365. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877498001113?via%3Dihub> (дата обращения: 16.04.2023).
12. Afzal T. M., Abe T. Some Fundamental Attributes of Far Infrared Radiation Drying of Potato // Drying Technology. 1999. Vol. 17, Issue 1/2. P. 138–155. <https://doi.org/10.1080/07373939908917522>
13. Afzal T. M., Abe T., Hikida Y. Energy and Quality Aspects During Combined FIR–Convection Drying of Barley // Journal of Food Engineering. 1999. Vol. 42, Issue 4. P. 177–182. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00117-X)
14. Study of Interval Infrared Airflow Drying: A Case Study of Butternut (Cucurbita Moschata). C. Rezik [et al.] // LWT, 2021. Vol. 147. Article no. 111486. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111486>
15. Мелякова О. А. Энергоэффективные режимы сушки овощей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 4 (84). С. 169–172. URL: <https://global5.com/Zhurnaly/Ekonomika-i-menedzhment/Izvestiya-Orenburgskogo-GAU/vypusk-2020-4?article=282539> (дата обращения: 16.04.2023).
16. Григорьев И. В., Рудобашта С. П. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ «Агроинженерия». 2009. № 4 (35). С. 7–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/impulsnaya-infrakrasnaya-sushka-semyan-ovoschnyh-kultur> (дата обращения: 24.08.2023).
17. Алтухов И. В. Применение дискретного ИК-энергоподвода в технологии сушки сахаросодержащих корнеплодов // Вестник ИрГСХА. 2013. № 55. С. 100–105. URL: <http://vestnik.irsau.ru/files/v55.pdf> (дата обращения: 24.08.2023).
18. Алтухов И. В., Цугленок Н. В. Особенности работы импульсных ИК-излучателей в технологии сушки корнеклубнеплодов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 4 (126). 2015. С. 109–114. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-raboty-impulsnyh-ik-izluchateley-v-tehnologii-sushki-korneklubneplodov/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).
19. Алтухов И. В., Цугленок Н. В., Очиров В. Д. Влияние импульсной инфракрасной сушки на сохранность активно действующих веществ // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 1. С. 7–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-impulsnoy-infrakrasnoy-sushki-na-sohrannost-aktivnodeystvuyuschih-veschestv/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).
20. Алтухов И. В. Обоснование режимов сушки сахаросодержащих корнеплодов ИК-излучением // Вестник ИрГСХА. 2013. № 56. С. 87–97. URL: <http://vestnik.irsau.ru/files/v56.pdf> (дата обращения: 16.04.2023).
21. Остриков А. Н., Желтоухова Е. Ю. Радиационно-конвективная сушка грушевых чипсов при импульсном энергоподводе // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 1. С. 83–86.

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionno-konvektivnaya-sushka-grushevyyh-chipsov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).

22. Остриков А. Н., Желтоухова Е. Ю. Изучение кинетики радиационно-конвективной сушки персиков при импульсном энергоподводе // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2014. № 1. С. 114–118. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-kinetiki-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-persikov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (дата обращения: 16.04.2023).

23. Effects of Catalytic Infrared Drying in Combination with Hot air Drying and Freeze Drying on the Drying Characteristics and Product Quality of Chives / C. Gu [et al.] // LWT. 2022. Vol. 161. Article no. 113363. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113363>

24. Effect of Hot Air and Infrared Drying on the Retention of Cannabidiol and Terpenes in Industrial Hemp (*Cannabis Sativa L.*) / C. Chen [et al.] // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 172. Article no. 114051. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114051>

25. EL-Mesery H. S., Kamel R. M., Emara R. Z. Influence of Infrared Intensity and Air Temperature on Energy Consumption and Physical Quality of Dried Apple Using Hybrid Dryer // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 27. Article no. 101365. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101365>

26. Drying of Green Bell Pepper Slices Using an IR-assisted Spouted Bed Dryer: An Assessment of Drying Kinetics and Energy Consumption / M. Moradi [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 60. Article no. 102280. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.102280>

27. Studying the Operation of Innovative Equipment for Thermomechanical Treatment and Dehydration of Food Raw Materials / O. Burdo [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 5, no. 11. P. 24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>

28. Characteristics and Multi-objective Optimization of Carrot Dehydration in a Hybrid Infrared / Z. Geng [et al.] // LWT. 2022. Vol. 172. Article no. 114229. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114229>

29. Hybrid Microwave-hot Air Drying of the Osmotically Treated Carrots / A. U. Souza [et al.] // LWT. 2022. Vol. 156. Article no. 113046. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113046>

30. Drying Kinetics of Paddy Drying with Graphene Far-infrared Drying Equipment at Different IR Temperatures, Radiations-distances, Grain-flow, and Dehumidifying-velocities / Y. Du [et al.] // Case Studies in Thermal Engineering. 2023. Vol. 43. Article no. 102780. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.102780>

31. Arslan A., Soysal Y., Keskin M. Mathematical Modeling, Moisture Diffusion and Color Quality in Intermittent Microwave Drying of Organic and Conventional Sweet Red Peppers // AgriEngineering. 2020. Vol. 2, Issue 3. P. 393–407. <https://doi.org/10.3390/AGRIENGINEERING2030027>

32. Selvi K. Ç. Investigating the Influence of Infrared Drying Method on Linden (*Tilia Platyphyllos scop.*) leaves: Kinetics, Color, Projected Area, Modeling, Total Phenolic, and Flavonoid Content // Plants. 2020. Vol. 9, Issue 7. Article no. 916. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9070916>

33. Mathematical Modelling of Far-infrared Vacuum Drying of Apple Slices / V. Mitrevski [et al.] // Thermal Science. 2019. Vol. 23. P. 393–400. <https://doi.org/10.2298/TSCI180205143M>

34. Doymaz I., Kipcak As., Piskin S. Microwave Drying of Green Bean Slices: Drying Kinetics and Physical Quality // Czech J. Food Sci. 2015. Vol. 33, Issue 4. P. 367–376. <https://doi.org/10.17221/566/2014-CJFS>

35. Minaei S., Motevali A., Ahmadi E. Mathematical Models of Drying Pomegranate Arils in Vacuum and Microwave Dryers // Journal of Agricultural Science and Technology. 2012. Vol. 14. P. 311–325.

36. Гаврилов А. В. Анализ современных энерготехнологий переработки растительного сырья // Агроинженерия. 2019. № 5 (93). С. 31–39. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>

37. Система инновационных энерготехнологий обезвоживания пищевого сырья / О. Бурдо [и др.] // Problemele Energeticii Regionale. 2020. Vol. 2 (46). P. 92–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/zenodo.3898317>

38. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems / O. G. Burdo [et al.] // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2021. Vol. 57, Issue 3. P. 330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>

39. Salehi F., Satorabi M. Influence of Infrared Drying on Drying Kinetics of Apple Slices Coated with Basil Seed and Xanthan Gums // *International Journal of Fruit Science*. 2021. Vol. 21, Issue 1. P. 519–527. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>
40. Evaluation of Exergy Performance and Onion Drying Properties in a Multi-stage Semi-industrial Continuous Dryer: Artificial Neural Networks (ANNs) and ANFIS models / M. Kaveh [et al.] // *Food and Bioproducts Processing*. 2021. Vol. 127. P. 58–76. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2021.02.010>
41. Batista A. S., Souza M. F. F., Prado M. M. Moisture Diffusion in Passion Fruit Seeds under Infrared Drying // *Diffusion Foundations and Materials Applications*. 2022. Vol. 30. P. 25–32. <https://doi.org/10.4028/P-W52H5B>

Поступила 18.04.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023; принята к публикации 30.06.2023.

Об авторах:

Гаврилов Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, пос. Аграрное), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: [AAH-5137-2019](https://orcid.org/0000-0003-3382-0307), tehfac@mail.ru

Гербер Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по учебной работе, профессор кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского (295492, Российская Федерация, г. Симферополь, пос. Аграрное), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: [B-6690-2019](https://orcid.org/0000-0003-3224-6833), gerber_1961@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А. В. Гаврилов – общая идея, обоснование цели и задач проведения эксперимента, проведение исследований.

Ю. Б. Гербер – техническое обеспечение проведения экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Burdo O.G., Trishyn F.A., Sirotiyuk I.V., Kruss S. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(3):330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>
2. Thamkaew G., Sjöholm I., Galindo F.G. A Review of Drying Methods for Improving the Quality of Dried Herbs. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2021;61(11):1763–1786. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1765309>
3. Boateng I.D., Yang X.M., Li Y.Y. Optimization of Infrared-Drying Parameters for Ginkgo Biloba L. Seed and Evaluation of Product Quality and Bioactivity. *Industrial Crops and Products*. 2021;160:113108. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113108>
4. Sakare P., Prasad N., Thombare N., Singh R. Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances. *Food Engineering Reviews*. 2020;12(3):381–398. <https://doi.org/10.1007/S12393-020-09237-W>
5. Mohammadi Z., Kashaninejad M., Ziaifar A.M., Ghorbani M. Peeling of Kiwifruit Using Infrared Heating Technology: A Feasibility and Optimization Study. *LWT*. 2019;99:128–137. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.037>
6. Omarov M.M., Islamov M.N., Abdu Z.A. [Drying Carrots Using Infrared Emitters SF-4]. *Pishchevaya promyshlennost*. 2009;(8):18–19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sushka-morkovi-s-ispolzovaniem-infrakrasnyh-izluchateley-sf-4> (accessed 30.03.2023). (In Russ.)

7. Aniesrani Delfiya D.S., Prashob K., Murali S., Alifiya P.V., Samuel M.P., Pandiselvam R. Drying Kinetics of Food Materials in Infrared Radiation Drying: A Review. *Journal of Food Process Engineering*. 2022;45(6):e13810. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13810>
8. Zheltoukhova E.Yu., Kadantsev A.A., Yanitsky V.I. [Study of Radiative-Convective Drying of Potatoes with Variable Heat Supply]. *Vestnik VGUIT*. 2017;79(1):46–49. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-kartofelya-pri-peremennom-teplopodvode/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
9. Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R. The Effectiveness of Combined Infrared and Hot-Air Drying Strategies for Sweet Potato. *Journal of Food Engineering*. 2019;241:75–87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.08.008>
10. Onwude D.I., Hashim N., Abdan K., Janius R., Ghen G. Modelling the Mid-Infrared Drying of Sweet Potato: Kinetics, Mass and Heat Transfer Parameters, and Energy Consumption. *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*. 2018;54:2917–2933. <https://doi.org/10.1007/S00231-018-2338-Y>
11. Afzal T.M., Abe T. Diffusion in Potato during Far Infrared Radiation Drying. *Journal of Food Engineering*. 1998;37(4):353–365. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877498001113?via%3Dihub> (accessed 16.04.2023).
12. Afzal T.M., Abe T. Some Fundamental Attributes of Far Infrared Radiation Drying of Potato. *Drying Technology*. 1999;17(1/2):138–155. <https://doi.org/10.1080/07373939908917522>
13. Afzal T.M., Abe T., Hikida Y. Energy and Quality Aspects during Combined FIR–Convection Drying of Barley. *Journal of Food Engineering*. 1999;42(4):177–182. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00117-X)
14. Rekik C., Besombes C., Hajji W., Gliguem H., Bellagha S., Mujumdar A.S., et al. Study of Interval Infrared Airflow Drying: A Case Study of Butternut (Cucurbita Moschata). *LWT*. 2021;147:111486. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111486>
15. Melyakova O.A. Energy Efficient Modes of Drying Vegetables. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(4):169–172. Available at: <https://globalf5.com/Zhurnaly/Ekonomika-i-menedzhment/Izvestiya-Orenburgskogo-GAU/vypusk-2020-4?article=282539> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
16. Grigoriev I.V., Rudobashta S.P. Pulse Infrared Drying of Seeds of Vegetable Crops. *Vestnik FGOU VPO MGAU "Agroinzheneriya"*. 2009;(4):7–10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/impulsnaya-infrakrasnaya-sushka-semyan-ovoschnyh-kultur> (accessed 24.08.2023). (In Russ.)
17. Altukhov I.V. The Use of Discrete IR Energy Supply in the Technology of Drying Sugar-Containing Root Crops. *Vestnik IrGSKhA*. 2013;(55):100–105. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v55.pdf> (accessed 24.08.2023). (In Russ.)
18. Altukhov I.V., Zuglenok N.V. Features of the Operation of Pulsed IR Emitters in the Technology of Drying Root Crops. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015;(4):109–114. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-raboty-impulsnyh-ik-izluchateley-v-tehnologii-sushki-korneklubneplodov/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
19. Altukhov I.V., Tsuglenok N.V., Ochirov V.D. Influence of Pulsed Infrared Drying on the Safety of Active Substances. *Vestnik APK Stavropolia*. 2015;(1):7–10. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-impulsnoy-infrakrasnoy-sushki-na-sohrannost-aktivnodeystvuyuschih-veschestv/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
20. Altukhov I.V. Substantiation of Modes of Drying Sugar-Containing Root Crops by IR Radiation. *Vestnik IrGShA*. 2013;(56):87–97. Available at: <http://vestnik.irsau.ru/files/v56.pdf> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
21. Ostrikov A.N., Zheltoukhova E.Yu. Radiation-convective drying of Pear Chips with Pulsed Energy Supply. *Izvestiya Vuzov. Pishchevaya Tekhnologiya*. 2012;(1):83–86. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionno-konvektivnaya-sushka-grushevyyh-chipsov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)

22. Ostrikov A.N., Zheltoukhova E.Yu. Study of the Kinetics of Radiation-Convective Drying of Peaches with Pulsed Energy Supply. *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*. 2014;(1):114–118. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-kinetiki-radiatsionno-konvektivnoy-sushki-persikov-pri-impulsnom-energopodvode/viewer> (accessed 16.04.2023). (In Russ.)
23. Gu C., Ma H., Tuly J. A., Guo L., Zhang X., Liu D. Effects of Catalytic Infrared Drying in Combination with Hot Air Drying and Freeze Drying on the Drying Characteristics and Product Quality of Chives. *LWT*. 2022;161:113363. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113363>
24. Chen C., Wongso I., Putnam D., Khir R. Effect of Hot Air and Infrared Drying on the Retention of Cannabidiol and Terpenes in Industrial Hemp (*Cannabis sativa* L.). *Industrial Crops and Products*. 2021;172:114051. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114051>
25. El-Mesery H.S., Kamel R.M., Emara R.Z. Influence of Infrared Intensity and Air Temperature on Energy Consumption and Physical Quality of Dried Apple Using Hybrid Dryer. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;27:101365. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101365>
26. Moradi M., Azizi S., Niakousari M., Kamgar S. Drying of Green Bell Pepper Slices Using an Ir-Assisted Spouted Bed Dryer: An Assessment of Drying Kinetics and Energy Consumption. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;60:102280. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2019.102280>
27. Burdo O., Bezbah I., Kepin N., Zikov A., Yarovy I., Gavrilov A., et al. Drying of Green Bell Pepper Slices Using an Ir-Assisted Spouted Bed Dryer: An Assessment of Drying Kinetics and Energy Consumption. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019;5(11):24–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.178937>
28. Zhihua G., Torki M., Kaveh M., Beigi M., Yang X. Characteristics and Multi-Objective Optimization of Carrot Dehydration in a Hybrid Infrared/Hot Air Dryer. *LWT*. 2022;172:114229. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114229>
29. De Souza A.U., Gomes Corrêa J.L., Tanikawa D.H., Abrahao F.R., Jesus Jungueira J.R., Jiménez E.C. Hybrid Microwave-Hot Air Drying of the Osmotically Treated Carrots. *LWT*. 2022;156:113046. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113046>
30. Du Y., Yan J., Wei H., Xie H., Wu Y., Zhou J. Drying Kinetics of Paddy Drying with Graphene Far-Infrared Drying Equipment at Different IR Temperatures, Radiations-Distances, Grain-Flow, and Dehumidifying-Velocities. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;43:102780. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.102780>
31. Arslan A., Soysal Y., Keskin M. Mathematical Modeling, Moisture Diffusion and Color Quality in Intermittent Microwave Drying of Organic and Conventional Sweet Red Peppers. *AgriEngineering*. 2020;2(3):393–407. <https://doi.org/10.3390/AGRIENGINEERING2030027>
32. Selvi K.Ç. Investigating the Influence of Infrared Drying Method on Linden (*Tilia platyphyllos* Scop.) Leaves: Kinetics, Color, Projected Area, Modeling, Total Phenolic, and Flavonoid Content. *Plants*. 2020;9(7):916. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9070916>
33. Mitrevski V., Dedinac A., Mitrevska C., Bundalevski S., Germitcioski T., Mijakovski V. Mathematical Modelling of Far-Infrared Vacuum Drying of Apple Slices. *Thermal Science*. 2019;23:393–400. <https://doi.org/10.2298/TSCI180205143M>
34. Doymaz I., Kipcak A.S., Piskin S. Microwave Drying of Green Bean Slices: Drying Kinetics and Physical Quality. *Czech J. Food Sci*. 2015;33(4):367–376. <https://doi.org/10.17221/566/2014-CJFS>
35. Minaei S., Motevali A., Ahmadi E., Aziz M.H. Mathematical Models of Drying Pomegranate Arils in Vacuum and Microwave Dryers. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2012;14:311–325.
36. Gavrilov A.V. Analysis of Modern Energy Technologies for the Processing of Vegetable Raw Materials. *Agricultural Engineering*. 2019;(5):31–39. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-5-31-39>
37. Burdo O., Terziev S., Gavrilov A., Sirotiyuk I., Scherbich M. [System of Innovative Energy Technologies for Dehydration of Food Raw Materials]. *Problemele Energeticii Regionale*. 2020;2:92–107. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/zenodo.3898317>

38. Burdo O.G., Trishyn F.A., Terziev S.G., Gavrilo A.B., Sirotyuk I.V. Electrodynamic Processes as an Effective Solution of Food Industry Problems. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2021;57(3):330–344. <https://doi.org/10.3103/S1068375521030030>

39. Salehi F., Satorabi M. Influence of Infrared Drying on Drying Kinetics of Apple Slices Coated with Basil Seed and Xanthan Gums. *International Journal of Fruit Science*. 2021;21(1):519–527. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1908202>

40. Kaveh M., Chayjan R.A., Golpour I., Poncet S., Seirafi F., Khezri B. Evaluation of Exergy Performance and Onion Drying Properties in a Multi-Stage Semi-Industrial Continuous Dryer: Artificial Neural Networks (Anns) and Anfis Models. *Food and Bioproducts Processing*. 2021;127:58–76. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2021.02.010>

41. Batista A.S., Souza M.F.F., Prado M.M. Moisture Diffusion in Passion Fruit Seeds under Infrared Drying. *Diffusion Foundations and Materials Applications*. 2022;30:25–32. <https://doi.org/10.4028/P-W52H5B>

Submitted 18.04.2023; revised 30.05.2023; accepted 30.06.2023.

About authors:

Alexander V. Gavrilo, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Associate Professor of Chair of Technology and Equipment of Production and Processing of Products of Stock-Raising, Academy Agrotechnological of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agraroye, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, Researcher ID: AAH-5137-2019, tehfac@mail.ru

Yuriy B. Gerber, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Deputy Director of Education, Professor of Chair of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, Academy Agrotechnological of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Agraroye, Simferopol 295492, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Authors contribution:

A. V. Gavrilo – general idea, formulation of the purpose and objectives of the experiment, conducting the research.

Yu. B. Gerber – technical support for experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.