

УДК 634.733: 663.8: 663.05

Исследование влияния характеристик отражателя на процесс сушки пищевых продуктов

Кузбасская государственная
сельскохозяйственная академия

В. А. Ермолаев

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Ермолаев Владимир Александрович

Адрес: 650056, Россия, г. Кемерово,

ул. Марковцева, 5

E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:

данные текущего исследования

доступны по запросу

у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Ермолаев, В. А. (2023). Исследование влияния характеристик отражателя на процесс сушки пищевых продуктов.

Хранение и переработка сельхозсырья, (1), 45–56. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.313>

ПОСТУПИЛА: 11.12.2022

ПРИНЯТА: 06.03.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.03.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии
конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение. Сушка представляет собой эффективную технологию консервирования пищевых продуктов. При использовании инфракрасных ламп одним из недостатков является неравномерность нагрева продукта по поверхности лотков, что вызывает перегрев в одной части лотка и недосушивания в другой части. Исследованиям в данной области уделяется мало внимания, поэтому поиск способов обеспечения равномерного нагрева лотков с продуктом при инфракрасной сушке является актуальной задачей.

Цель. Подбор геометрических характеристик отражателя для обеспечения более равномерного нагрева лотка с продуктом при инфракрасной сушке.

Материалы и методы. С помощью программы TracePro была смоделирована оптическая система подвода теплоты и исследовано распределение плотности потока теплового излучения по поверхности лотка. Был смоделирован источник излучения в виде цилиндрической инфракрасной лампы, диаметром 10 мм, длиной 400 мм и лоток с сырьем, размером 400х400 мм. Анализ траектории движения лучей проводили при количестве лучей 50 000.

Результаты. Подобраны параметры параболического излучателя: фокусное расстояние рефлектора 70 мм, глубина рефлектора 200 мм, расстояние между лотком и лампой 152 мм. Основными параметрами параболического отражателя является фокусное расстояние и глубина. Последняя характеристика была выбрана в 200 мм чтобы максимально сохранить весь поток излучения от лампы, направив его на лоток. Эксперименты по инфракрасной сушке винограда с использованием подобранного отражателя и без него показали, что без использования отражателя влагосодержание в продукте, расположенном на периферии, несколько выше, чем в ягодах, расположенных по центру лотка. При использовании отражателя эта разница существенно меньше. Таким образом, моделированный отражатель позволяет снизить разницу во влагосодержании сухого продукта, расположенного на периферии и в центре лотка.

Выводы. Предложенная в работе конструкция отражателя обеспечивает более равномерный нагрев продукта по всей площади лотка. Проведены эксперименты по сушке ягод винограда, подтверждающие результаты расчетов. Возможным направлением дальнейших исследований может быть исследование распределения светового потока в отражателях другой конструкции для обеспечения оптимальной равномерности падения световых лучей на площадь лотка при возможно наименьшем размере сушильной камеры и наименьшим потерям энергии излучателя в окружающую среду.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

инфракрасная сушка, лампы, отражатель, лучи

Study of the Influence of Reflector Characteristics on the Process of Drying Foodstuffs

Kuzbass State Agricultural Academy

Vladimir A. Ermolaev

CORRESPONDENCE:

Vladimir A. Ermolaev

5 Markovtseva Street, Kemerovo, 650056,
Russian Federation

E-mail: ermolaevvla@rambler.ru

FOR CITATIONS:

Ermolaev, V. A. (2023). Study of the influence of reflector characteristics on the process of drying foodstuffs. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 34–45. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.313>

RECEIVED: 11.12.2022

ACCEPTED: 06.03.2023

PUBLISHED: 30.03.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Background. Drying is an efficient food preservation technology. When using infrared drying lamps, one of the disadvantages is the uneven heating of the product over the surface of the trays, which causes overheating in one part of the tray and underdrying in the other part. Little attention is paid to research in this area, so the search for ways to ensure uniform heating of product trays during infrared drying is an urgent task.

Purpose. The purpose of this work was to select the characteristics of the reflector of an infrared drying lamp, such as the focal length of the cylinder paraboloid, the depth of the parabola and the location of the source from the surface of the tray to ensure uniform heating of the tray with raw materials and increase the energy saving of infrared drying.

Materials and Methods. With the help of the program, an optical system of heat supply was modeled and the distribution of the thermal radiation flux density over the surface of the tray was studied. A radiation source was modeled in the form of a cylindrical infrared lamp, 10 mm in diameter, 400 mm long, and a tray with raw materials, 400x400 mm in size. The analysis was carried out with the number of rays 50,000.

Results. In the course of the study, the parameters of the parabolic radiator were selected: the focal length of the reflector is 70 mm, the depth of the reflector is 200 mm, the distance between the tray and the lamp is 152 mm. The main parameters of a parabolic reflector are focal length and depth. The last characteristic was chosen at 200 mm in order to preserve as much as possible the entire radiation flux from the lamp, directing it to the tray. Experiments were carried out on infrared drying of grapes using a selected reflector and without it. The simulated reflector makes it possible to reduce the difference in moisture content between the dry product located on the periphery and in the center of the tray.

Conclusions. The design of the reflector proposed in the work provides more uniform heating of the product over the entire area of the tray. Experiments on drying grape berries were carried out, confirming the results of calculations. A possible direction for further research may be to study the distribution of the light flux in reflectors of a different design to ensure optimal uniformity of the incidence of light rays on the area of the tray with the smallest possible size of the drying chamber and the lowest energy loss of the emitter to the environment.

KEYWORDS

infrared drying, lamps, reflector, rays

ВВЕДЕНИЕ

Сушка является одним из самых перспективных способов консервирования пищевых продуктов (Ermolaev, 2018; Grdzelishvili & Hoffman, 2012). При этом среди самых распространенных источников тепла в сушильных установках являются инфракрасные лампы (Ермолаев & Расщепкин, 2009; Просеков и соавт., 2010; Tysén et al., 2018; Baptestini et al., 2017; Sakare et al., 2020; Yan et al., 2019). Преимуществами такой сушки являются относительно высокая скорость сушки и низкое потребление электроэнергии, а также невысокая температура нагрева — как правило 40–60 °C (Ermolaev, 2020; Зудин и соавт., 2017; Черевко и соавт., 2015, Adak et al., 2017; Samani et al., 2018; Si et al., 2016; Xie et al., 2017; Rasane, 2016).

При использовании инфракрасных сушильных ламп одним из недостатков является неравномерность нагрева продукта по поверхности лотков (Yan et al., 2019). Неравномерность нагрева поверхности обусловлена геометрическими свойствами источника облучения. Как известно, интенсивность излучения (I) от источника малых размеров на элементарную площадку рассчитывается по следующей формуле (Yan et al., 2019):

$$I = I_0 \frac{\cos(\varphi)}{\pi} d\omega, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность излучения источника в направлении, ортогональном поверхности, φ — угол между нормалью от источника к поверхности и вектором излучения, $d\omega$ — телесный угол видимости элементарной площадки точечным источником.

Если рассматривать инфракрасную лампу, то видно (Рисунок 1), что чем ближе она располагается к поверхности нагрева, тем более неравномерное

распределение интенсивности излучения будет наблюдаться на данной поверхности — наиболее интенсивное излучение будет в центральной части лотка, наименее интенсивное — на периферии (по бокам).

Для обеспечения более равномерного нагрева используют лампы с более широкой поверхностью излучения. При этом уменьшается угол φ и появляется возможность несколько снизить температуру источника. Однако с увеличением физических размеров источника излучения увеличивается доля конвективно-кондуктивного теплового потока от инфракрасной лампы, что увеличивает тепловые потери, и следовательно — энергоэффективность.

Частично решить эту проблему можно за счет замены одной большой лампы на несколько более мелких, применением отражателей различной конфигурации (Афонькина, 2012; Chen et al., 2017; Ermolaev et al., 2021a; Ermolaev et al., 2021b; Verspeek et al., 2020; Popov et al., 2019; Waghmare & Gulhane, 2016), а также использованием пленочных инфракрасных нагревателей (Aboltins & Palabinskis, 2017; Aboltins et al., 2017). Например, Завалий и Янович (2010) исследовал различные схемы подвода теплоты при инфракрасной сушке, в том числе установка с вынесенными рефлекторами инфракрасных сушильных ламп за пределы приемной поверхности (Рисунок 2). Такое техническое решение обеспечивает более равномерное температурное поле на нижней и верхней поверхностях лотка с сырьем, что дает возможность увеличить высоту слоя продукта и интенсифицировать процесс сушки без применения вибрации. Недостатками данной сушилки является трудность замены контактных дорожек излучателей, а также недостаточная равномерность нагрева продукта по всей длине лотка. Кроме того, вынесение рефлектора с одной стороны лотка увеличивает геометрические размеры и создает нетехнологическую зону со стороны рефлекторов (Рисунок 2).

Анализ литературы в данной области выявил недостаточный объем исследований по разработке технических решений, позволяющих обеспечить равномерное падение лучей на поверхность лотка с продуктом. Целью настоящей работы являлся анализ влияния геометрических характеристик отражателя на равномерность нагрева лотка с продуктом при инфракрасной сушке.

Рисунок 1

Схема распределения лучей

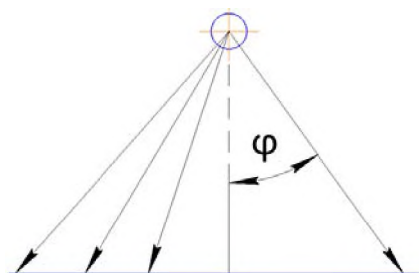
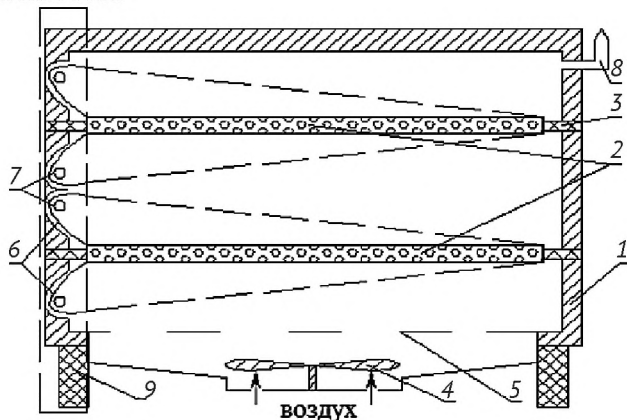


Рисунок 2

Схема инфракрасной сушильной установки с вынесенными рефлекторами за пределы приемной поверхности

Нетехнологическая зона



1 – теплоизолированный корпус; 2 – лотки с сырьем; 3 – направляющие; 4 – нагнетатель воздуха; 5 – решетки; 6 – рефлекторы; 7 – ИК-излучатели; 8 – патрубок для отвода влажного воздуха; 9 – стойка

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты

Объектами исследований выступали факторы, влияющие на равномерность нагрева лотка при сушке: форма отражателя, его фокусное расстояние и глубина, а также расстояние между лампой и лотком с продуктом.

Оборудование

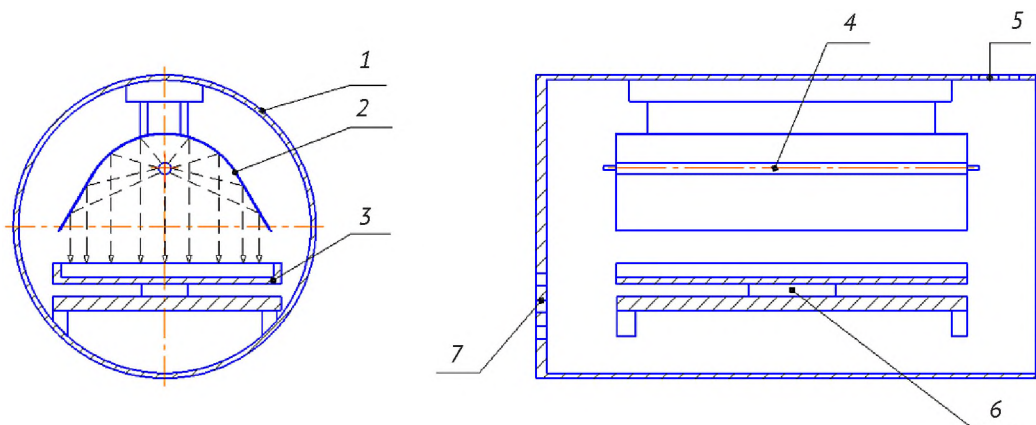
Схема установки, которая использовалась для сушки, представлена на Рисунок 3. В качестве источника теплоты использовалась инфракрасная лампа КГТ-220-1000 (4), мощностью 1000 Вт с параболическим отражателем 2, самостоятельно изготовленным из листа алюминия. Температура сушки контролировалась по термопаре, размещенной в центре лотка 3. Регистрация массы продукта осуществлялась с помощью тензодатчика веса 6, размещенного под лотком с продуктом. В данной установке влажный нагретый воздух удаляется из установки через отверстия в верхней части корпуса 5.

Методы и инструменты

Для анализа различных систем подвода теплоты использовалось программное обеспечение TracePro, предназначенное для проектирования и анализа оптических систем и систем освещения. Данная программа позволяет моделировать различные оптические системы и осуществлять анализ распределения светового потока по поверхностям. В программе моделируется источник освещения и геометрия объектов, на которые будет падать световой поток. Выбираются параметры как источников освещения, так и поверхности объектов с отражательными/поглощательными характеристиками. Далее устанавливается значение количества лучей и запускается процесс моде-

Рисунок 3

Схема экспериментальной установки для инфракрасной сушки



1 – корпус; 2 – отражатель; 3 – лоток с продуктом; 4 – инфракрасная сушильная лампа; 5 – отверстия для выхода влажного воздуха; 6 – тензодатчик веса; 7 – окна для притока воздуха

лирования. Программа рассчитывает траекторию перемещения лучей и строит карту распределения интенсивности излучения на выбранной поверхности объекта.

Отражатель конструировался из алюминия, толщиной 1 мм. При нагреве происходит незначительное изменение геометрических характеристик отражателя, однако в данной работе было принято допущение, что форма отражателя остается неизменной.

Для сушки ягод винограда (сорт Августин, урожай 2022 г.) использовалась сушильная инфракрасная лампа, размещенная над перфорированным лотком с высушиваемым продуктом. Температура нагрева контролировалась по показаниям термодатчиков, размещенных на лотке с продуктом в один сплошной слой. Сушку ягод винограда проводили до достижения содержания влаги 7,5–8,5%. Содержание влаги в ягодах винограда определяли путем анализа изменения массы продукта до и после сушки.

Процедура исследования

Вначале был смоделирован источник излучения в программе TracePro в виде цилиндрической инфракрасной лампы, диаметром 10 мм, длиной 400 мм и лоток с сырьем, размером 400 × 400 мм. Анализ проводили при количестве лучей 50 000. Был проведен анализ степени расхождения плотности теплового излучения между центром и периферией лотка. Далее в модель системы была добавлена модель отражателя с заданными характеристиками и проведен аналогичный анализ. После проводился подбор фокусного расстояния рефлектора и расстояния между лампой и лотком. Подбор фокусного расстояния производился итерационным путем: задавалось определенное значение фокусного расстояния, производился расчет оптической системы в программе TracePro и по полученной карте анализировалась степень расхождения плотности теплового потока между периферией и центром лотка. Далее менялось значение фокусного расстояния и расчет повторялся.

Завершающим этапом было проведение экспериментальных исследований по сушке ягод винограда с использованием сконструированного отража-

теля и без него. Ягоды укладывались в один слой на поддон, температура сушки составляла 40 °С, она контролировалась по термодатчику, размещенной в центре лотка. Масса продукта контролировалась по датчику веса, размещенному снизу лотка. После сушки с поддона выбирали ягоды с различных точек лотка на расстоянии 0, 60, 120 и 180 мм от продольной оси лотка (по 10 ягод для каждого расстояния) и определяли влагосодержание ускоренным методом на приборе Чижовой. Опыты проводили в 5-кратной повторности, за конечное значение принимали среднеарифметическое от всех 5 опытов.

Анализ данных

Данные обрабатывались на компьютере в программе TracePro. Обработка экспериментальных исследований по сушке ягод винограда осуществлялась в программной среде MS Excel, где производился расчет среднеарифметических показателей влагосодержания ягод винограда в различных точках лотка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование карт распределения плотности потока теплового излучения

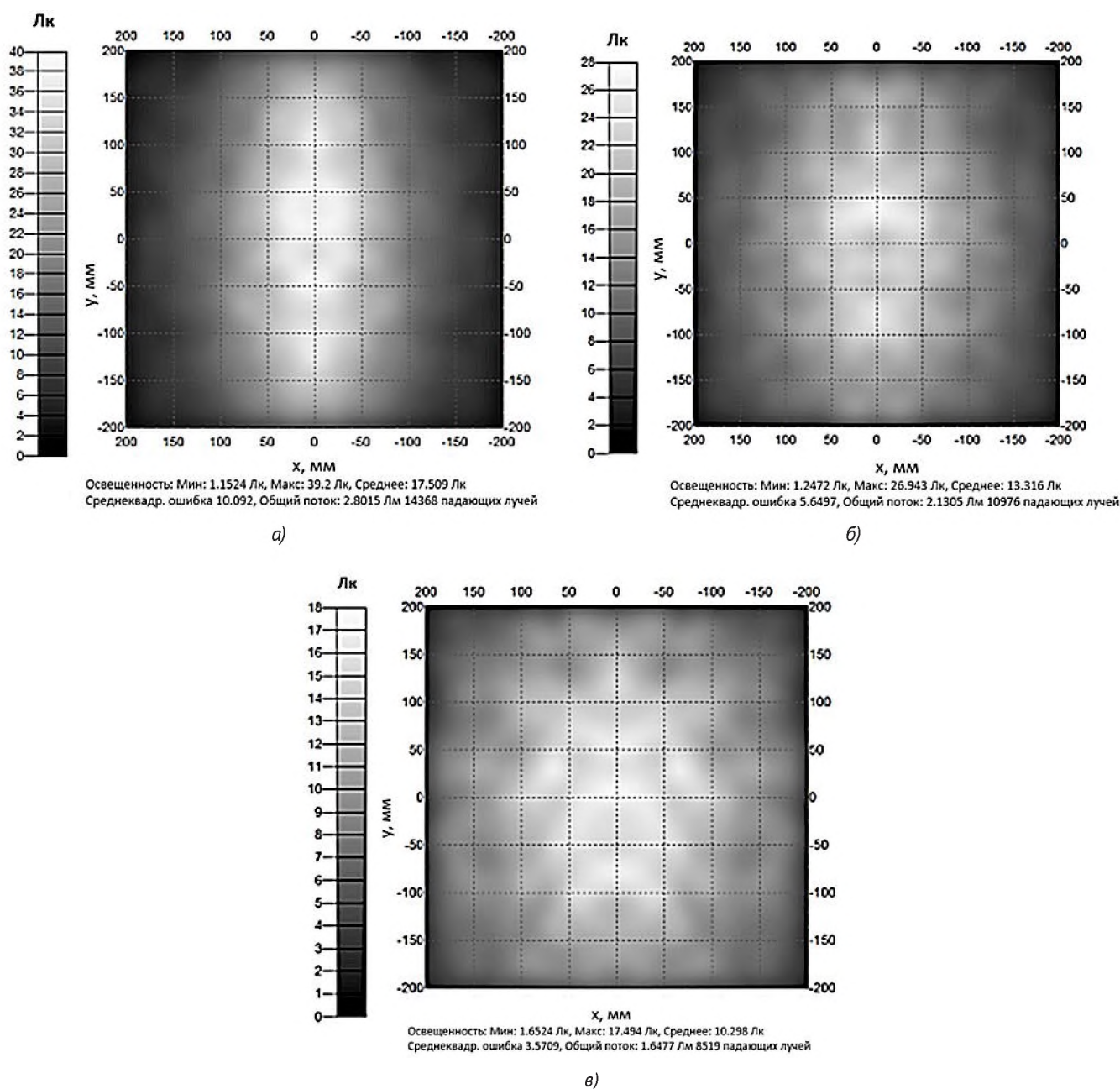
Вначале с помощью программы были получены карты распределения плотности потока теплового излучения без отражателя и при его наличии при различном расстоянии между лампой и лотком. Затем был произведен подбор геометрических характеристик отражателя для обеспечения равномерного нагрева лотка с продуктом. Проведены эксперименты по инфракрасной сушке винограда с использованием сконструированного отражателя.

На Рисунке 4 приведены карты распределения плотности потока теплового излучения при различном расстоянии от лампы до лотка.

Чем дальше лампа от лотка, тем обеспечивается более равномерное распределение плотности потока теплового излучения по поверхности лотка. Однако при этом снижается общий тепловой по-

Рисунок 4

Карта распределения плотности потока теплового излучения без отражателя при расстоянии между лампой и лотком



а – 100 мм, б – 150 мм, в – 200 мм

ток на поверхность лотка: при расстоянии 200 мм между лампой и лотком указанная характеристика в 1,7 ниже, чем при расстоянии 100 мм. Кроме того, увеличение расстояния между лампой и лотком увеличивает габаритные размеры сушильной камеры.

Для численной оценки степени равномерности падения лучей на лоток была проведена оценка яркости пикселей в различных точках полученных карт, представленных на Рисунке 4, и составлена таблица процентного отношения яркости в конкретной точке лотка к яркости в центральной точке (Таблица 1).

Таблица 1

Относительная яркость точек карт (Рисунок 4) распределения плотности потока теплового излучения

Расстояние от продольной оси, мм	Расстояние от центра до точки попе- речной оси, мм			
По карте на Рисунок 4а				
	0	60	120	180
0	100,0	98,7	92,6	70,0
60	73,0	73,0	58,3	50,4
120	44,8	44,3	39,1	30,0
180	30,4	25,2	25,2	22,6
По карте на Рисунок 4б				
	0	60	120	180
0	100	99	92	75,5
60	88,5	85,5	79	57,5
120	68	68,5	49,5	46,5
180	44	45	41,5	32
По карте на Рисунок 4в				
	0	60	120	180
0	100,0	94,4	87,1	61,4
60	86,7	85,0	76,8	57,1
120	67,8	62,7	66,5	48,5
180	51,5	48,5	40,8	34,8

Представленные в Таблице 1 данные свидетельствуют о том, что снижение плотности теплового потока по мере удаления от продольной оси лотка сильнее, чем от поперечной оси, что обусловлено геометрией самой лампы. Для комплексной оценки равномерности падения лучей по всему лотку было рассчитано среднее отклонение относительной яркости точек карт в исследованных точках от относительной яркости в центральной точке, значение которого было принято за 100 %, по следующей формуле:

$$\Delta_{\text{ср}} = 100 - \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{n}, \quad (2)$$

где n — количество исследованных точек (16); a_i — относительная яркость пиксела карты в конкретной точке, %.

Среднее отклонение относительной яркости точек карт, представленных на Рисунок 4а, 4б и 4в составили соответственно 45,1 %; 33,1 % и 33,0 %.

Подбор параметров отражателя

Обеспечить более равномерное распределение излучения на поверхность и использовать для сушки излучение не направленное на лоток можно за счет установки отражателя. Одной из наиболее эффективных конструкций отражателей для цилиндрических ламп является параболический отражатель (Рисунок 5).

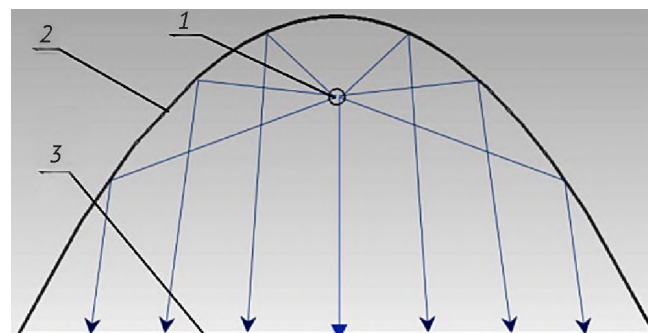
Основными параметрами параболического отражателя является фокусное расстояние и глубина. Последняя характеристика была выбрана в 200 мм чтобы максимально сохранить весь поток излучения от лампы, направив его на лоток. Фокусное расстояние было выбрано 50 мм — такое же как расстояние между лампой и отражателем (то есть лампа была помещена в фокус). Таким образом, кривизна рефлектора $k = 1/R$ составила 20 1/м. Расстояние между лотком и лампой составляло 150 мм.

На Рисунке 6 приведена карта распределения излучения по поверхности лотка при установке параболического отражателя с представленными выше параметрами.

Хоть установка данного отражателя и увеличивает общий поток излучения в 2,7 раза, но не обеспечивает достаточную степень равномерности распределения излучения по поверхности лотка: плотность потока теплового излучения на краях примерно в 2 раза ниже, чем по продольной оси лотка.

Рисунок 5

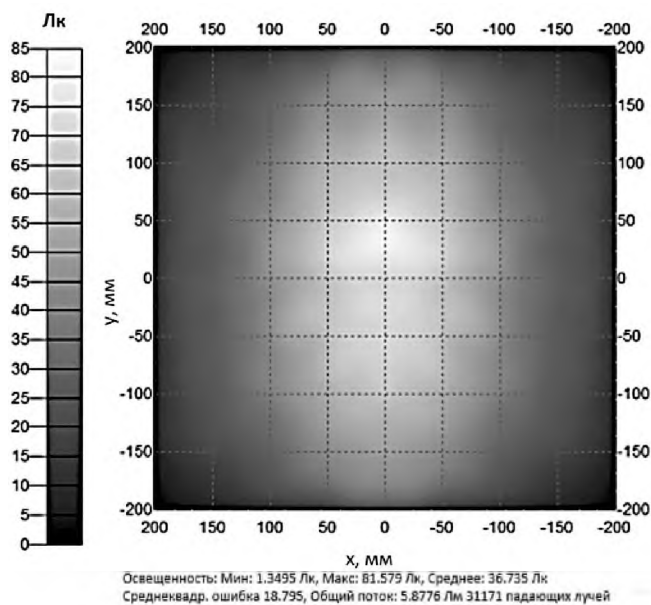
Схема с параболическим отражателем



1 — инфракрасная лампа; 2 — отражатель; 3 — лоток с сырьем

Рисунок 6

Карта распределения плотности потока теплового излучения



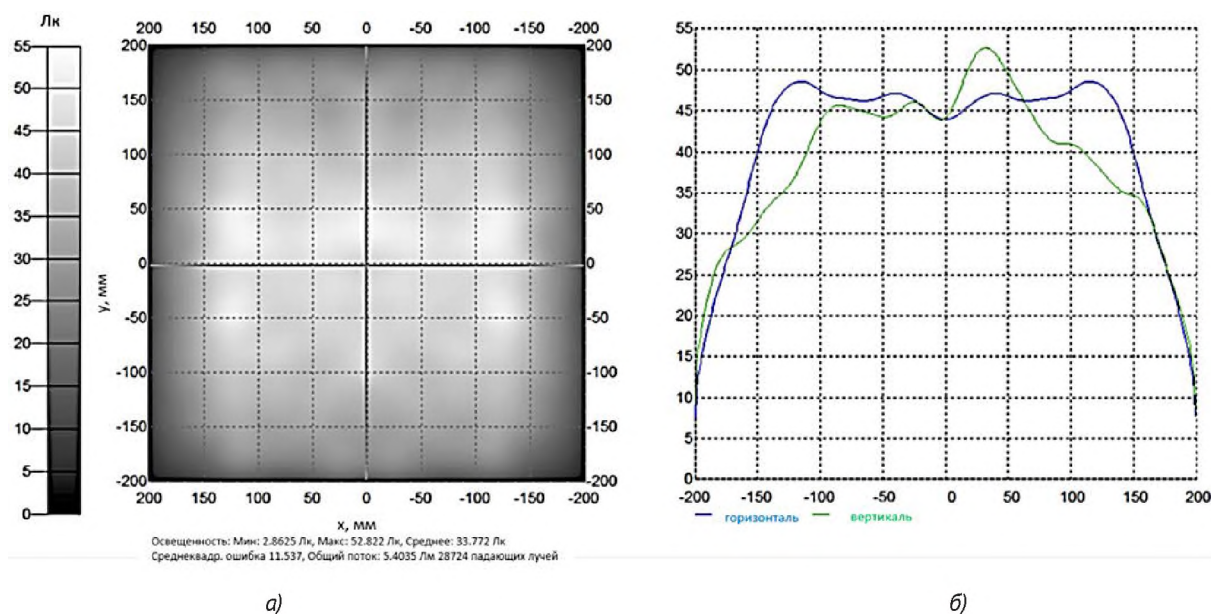
Примечание: расстояние между лотком и лампой 150 мм, фокусное расстояние рефлектора 50 мм, глубина рефлектора 200 мм

Для обеспечения равномерного падения светового потока на лоток был проведен подбор фокусного расстояния рефлектора, которое составило 70 мм, а также расстояние между лампой и лотком, составившее 152 мм. Оба параметра подбирались итерационным путем с шагом в 5 мм. Поток лучей при этом сделался расходящимся. На Рисунке 7 приведена карта распределения плотности потока теплового излучения подобранной излучательной системы, а также соответствующие графики плотности потока теплового излучения по продольному и поперечному сечению лотка.

Сравнительный анализ данных, представленных на Рисунок 6 и 7 позволяет установить, что выбранные параметры обеспечивают более равномерное падение светового потока на поверхность лотка. Для численной оценки данной характеристики была также составлена таблица относительной яркости точек карты, представленной на Рисунке 7 и рассчитано среднее отклонение относительной яркости точек карт по формуле (2), которое составило 18%. Стоит отметить, что в расчет при этом принималась область 180×180 мм. Если в расчет принимать область 120×120 мм, то указанное значение сокращается до 6%, что является высоким показателем эффективности.

Рисунок 7

Карта (а) и график (б) распределения плотности потока теплового излучения



Примечание: расстояние между лотком и лампой 152 мм, фокусное расстояние рефлектора 70 мм, глубина рефлектора 200 мм

Таблица 2

Относительная яркость точек карт (Рисунок 7) распределения плотности потока теплового излучения

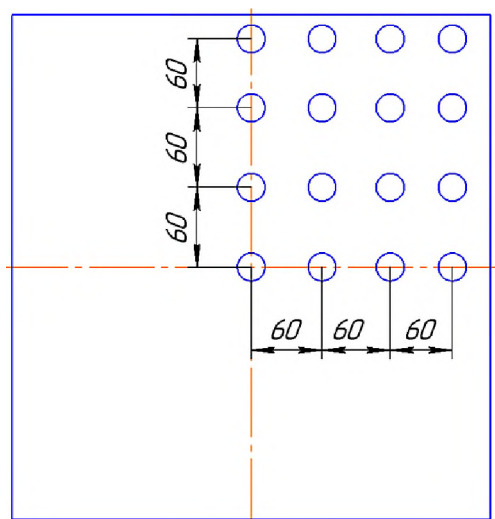
Расстояние от продольной оси, мм	Расстояние от центра до точки поперечной оси, мм			
	0	60	120	180
0	100,0	100,0	86,7	78,8
60	103,0	97,0	87,2	69,0
120	106,4	103,4	86,7	62,1
180	60,6	65,0	59,6	43,8

Экспериментальное подтверждение эффективности смоделированного отражателя

В рамках исследований были также проведены опыты по инфракрасной сушке винограда с наличием спроектированного отражателя и без него. Температура сушки составляла 40 °С, она контролировалась по термопаре, размещенной в толще ягоды в центре лотка. Изменение температуры термопары за счет ее собственного нагрева от излучения учитывалось по ее предварительной калибровке. Сушку вели до достижения влажности 7 % в ягоде, расположенной в центре лотка. Влаго содержание ягод оценивали по точкам, схема которых приведена на Рисунок 8.

Рисунок 8

Схема точек отбора ягод для анализа влагосодержания



В Таблице 3 приведены данные по влагосодержанию сухих ягод винограда в зависимости от расстояния между продольной и поперечной осями лотка и точкой замера.

Таблица 3

Влаго содержание сухих ягод винограда, %

Расстояние от продольной оси, мм	Расстояние от центра до точки поперечной оси, мм			
	<i>Без использования отражателя</i>			
	0	60	120	180
0	6,9	7,0	7,1	7,3
60	7,3	7,4	7,7	8,0
120	7,8	8,1	8,2	8,6
180	8,4	8,4	8,6	9,1
	<i>С использованием параболического отражателя</i>			
	0	60	120	180
0	7,1	7,2	7,3	7,4
60	7,2	7,2	7,3	7,5
120	7,4	7,5	7,7	7,9
180	7,6	7,8	7,9	8,1

Данные, представленные в Таблице 3 свидетельствуют о том, что без использования отражателя влагосодержание в продукте, расположенном на периферии, несколько выше, чем в ягодах, расположенных по центру лотка. При использовании отражателя эта разница существенно меньше. Содержание влаги во всех сушеных ягодах было менее 19 %, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 6882–88 «Виноград сушеный. Технические условия»¹.

Представленные выше результаты схожи с результатами проводимых ранее исследований (Chen et al., 2017; Verspeek et al., 2020; Popov et al., 2019; Waghmare et al., 2016; Черевко и соавт., 2015), подтверждающие эффективность использования параболического отражателя при инфракрасной сушке пищевых продуктов. Проведенные в работе исследования позволили разработать эффективный отражатель, который обеспечивает равномерный нагрев продукта по всей поверхности лотка и в конечном счете повышает качество сушки.

¹ ГОСТ 6882–88. (2009). Виноград сушеный. Технические условия. М.: Стандартинформ.

ВЫВОДЫ

В ходе данной работы были полностью достигнуты поставленные задачи. С помощью моделирования в программе TracePro и экспериментальными исследованиями была подтверждена эффективность разработанного параболического отражателя при инфракрасной сушке продуктов. Отражатель обеспечивает отклонение лучей таким образом, чтобы обеспечивать более равномерное падение теплового потока на всю площадь лотка с продуктом и более равномерную сушку.

Возможным направлением дальнейших исследований может быть исследование распределения светового потока в отражателях другой конструкции для обеспечения оптимальной равномерности

сти падения световых лучей на площадь лотка при возможно наименьшем размере сушильной камеры и наименьшим потерям энергии излучателя в окружающую среду. Ограничениями в такой работе являются допустимые геометрические размеры самих сушильных установок.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Ермолаев Владимир Александрович — формулирование исследовательских целей и задач; разработка или проектирование методологии исследования; создание модели исследования; проведение экспериментов; подготовка и создание рукописи, её комментирование и пересмотр.

ЛИТЕРАТУРА

- Афонькина, В. А. (2012). Теоретические аспекты обоснования выбора пленочных ИК — излучателей для сушки термолабильных культур. *Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии*, 62, 5–9.
- Ермолаев, В. А., & Расщепкин, А. Н. (2009). Определение температур вакуумной сушки твердых сыров. *Сыроделие и маслоделие*, (4), 44–45.
- Завалий, А. А., & Янович, И. В. (2010). Влияние формы отражающих поверхностей на равномерность облучения продукта сушки в инфракрасной сушильной камере. *Харчова наука і технологія*, (4), 91–95.
- Зудин, Е. С., Попов, Е. С., & Афонькина, В. А. (2017). К вопросу об инфракрасной сушке макаронных изделий. В *Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VIII международной научно-практической конференции* (с. 89–92). Саратов: Саратовский ГАУ.
- Просеков, А. Ю., Ермолаев, В. А., & Солдатова, Л. С. (2010). Аминокислотный состав сыров до и после вакуумной сушки. *Сыроделие и маслоделие*, (1), 30–31.
- Черевко, А. И., Киптелая, Л. В., & Киптелая, А. Н. (2015). Разработка ИК-сушилки с оптимальной формой камеры. *Технологический аудит и резервы производства*, (3), 4–9.
- Aboltins A., Palabinskis, J., & Vartukapteinis, K. (2017). Studies of the berry drying process in infrared film dryers. In *Proceedings of the international scientific conference Latvia University of Agriculture* (pp. 1515–1520). Latvia: Latvia University of Agriculture. <https://doi.org/10.22616/ER-Dev2017.16.N341>
- Aboltins, A., & Palabinskis, J. (2017). Studies of vegetable drying process in infrared film dryer. *Agronomy Research*, 15(2), 1259–1266.
- Adak, N., Heybeli, N., & Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, 219, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.103>
- Baptistini, F. M., Correa, P. C., Oliveira, G. H. H. D., Botelho, F. M., & Oliveira, A. P. L. R. D. (2017). Heat and mass transfer coefficients and modeling of infrared drying of banana slices. *Revista Ceres*, 64(5), 457–464. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201764050002>
- Chen, J., Yang, L., Zhang, Z., Wei, J., & Yang, J. (2017). Optimization of a uniform solar concentrator with absorbers of different shapes. *Solar Energy*, 158, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.061>
- Ermolaev, V. A. (2018). Research of vacuum drying peculiarities of wild berries. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 8(4), 3483–3489.
- Ermolaev, V. A. (2020). The study of the microstructure of cheese before and after vacuum drying. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 10(4), 6007–6014. <https://doi.org/10.33263/BRIAC104.007014>
- Ermolaev, V. A., Kechkin, I. A., Romanenko, A. I., Buzetti, K. D., Ivanov, M. V., & Makhacheva, E. V. (2021a). Study of temperature regime effect on the process of cheeses vacuum drying. *Earth and Environmental Science*, 640, Article 032040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/3/032040>
- Ermolaev, V., Kechkin, I., Makhacheva, E., Yakovchenko, M., Gurkovskaya, E., & Glebova, I. (2021b). Selection of effective technological parameters for vacuum drying of hard cheeses. *Earth and Environmental Science*, 659, Article 012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012064>
- Grdzelišvili, G., & Hoffman, P. (2012). *Infrared drying of food products*. Prague: Czech Technical University in Prague.
- Popov, V., Afonkina, V., Levinskii, V., Zudin, E., & Krivosheeva, E. (2019). Designing the infrared drying machines of

- cylindrical type with an active reflector. *Earth and Environmental Science*, 403(1), Article 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012008>
- Rasane, P. (2016). Recent advances in conventional drying of foods: A review. *Journal of Food Technology and Preservation*, 1, 24–34.
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., & Chandra, S. (2020). Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances. *Food Engineering Reviews*, 12, 381–398. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09237-w>
- Samani, B. H., Gudarzi, H., Rostami, S., Lorigooini, Z., Esmaeili, Z., & Jamshidi-Kia, F. (2018). Development and optimization of the new ultrasonic-infrared-vacuum dryer in drying *Kelussia odoratissima* and its comparison with conventional methods. *Industrial Crops and Products*, 123, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.053>
- Si, X., Chen, Q., Bi, J., Wu, X., & Li, Z. (2016). Effect of infrared drying on the drying characteristics, quality and antioxidant activity of raspberry. *Journal of food process engineering*, 16, 157–164. <https://doi.org/10.16429/j.1009-7848.2016.09.022>
- Tysén, A., Vomhoff, H., & Nilsson, L. (2018). Through air drying assisted by infrared radiation: the influence of radiator power on drying rates and temperature. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 33(4), 581–591. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-2002>
- Verspeek, S., Ribbens, B., Maldague, X., Steenackers, G. (2020). Optimisation of a heat source for infrared thermography measurements: Comparison to mehler engineering service-heater. *Applied Sciences*, 10(4), Article 1285. <https://doi.org/10.3390/app10041285>
- Waghmare, S. A., & Gulhane, N. P. (2016). Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver. *Solar Energy*, 137, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.009>
- Xie, L., Mujumdar, A. S., Fang, X. M., Wang, J., Dai, J. W., Du, Z. L., Xiao, H. W., Liu, Y., & Gao, Z. J. (2017). Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes. *Food and Bioprocesses Processing*, 102, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.01.012>
- Yan, J. K., Wu, L. X., Qiao, Z. R., Cai, W. D., & Ma, H. (2019). Effect of different drying methods on the product quality and bioactive polysaccharides of bitter melon (*Momordica charantia* L.) slices. *Food Chemistry*, 271, 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.012>
- ## REFERENCES
- Afon'kina, V. A. (2012). Teoreticheskie aspekty obosnovaniya vybora plenochnykh IK — izluchatelei dlya sushki termolabil'nykh kul'tur [Theoretical aspects of substantiation of the choice of film IR emitters for drying thermolabile cultures]. *Vestnik Chelyabinskoi gosudarstvennoi agroinzhenernoi akademii [Bulletin of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy]*, 62, 5–9.
- Ermolaev, V. A., & Rasshchepkin, A. N. (2009). Opreделение temperatur vakuumnoi sushki tverdykh syrov [Determination of vacuum drying temperatures of hard cheeses]. *Syrodellie i maslodellie [Cheese Making and Butter Making]*, (4), 44–45.
- Zavali, A. A., & Yanovich, I. V. (2010). Vliyanie formy otrazhayushchikh poverkhnostei na ravnomernost' oblucheniya produkta sushki v infrakrasnoi sushil'noi kamere [The influence of the shape of reflective surfaces on the uniformity of irradiation of the drying product in an infrared drying chamber]. *Kharchova nauka i tekhnologiya [Food Science and Technology]*, (4), 91–95.
- Zudin, E. S., Popov, E. S., & Afon'kina, V. A. (2017). K Voprosu ob infrakrasnoi sushke makaronnykh izdelii [On the question of infrared drying of pasta]. In *Aktual'nye problemy energetiki APK: Materialy VIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Actual problems of agro-industrial energy: Materials of the 8th International Scientific and Practical Conference]* (pp. 89–92). Saratov: Saratovskii GAU.
- Prosekov, A. Yu., Ermolaev, V. A., & Soldatova, L. S. (2010). Aminokislotnyi sostav syrov do i posle vakuumnoi sushki [Amino acid composition of cheeses before and after vacuum drying]. *Syrodellie i maslodellie [Cheese Making and Butter Making]*, (1), 30–31.
- Cherevko, A. I., Kiptelaya, L. V., & Kiptelaya, A. N. (2015). Razrabotka IK-sushilki s optimal'noi formoi kamery [Development of an IR dryer with an optimal chamber shape]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva [Technological Audit and Production Reserves]*, (3), 4–9.
- Aboltins A., Palabinskis, J., & Vartukapeinis, K. (2017). Studies of berry drying process in infrared film dryer. In *Proceedings of the international scientific conference Latvia University of Agriculture* (pp. 1515–1520). Latvia: Latvia University of Agriculture. <https://doi.org/10.22616/ER-Dev2017.16.N341>
- Aboltins, A., & Palabinskis, J. (2017). Studies of vegetable drying process in infrared film dryer. *Agronomy Research*, 15(2), 1259–1266.
- Adak, N., Heybeli, N., & Ertekin, C. (2017). Infrared drying of strawberry. *Food Chemistry*, 219, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.103>
- Baptistini, F. M., Correa, P. C., Oliveira, G. H. H. D., Botelho, F. M., & Oliveira, A. P. L. R. D. (2017). Heat and mass transfer coefficients and modeling of infrared drying of banana slices. *Revista Ceres*, 64(5), 457–464. <https://doi.org/10.1590/0034-737x201764050002>
- Chen, J., Yang, L., Zhang, Z., Wei, J., & Yang, J. (2017). Optimization of a uniform solar concentrator with absorbers of different shapes. *Solar Energy*, 158, 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.061>

- Ermolaev, V. A. (2018). Research of vacuum drying peculiarities of wild berries. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 8(4), 3483–3489.
- Ermolaev, V. A. (2020). The study of the microstructure of cheese before and after vacuum drying. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 10(4), 6007–6014. <https://doi.org/10.33263/BRIAC104.007014>
- Ermolaev, V. A., Kechkin, I. A., Romanenko, A. I., Buzetti, K. D., Ivanov, M. V., & Makhacheva, E. V. (2021a). Study of temperature regime effect on the process of cheeses vacuum drying. *Earth and Environmental Science*, 640, Article 032040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/3/032040>
- Ermolaev, V., Kechkin, I., Makhacheva, E., Yakovchenko, M., Gurkovskaya, E., & Glebova, I. (2021b). Selection of effective technological parameters for vacuum drying of hard cheeses. *Earth and Environmental Science*, 659, Article 012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012064>
- Grdzeliashvili, G., & Hoffman, P. (2012). *Infrared drying of food products*. Prague: Czech Technical University in Prague.
- Popov, V., Afonkina, V., Levinskii, V., Zudin, E., & Krivosheeva, E. (2019). Designing the infrared drying machines of cylindrical type with an active reflector. *Earth and Environmental Science*, 403(1), Article 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012008>
- Rasane, P. (2016). Recent advances in conventional drying of foods: A review. *Journal of Food Technology and Preservation*, 1, 24–34.
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., & Chandra, S. (2020). Infrared Drying of Food Materials: Recent Advances. *Food Engineering Reviews*, 12, 381–398. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09237-w>
- Samani, B. H., Gudarzi, H., Rostami, S., Lorigooini, Z., Esmaeili, Z., & Jamshidi-Kia, F. (2018). Development and optimization of the new ultrasonic-infrared-vacuum dryer in drying *Kelussia odoratissima* and its comparison with conventional methods. *Industrial Crops and Products*, 123, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.053>
- Si, X., Chen, Q., Bi, J., Wu, X., & Li, Z. (2016). Effect of infrared drying on the drying characteristics, quality and antioxidant activity of raspberry. *Journal of food process engineering*, 16, 157–164. <https://doi.org/10.16429/j.1009-7848.2016.09.022>
- Tysén, A., Vomhoff, H., & Nilsson, L. (2018). Through air drying assisted by infrared radiation: the influence of radiator power on drying rates and temperature. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 33(4), 581–591. <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-2002>
- Verspeek, S., Ribbens, B., Maldague, X., Steenackers, G. (2020). Optimisation of a heat source for infrared thermography measurements: Comparison to mehler engineering service-heater. *Applied Sciences*, 10(4), Article 1285. <https://doi.org/10.3390/app10041285>
- Waghmare, S. A., & Gulhane, N. P. (2016). Design and ray tracing of a compound parabolic collector with tubular receiver. *Solar Energy*, 137, 165–172. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.08.009>
- Xie, L., Mujumdar, A. S., Fang, X. M., Wang, J., Dai, J. W., Du, Z. L., Xiao, H. W., Liu, Y., & Gao, Z. J. (2017). Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): Effects on drying kinetics and quality attributes. *Food and Bioprocess Processing*, 102, 320–331. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.01.012>
- Yan, J. K., Wu, L. X., Qiao, Z. R., Cai, W. D., & Ma, H. (2019). Effect of different drying methods on the product quality and bioactive polysaccharides of bitter melon (*Momordica charantia* L.) slices. *Food Chemistry*, 271, 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.012>