

УДК 664.8.039.51+66.047.4/.5

UDC 664.8.039.51+66.047.4/.5

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки)

05.20.01 Technologies and means of agricultural mechanization (technical sciences)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА ВЫСОКОВЛАЖНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ В УСТРОЙСТВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ**HIGH-MOISTURE VEGETABLE RAW MATERIALS' HEATING UNIFORMITY EXPERIMENTAL STUDY IN A DYNAMIC INFRARED DRYING DEVICE**Сергеев Михаил Александрович
аспирант

РИНЦ SPIN-код: 3347-8362

m-sergeev1@mail.ru*Донской государственный технический университет,
Ростов-на-Дону, Россия*Sergeev Mikhail Alexandrovich
postgraduate student

RSCI SPIN-code: 3347-8362

m-sergeev1@mail.ru*Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russia*

Разработана конструкция и изготовлена экспериментальная камера динамической инфракрасной сушки растительного сырья, обеспечивающая высокое качество продукта сушки высоковлажного растительного сырья, благодаря равномерности теплового воздействия инфракрасного излучения на сырьё в ходе сушки. Выполнено сравнительное экспериментальное исследование равномерности теплового воздействия на сырьё в разработанном устройстве динамической инфракрасной сушки и шкафом устройстве инфракрасной сушки, равномерность теплового воздействия в котором обеспечивается распределением отражённого потока теплового излучения от специального образца спрофилированных зеркальных поверхностей. Для определения неравномерности теплового воздействия использован тепловизор Testo 882 с термомчувствительной матрицей размером 320×240 пиксель. Численной обработкой термограмм тепловизора получены диаграммы распределения температуры поверхности сырья, расположенного на сетчатых плоских лотках размером 500×1000 мм. Экспериментальное исследование неравномерности распределения температуры сырья по поверхности лотка устройства динамической инфракрасной сушки показало, что максимальные отклонения температуры от среднего значения находятся в пределах 1,95 – 2,117° C. Сравнительный анализ неравномерности распределения температуры сырья по поверхности лотка в устройстве динамической инфракрасной сушки и шкафом устройстве инфракрасной сушки, характерным высоким уровнем равномерности теплового воздействия на сырьё, показал, что при температурах сырья 45° C и выше неравномерность в устройстве динамической инфракрасной сушки ниже в 1,8 – 2,6 раза

We have designed and built a vegetative raw materials dynamic infrared drying experimental chamber, ensuring drying products' high quality of high-moisture vegetative raw materials due to the uniformity of infrared radiation thermal impact on raw materials in the drying process. A comparative experimental study of the thermal influence uniformity on the raw material in the developed dynamic infrared drying device and the infrared drying cabinet device in which the thermal influence's uniformity is provided by thermal radiation reflected flow distribution from specially profiled mirror surfaces was carried out. A Testo 882 thermal imager with a temperature-sensitive matrix of 320×240 pixels was used to determine the heat exposure irregularity. By using numerical thermograms of the thermal imager we obtained yielded surface temperature distribution diagrams of raw materials located on flat mesh trays of 500x1000 mm in size. Experimental study of the raw material temperature uneven distribution over the surface of the dynamic infrared drying device tray showed that the maximum temperature deviations from the average value are within 1.95 - 2.117° C. The comparative analysis of raw materials non-uniformity temperature distribution over the tray surface in the dynamic infrared drying device and the infrared drying cabinet device characterized by a high level of thermal influence uniformity on raw materials showed that at temperatures of 45° C and higher the non-uniformity in the dynamic infrared drying device is lower in 1.8 - 2.6 times

Ключевые слова: ИНФРАКРАСНАЯ СУШКА, ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ, РАСТИТЕЛЬНОЕ СЫРЬЁ

Keywords: INFRARED DRYING, PULSE HEATING, VEGETABLE RAW MATERIALS.

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-177-012> .

Введение

Основной задачей технологий сушки как способа консервирования сельскохозяйственной продукции является длительное сохранение нативных свойств сырья, его энергетической и биологической ценностей. Для обеспечения максимальных показателей сохранности нативных свойств сырья в устройстве сушки должны выполняться следующие условия: минимальный контакт поверхности сырья с окислительной окружающей средой; минимально возможная продолжительность сушки при максимально возможных допустимых температурах сырья в условиях атмосферного давления в устройстве сушки; минимально возможная неравномерность температуры сырья в объеме устройства сушки [1-8].

Первые два условия определяются способом сушки, поэтому качество продукта сушки для выбранного способа определяется третьим условием – равномерностью процесса сушки сырья в объеме устройства, которая, в первую очередь, определяется равномерностью теплового воздействия на сырьё в объеме устройства сушки.

Целью настоящей работы является определение равномерности теплового воздействия инфракрасного (ИК) излучения на сырьё, размещённое на лотках разрабатываемого нами устройства динамической инфракрасной сушки растительного сырья [3].

Материалы и методы

Схема устройства динамической инфракрасной сушки представлена на рис. 1. На опорной раме 1 установлен многоярусный ярусный каркас 2 для размещения лотков 3 с сырьём. На раме 1 закреплены направляющие 4 для перемещения каретки 5. На каретке 5 установлены инфракрасные линейные излучатели 7, размещённые между

<http://ej.kubagro.ru/2022/03/pdf/12.pdf>

ярусами с лотками 3. В донной части устройства установлен конвективный нагреватель 8, в крыше камеры

расположены вытяжные вентиляторы 9. Движение каретки 5 выполняется мотор-редуктором 10 через круговую цепную передачу 11.

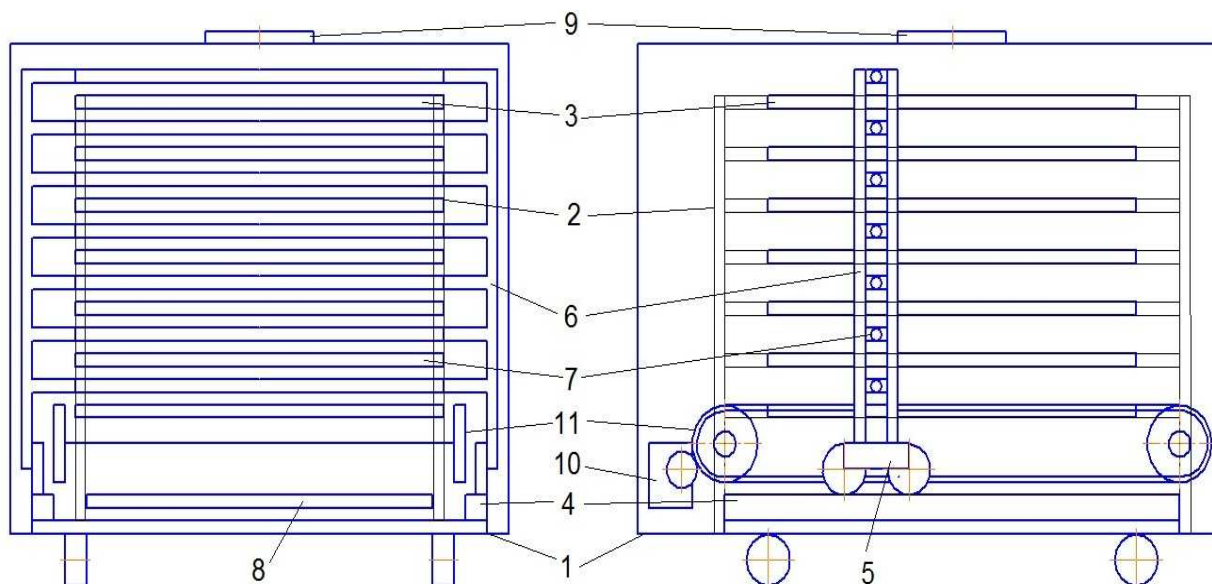


Рисунок 1 – Схема камеры динамической инфракрасной сушки

Разработана конструкция и изготовлена экспериментальная камера динамической инфракрасной сушки растительного сырья. Камера содержит 8 ярусов, расстояние между которыми составляет 65 мм. На каждом ярусе размещаются два сетчатых лотка размерами 1000х650 мм. Между ярусами установлены ИК излучатели, выполненные из фехральной спиральной проволоки, помещённой в трубку кварцевого стекла диаметром 10 мм. Электрическая мощность ИК излучателя – 1000 Вт. Длина ИК излучателя составляет 1000 мм. Поддержание в ходе сушки заданной величины температуры сырья осуществляется релейным регулятором по показаниям термопары, рабочий спай которой установлен в фрагмент сырья, размещённый в центральной части лотка с сырьём.

Для определения характера и степени неравномерности теплового действия инфракрасных излучателей на сырьё, размещённого на поверхности лотка, выполнено экспериментальное определение

неравномерности температуры сырья в ходе сушки с использованием тепловизора Testo 882.

Для сравнения степени неравномерности выполнены сушки в устройстве динамической инфракрасной сушки и шкафном устройстве инфракрасной сушки [4]. Отличительной особенностью шкафного устройства является размещение источников инфракрасного излучения за пределами поверхности лотков с сырьём. Поток теплового излучения передаётся на поверхность сырья специально спрофилированными зеркальными отражателями, расположенными по периметру межлоточного пространства устройства сушки, что обеспечивает высокий уровень распределения энергии теплового излучения по поверхности сырья [5]. В качестве сырья использованы яблоки сорта Семеренко, нарезанные ломтиками на ломтерезке, обеспечивающей одинаковую толщину ломтиков, равную 4 мм. Сушку осуществляли параллельно в обоих устройствах. Для измерения распределения температуры расположенного на лотке сырья лотки вынимали из устройств и размещали на теплоизолированной поверхности, имеющей комнатную температуру $21 \pm 1,5^\circ \text{C}$ (см. рис. 2). Измерения выполняли в моменты времени, когда температура сырья, контролируемая термопарой, размещённой в одном из ломтиков, расположенном в центральной части лотка достигала температуры 35°C , 40°C , 45°C и 50°C [9].

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены изображения термограмм, полученных тепловизором Testo 882.

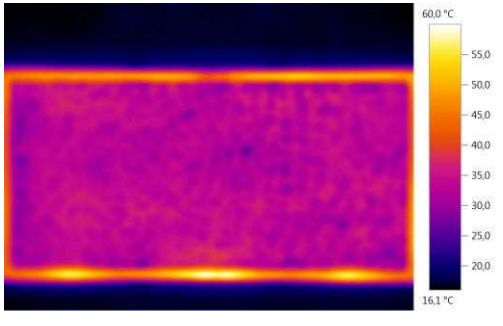
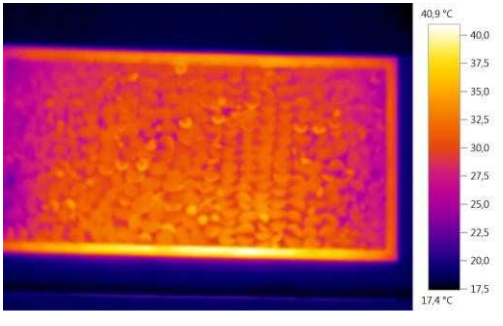
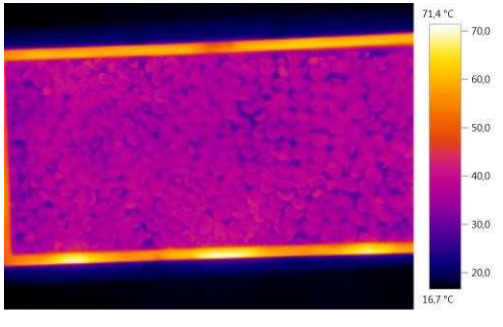
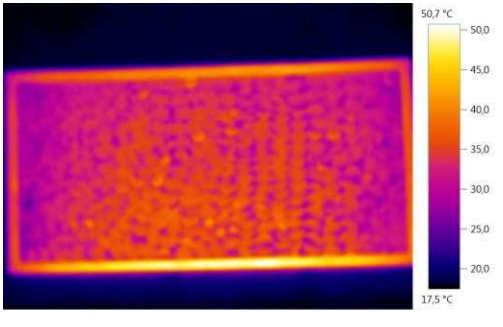
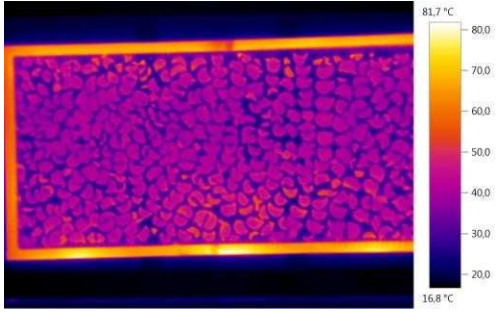
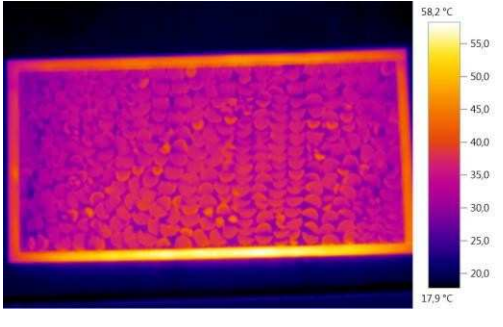
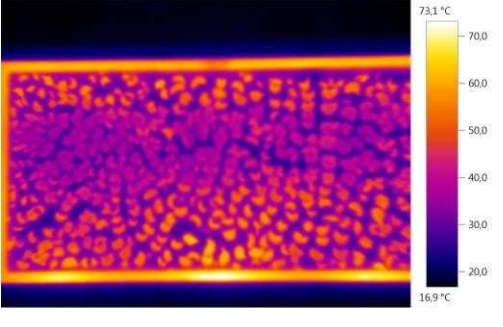
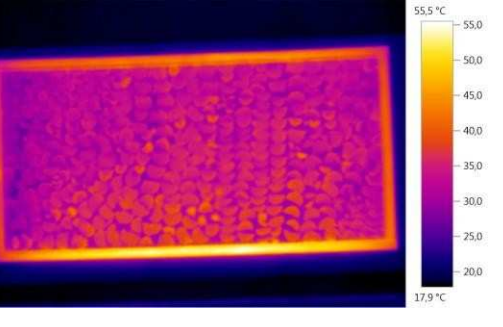


1 – сетчатый лоток; 2 – ломтики яблок; 3 – теплоизолированная поверхность (лист пеноплекса толщиной 50 мм)

Рисунок 2 – Размещение лотка с ломтиками яблок при выполнении снимка тепловизором

На представленных термограммах ось координат X направлена сверху вниз от левого верхнего угла лотка. Верхняя сторона лотка для шкафного инфракрасного устройства расположена у дверцы, оснащённой центральным отражателем, верхняя сторона для устройства динамической инфракрасной сушки расположена в центре яруса устройства.

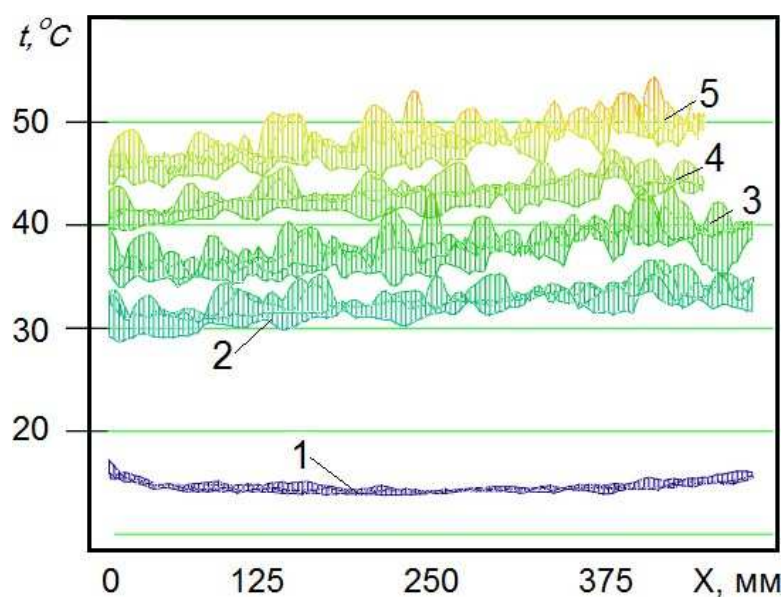
Таблица 1 – Термограммы лотков

№	tk, °C	шкафное устройство инфракрасной сушки	устройство динамической инфракрасной сушки
1	35		
2	40		
3	45		
4	50		

Визуальный анализ термограмм показывает, что в шкафном устройстве инфракрасной сушки наблюдается высокая равномерность нагрева сырья при температурах 35° С и 40° С [10].

При более высоких температурах неравномерность проявляет себя ростом температуры вдоль длинных сторон лотка у его краёв. В устройстве динамической инфракрасной сушки неравномерность наблюдается во всём диапазоне температур вдоль длинной стороны лотка: температура на краях лотка ниже, чем в его центральной части. [11, 12]. Такая неравномерность в устройстве динамической инфракрасной сушки может быть объяснена неравномерностью распределения витков спирали инфракрасного излучателя в трубке кварцевого стекла (при растягивании спирали шаг витков на её краях больше, чем шаг витков в центральной части спирали) [13].

На рис. 3 приведены диаграммы распределения температуры вдоль короткой стороны лотка, то есть вдоль оси координат X, для устройства динамической инфракрасной сушки.



1 - 15° C; 2 - 35° C; 3 - 40° C; 4 - 45° C; 5 - 50° C;

Рисунок 3 – Профили температуры сырья в устройстве динамической инфракрасной сушки

Диаграмма 1 на рис. 3 демонстрирует распределение температуры для только что выложенных на лоток ломтиков яблок перед сушкой. Характерной особенностью диаграмм 2, 3, 4 и 5 является практически линейное увеличение температуры к краю лотка, находящемуся у загрузочной двери устройства.

На рис. 4 приведены диаграммы распределения температуры вдоль короткой стороны лотка, то есть вдоль оси координат X, для шкафного устройства инфракрасной сушки.

Диаграммы 2 и 3 свидетельствуют о высокой степени равномерности распределения температуры сырья в ходе нагрева. При увеличении температуры более 40° C неравномерность нагрева увеличивается за счёт увеличения температуры сырья, размещённого ближе к источникам излучения и зеркальным отражателям, наименьшие значения температуры характерны для срединной части лотка.

Численные значения отклонений температуры от среднего значения, характеризующие неравномерность нагрева сырья на лотке для данных диаграмм на рис. 3 и 4, приведены в таблице 2.

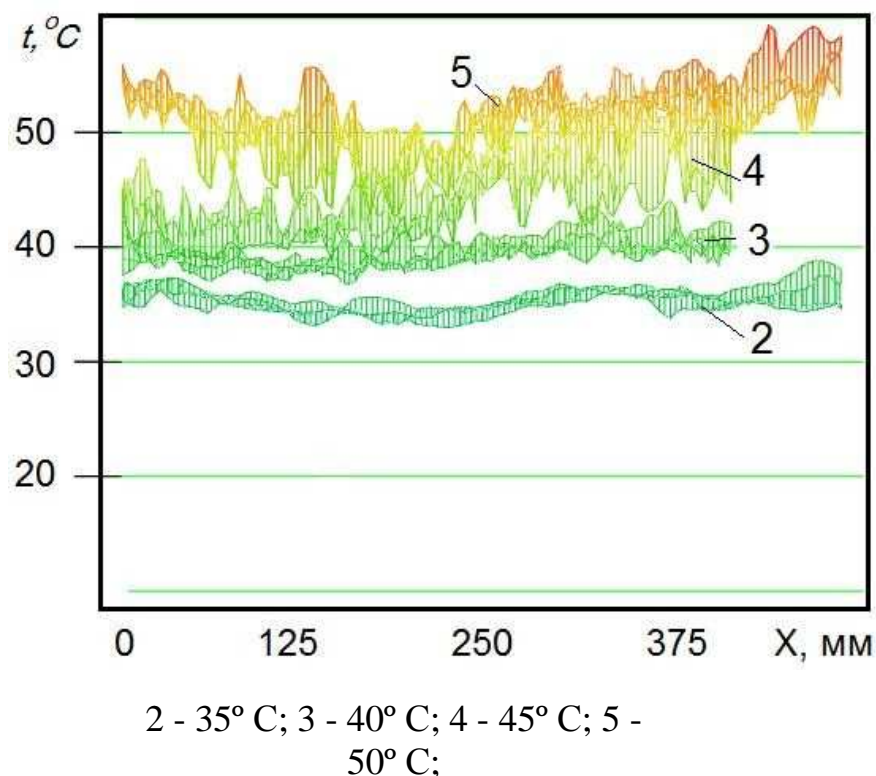


Рисунок 4 – Профили температуры сырья в шкафном устройстве инфракрасной сушки

Таблица 2 – Неравномерность температуры сырья в ходе динамической инфракрасной сушки

№	tk, °C	Отклонение температуры, °C	
		шкафное устройство инфракрасной сушки	устройство динамической инфракрасной сушки
1	15		±0,149
2	35	±0,394	±0,851
3	40	±0,795	±1,743
4	45	±3,187	±1,070
5	50	±3,628	±1,950

Предельные отклонения приведены для доверительной вероятности $R_{дов} = 0,95$.

В соответствии с данными таблицы 2 неравномерность распределения температуры в течение периода релейного регулирования температуры, характерного для уровней температуры 45°C и выше, в устройстве динамической инфракрасной сушики в 1,8 – 2,6 раза ниже, чем в шкафном устройстве инфракрасной сушики [14,15]

Выводы

Экспериментальное исследование неравномерности распределения температуры сырья по поверхности лотка устройства динамической инфракрасной сушики показало, что максимальные отклонения температуры от среднего значения находятся в пределах $1,95 - 2,117^{\circ}\text{C}$. Сравнительный анализ неравномерности распределения температуры сырья по поверхности лотка в устройстве динамической инфракрасной сушики и шкафном устройстве инфракрасной сушики, характерным высоким уровнем равномерности теплового воздействия на сырьё, показал, что при температурах сырья 45°C и выше неравномерность в устройстве динамической инфракрасной сушики ниже в 1,8 – 2,6 раза.

Повышение степени равномерности распределения температуры сырья на лотке устройства динамической инфракрасной сушики является основным фактором повышения качества продукта сушики, увеличения доли сохранённого в продукте сушики биологического потенциала растительного сырья, в первую очередь, его биологически активных веществ.

Конструкция устройства динамической инфракрасной сушики имеет резервы увеличения равномерности распределения температуры сырья в ходе сушики за счёт повышения равномерности распределения нагревательной спирали инфракрасного излучателя в его кварцевой трубке и увеличения скорости движения каретки с инфракрасными излучателями.

Литература

1. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
2. Гинзбург, А.С. Технология сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. - М. : Пищевая промышленность, 1976. – 250 с.
3. Лыков, А. В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1968. – 472 с.
4. Рогов, А.И. Применение инфракрасного излучения в отраслях пищевой промышленности (Обзор) / А.И. Рогов, Н.Н. Жуков. - М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971. - 78 с.
5. Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.
6. Рудобашта, С.П., Григорьев, И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 8. С.85-90.
7. Снежкин, Ю.Ф., Боряк, Л.А., Избасаров, Д.С. Энергосбережение и интенсификация процесса сушки импульсным ИК-облучением // Промышленная теплотехника. 2001. № 4- 5. С.90-94.
8. Завалий, А.А. Кинетика влагоудаления и разрушения витамина С при инфракрасной сушке ягод и фруктов в многоярусном шкафом устройстве / А.А. Завалий, Л.А. Лаго, А.С. Рыбалко // Агроинженерия. –2020. – № 5(99). – С. 56-63.
9. Завалий, А.А. Расчётное моделирование процесса динамической инфракрасной сушки в многоярусном шкафом устройстве / А.А. Завалий, Д.В. Ермолин Д.В., М.А. Сергеев // // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2021. – Вып. № 27 (190). – С.76–86.
10. Завалий, А.А. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов / А.А.Завалий, Ю.Ф. Снежкин. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. – 264 с.
11. Пахомов В.И., Рудой Д.В., Мальцева Т.А. Куликова Н.А., Угрехелидзе Н.Т. / Анализ влияния СВЧ-обработки на содержание незаменимых аминокислот в комбикормах / сборник научных трудов VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в науке и образовании (Конференция «ИТНО 2020») / ООО «ДГТУ-ПРИНТ» / С.34-37. DOI: 10.23947/itno.2020.34-37
12. Rudoy D., Pahomow V., Malceva T., Sarkisian D., and Saakian S. / Overview of methods of wheat grain conservation in early stages of ripeness. / IOP Conf. Series Earth and Environmental Science 937 (2021) 022113. doi:10.1088/1755-1315/937/2/02211313.
13. Sergeev M., Yermolin D., Zavaliy A., Yermolina G., and Rudoy D. / Research on phenol complex infrared dried grape pomace. / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science / 937 (2021) 022097. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022097
14. Lachuga Yu., Akhalaya B., Shogenov Yu., Meskhi B., Rudoy D., and Olshevskaya A. / Innovative pneumatic device for combined seeding of various tilled crops / E3S Web of Conferences: 8, Rostovon-Don, 19–30 august (2020) – Rostovon-Don, (2020). – P. 08016. –DOI 10.1051/e3sconf/202021008016.
15. Zavaliy A., Volozhaninov S., Shiian, O., Rudoy, D., Olshevskaya, A. / Load and thermal characteristics of a conveyor device for infrared drying and cleaning seeds. / E3S Web of Conferences, 175, 05003 (2020) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505003>

References

1. Ginzburg, A. S. Osnovy` teorii i texniki sushki pishhevy`x produktov / A. S. Ginzburg. – M.: Pishhevaya promy`shlennost`, 1973. – 528 s.
2. Ginzburg, A.S. Texnologiya sushki pishhevy`x produktov / A.S. Ginzburg. - M. : Pishhevaya promy`shlennost`, 1976. – 250 s.
3. Ly`kov, A. V. Teoriya sushki / A.V. Ly`kov. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moskva: E`nergiya, 1968. – 472 s.
4. Rogov, A.I. Primenenie infrakrasnogo izlucheniya v otraslyax pishhevoj promy`shlennosti (Obzor) / A.I. Rogov, N.N. Zhukov. - M.: CzNIITE`Ilegpishhemash, 1971. - 78 s.
5. Rogov I.A. E`lektrofizicheskie metody` obrabotki pishhevy`x produktov / I.A. Rogov. – M.: Agropromizdat, 1988. – 272 s.
6. Rudobashta, S.P., Grigor`ev, I.V. Impul`snyaya infrakrasnaya sushka semyan ovoshhny`x kul`tur, netradicionny`x i redkix rastenij // Promy`shlennaya teplotexnika. 2011. T. 33. № 8. S.85-90.
7. Snezhkin, Yu.F., Boryak, L.A., Izbasarov, D.S. E`nergoberezhenie i intensivatsiya processa sushki impul`sny`m IK-oblucheniem // Promy`shlennaya teplotexnika. 2001. № 4-5. S.90-94.
8. Zavalij, A.A. Kinetika vlagoudaleniya i razrusheniya vitamina S pri infrakrasnoj sushke yagod i fruktov v mnogoyarusnom shkafnom ustrojstve / A.A. Zavalij, L.A. Lago, A.S. Ry`balko // Agrozhenneriya. –2020. – № 5(99). – S. 56-63.
9. Zavalij, A.A. Raschyotnoe modelirovanie processa dinamicheskoy infrakrasnoj sushki v mnogoyarusnom shkafnom ustrojstve / A.A. Zavalij, D.V. Ermolin D.V., M.A. Sergeev // // Izvestiya sel`skoxozyajstvennoj nauki Tavridy`. – 2021. – Vy`p. № 27 (190). – S.76–86.
10. Zavalij, A.A. Razrabotka i teplovoe modelirovanie ustrojstv infrakrasnoj sushki termolabil`ny`x materialov / A.A.Zavalij, Yu.F. Snezhkin. – Simferopol`: IT «ARIAL», 2016. – 264 s.
11. Paxomov V.I., Rudoy D.V., Mal`ceva T.A. Kulikova N.A., Ugrexelidze N.T. / Analiz vliyaniya SVCh-obrabotki na sodержanie nezamenimy`x aminokislot v kombikormax / sbornik nauchny`x trudov VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Innovacionny`e texnologii v nauke i obrazovanii (Konferenciya «ITNO 2020») / ООО «DGTU-PRINT» / S.34-37. DOI: 10.23947/itno.2020.34-37
12. Rudoy D., Pahomov V., Malceva T., Sarkisian D., and Saakian S. / Overview of methods of wheat grain conservation in early stages of ripeness. / IOP Conf. Series Earth and Environmental Science 937 (2021) 022113. doi:10.1088/1755-1315/937/2/02211313.
13. Sergeev M., Yermolin D., Zavalij A., Yermolina G., and Rudoy D. / Research on phenol complex infrared dried grape pomace. / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science / 937 (2021) 022097. doi:10.1088/1755-1315/937/2/022097
14. Lachuga Yu., Akhalaya B., Shogenov Yu., Meskhi B., Rudoy D., and Olshevskaya A. / Innovative pneumatic device for combined seeding of various tilled crops / E3S Web of Conferences: 8, Rostovon-Don, 19–30 august (2020) – Rostovon-Don, (2020). – P. 08016. – DOI 10.1051/e3sconf/202021008016.
15. Zavalij A., Volozhaninov S., Shiian, O., Rudoy, D., Olshevskaya, A. / Load and thermal characteristics of a conveyor device for infrared drying and cleaning seeds. / E3S Web of Conferences, 175, 05003 (2020) https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017505003