

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

FOOD SYSTEMS



УДК 681.51:66.047

Оригинальное эмпирическое исследование

Экспериментальное исследование параметров тонкослойной дегидратации яблочных чипсов

М.К. Тимошенко¹ , Нгуен Суан Тьем² ¹ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону Российская Федерация² Вьетнамский технический университет им. Ле Куй Дона, г. Ханой, Вьетнам✉ miroslav.timoshenko@gmail.com

Аннотация

Введение. Сохранение урожая в настоящее время является ключевым направлением сельского хозяйства. Согласно докладу об индексе пищевых отходов ЮНЕП (UNEP Food Waste Index Report) ежегодно в мире выбрасывается около 1,05 млрд тонн еды на этапе потребления. Еще около 14% продуктов теряется на этапе сбора урожая и транспортировки. Хранение скоропортящейся продукции требует больших энергозатрат, а многие продукты не поддаются заморозке. Дегидратация снижает влажность, замедляя порчу, уменьшает вес и объем продукции, но сама является энергоёмким процессом. Цель исследования — разработать энергоэффективную технологию сушки бытовым дегидратором, сохраняющую пищевые и органолептические свойства продукта, и создать соответствующий прототип дегидратора на основе анализа кинетики сушки и сенсорной оценки продукции.

Материалы и методы. Модернизированный бытовой дегидратор позволяет не только задавать усреднённые параметры сушки, но и контролировать остаточную влажность продукта. Система включает: корпус с поддонами, нагревателем (до 250 Вт) и вентилятором (20–30 Вт); датчики температуры (DS18B20) и влажности (BME 280); микроконтроллер ESP 32 с WiFi и Bluetooth; дисплей ICST7789VW, сенсорные кнопки TTP223; симисторные реле Omron G3MB 202P для управления нагревателем и вентилятором. Модули по шине I2C объединены на одной шине с корректировкой адресов датчиков; датчик DS18B20 подключён по 1 Wire (с обязательной подтяжкой линии к питанию). В силовой цепи применены предохранители: 0,15 А для вентилятора, 1,5 А — для нагревателя (с 50 % запасом перегрузки), что защищает от короткого замыкания и не превышает предельный ток реле (2 А).

Результаты исследования. В ходе эксперимента провели тонкослойную сушку яблок: диски толщиной 7 мм (точность 0,1 мм) разместили на решётках дегидратора. Начальная масса — 577,2 г, после сушки — 89,4 г (потеря массы — 487,8 г), толщина дисков снизилась до 2 мм. Энергию измеряли ваттметром (1845 Вт·ч) и косвенно — по мощности нагревателя (210 Вт) и срабатыванию реле; энергия на сушку — 1700 Вт·ч. Телеметрию с датчиков передавали в Telegram бот (в формате JSON), затем экспортировали в текстовый файл и обрабатывали в Python и Matlab. Результаты представлены на графиках (влажность, влагопотеря, удельная влажность, эффективность).

Обсуждение и заключение. Тестирование прототипа дегидратора позволило оценить параметры сушки яблочных чипсов. Применялся комплексный подход: контролировались характеристики сырья, энергозатраты и параметры процесса с помощью телеметрической системы. Система передавала данные в Telegram бот, затем их обрабатывали в JSON, экспортировали в таблицу и анализировали в Matlab. Графики динамики влагопотери и других показателей помогли оценить энергоэффективность установки. Анализ удельной эффективности позволяет оптимизировать режим сушки. Исследование подтвердило работоспособность прототипа и эффективность методики. Разработанная система сбора данных пригодна для тестирования аналогичных установок, а полученные показатели — для сравнения методов дегидратации и расчётов технико-экономических параметров.

Ключевые слова: дегидратация, энергоэффективность, хранение урожая, влажность, телеметрия, энергозатраты, органолептические свойства

Для цитирования. Тимошенко М.К., Нгуен Суан Тьем. Экспериментальное исследование параметров тонкослойной дегидратации яблочных чипсов. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):49–57.

Experimental Investigation of Thin-Layer Dehydration Characteristics of Apple Chips

Miroslav K. Timoshenko¹  , Nguyen Xuan Thiem² 

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

²Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

 miroslav.timoshenko@gmail.com

Abstract

Introduction. Post-harvest preservation is currently a critical issue in agriculture. According to the UNEP Food Waste Index Report, approximately 1.05 billion tonnes of food are wasted annually at the consumption stage globally. Furthermore, approximately 14% of food products are lost during harvesting and transportation. The storage of perishable commodities is highly energy-intensive, and numerous food products are unsuitable for freezing. Dehydration effectively reduces moisture content, thereby inhibiting spoilage and reducing product weight and volume; however, the dehydration process itself is inherently energy-consuming. The objective of this study is to develop an energy-efficient drying technology using a domestic dehydrator that preserves the nutritional and organoleptic properties of the product, and to design a corresponding dehydrator prototype based on drying kinetics analysis and sensory evaluation.

Materials and Methods. The upgraded domestic dehydrator enables both the setting of averaged drying parameters and the monitoring of the residual moisture content of the product. The system architecture comprises a chassis with trays, a heating element (up to 250 W), and a fan (20–30 W); temperature (DS18B20) and humidity (BME280) sensors; an ESP32 microcontroller with Wi-Fi and Bluetooth connectivity; an ST7789VW display, and TTP223 capacitive touch buttons; and Omron G3MB-202P triac relays for heater and fan control. The modules are integrated via a common I2C bus with adjustable sensor addressing; the DS18B20 sensor is interfaced using the 1-Wire protocol with a mandatory pull-up resistor on the data line. Fuses are integrated into the power circuit: 0.15 A for the fan and 1.5 A for the heating element (incorporating a 50% overload margin), which ensures short-circuit protection and does not exceed the maximum rated current of the relays (2 A).

Research Results. During the experimental procedure, thin-layer drying of apples was performed: apple discs with a thickness of 7 mm (accuracy of ± 0.1 mm) were arranged on the dehydrator trays. The initial mass was 577.2 g, decreasing to 89.4 g post-drying (mass loss of 487.8 g), while the disc thickness was reduced to 2 mm. Energy consumption was monitored using a wattmeter (1845 Wh) and evaluated indirectly based on the heater power (210 W) and the relay duty cycle; the net energy consumed for drying was 1700 Wh. Telemetry data from the sensors were transmitted to a Telegram bot in JSON format, subsequently exported to a text file, and processed utilizing Python and MATLAB. The findings are presented graphically, illustrating moisture content, moisture loss rate, specific humidity, and process efficiency.

Discussion and Conclusion. Testing of the prototype dehydrator enabled the evaluation of the drying parameters for apple chips. A comprehensive approach was employed, whereby raw material characteristics, energy consumption, and process parameters were continuously monitored using a telemetry system. The system transmitted data to a Telegram bot in JSON format, which was subsequently exported to a tabular format and analyzed utilizing MATLAB. Graphs illustrating moisture loss dynamics and other key indicators facilitated an assessment of the system's energy efficiency. Analysis of the specific efficiency allows optimization of the drying regime. The study confirmed the operability of the prototype and the efficacy of the developed methodology. The proposed data acquisition system is suitable for testing similar installations, while the obtained performance indicators can be utilized for benchmarking dehydration methods and calculating technical and economic parameters.

Keywords: dehydration, energy efficiency, post-harvest preservation, moisture content, telemetry, energy consumption, organoleptic properties

For citation. Timoshenko MK, Nguyen Xuan Thiem. Experimental Investigation of Thin-Layer Dehydration Characteristics of Apple Chips. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):49–57.

Введение. Сохранение урожая — одно из ключевых направлений современного сельского хозяйства, значимость которого в нынешних условиях трудно переоценить. В ситуации нарастающей экономической и политической нестабильности в мире всё больше экспертов обращают внимание на угрозу продовольственного кризиса. Прогнозы аналитиков указывают на реальную опасность масштабного голода: по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO), ещё в 2010 году от недоедания страдали около 925 миллионов

человек — порядка 16 % населения планеты¹. Сегодня в 29 странах сохраняется острая нехватка продовольствия, а последствия дефицита питания трагичны: ежегодно от голода и недоедания умирает 2,2 миллиона детей.

Парадоксальность ситуации заключается в том, что на фоне столь серьёзной проблемы в экономически развитых регионах наблюдается значительная расточительность в обращении с продуктами: ежедневно в мире утилизируется свыше 2,5 миллионов тонн продовольствия, так и не попавшего к потребителю. В этих условиях критически важными становятся осознанное потребление, грамотное распределение ресурсов и максимально эффективное сохранение получаемого урожая.

Особую сложность представляет хранение скоропортящейся продукции — овощей, фруктов, ягод, трав: чтобы сберечь не только товарный вид, но и питательную ценность таких продуктов, требуются существенные энергозатраты на поддержание особых климатических и температурных условий. Для ряда культур допустимо хранение в холодильных камерах при температуре от -2 до 0 °C и влажности 85–95 %, однако многие продукты (например, бананы, сезонные ягоды, лекарственные травы) не поддаются длительному хранению и не подходят для заморозки.

В такой ситуации одним из наиболее действенных способов сохранения продукции становится дегидратация (сушка). Этот метод позволяет существенно снизить содержание воды в продукте, тем самым ограничивая микробиологические и ферментативные процессы, приводящие к порче. Сушка минимизирует биохимическую, химическую и микробиологическую деградацию, заметно уменьшает вес и объём продукции, а значит, сокращает расходы на упаковку, транспортировку и хранение, позволяя держать продукты при температуре окружающей среды.

Вместе с тем сушка — энергоёмкий процесс, поэтому актуальной задачей становится разработка и внедрение более эффективных технологий, позволяющих сократить энергозатраты [1, 3]. При этом важно учитывать специфику биопродуктов: высокое начальное содержание влаги, чувствительность к температурному воздействию (что влияет на цвет, вкус, текстуру и пищевую ценность), а также такие технологические сложности, как усадка и агломерация продукта в ходе сушки. Кинетика сушки помогает установить взаимосвязь между изменением влажности материала и параметрами процесса, свойствами сырья и рядом других факторов [2].

Разработка алгоритмов и прототипов интеллектуальных сушильных установок имеет большое значение для агропромышленного комплекса [4]. Цель исследования — определить условия, при которых сушка будет не только энергоэффективной, но и максимально сохранит пищевые и органолептические характеристики конечного продукта, а также создать прототип дегидрататора, удовлетворяющий вышеперечисленным требованиям. Достичь этого можно посредством комплексного анализа кинетики сушки, динамики изменения состава питательных веществ и результатов сенсорной оценки сушёной продукции.

Материалы и методы. Перспективным направлением развития дегидрататоров является оснащение их датчиками влажности и температуры, позволяющими оценить величину остаточной влажности высушиваемого продукта. Современные датчики целесообразно подключать к микроконтроллерам, что позволяет создать локальную систему микропроцессорного управления дегидрататором, существенно повысив его функциональность [5]. В итоге проведенной модернизации получим перспективный бытовой дегидрататор, позволяющий не только осуществлять сушку, задавая усредненные значения температуры и времени сушки, но и контролировать процесс сушки, оценивая остаточную влажность продукта в дегидрататоре [6, 7]. Такая система должна содержать следующие компоненты:

- корпус дегидрататора, с размещенными в нем поддонами, нагревателем и вентилятором;
- нагреватель с системой, позволяющей регулировать его мощность (в качестве такой системы для бытового дегидрататора может выступать симисторное реле);
- вентилятор с регулируемой скоростью вращения. Скорость вращения также может управляться симисторным реле (в случае использования асинхронного двигателя), либо транзисторным драйвером в случае использования двигателя постоянного тока.
- датчик температуры, контролирующий температуру воздуха на выходе нагревателя;
- блок датчиков температуры и влажности, контролирующий влажность воздуха на выходе дегидрататора;
- интерфейсные модули (дисплей, кнопки), используемые для задания параметров сушки;
- микроконтроллерный блок управления на современном микроконтроллере, имеющем модули WiFi и Bluetooth для управления системой и обеспечения удобного беспроводного интерфейса.

В качестве объекта управления выбираем бытовой дегидрататор башенного типа. Дегидрататор снабжен нагревателем мощностью до 250 Вт и вентилятором мощностью 20–30 Вт. В качестве управляющего микроконтроллера системы управления выбираем плату на микроконтроллере ESP-32. Для измерения температуры и влажности выбираем интегральные датчики модели BME-280 с подключением по шине I²C; для контроля температуры

¹ <https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/en/c/122049/>

нагревателя используем цифровой термометр модели DS18B20 с подключением по шине 1-Wire. Для управления процессом сушки выбираем сенсорные кнопки на кон троллере TTP223. В индикации режимов работы используем монохромный графический дисплей типа ICST7789VW 0.96 с разрешением 80×160 точек и интерфейсом I²C. Для управления нагревателем и вентилятором используем два симисторных реле типа Omron типа G3MB-202P.

Структура модели дегидрататора показана на рис. 1, структурная схема системы управления — на рис. 2

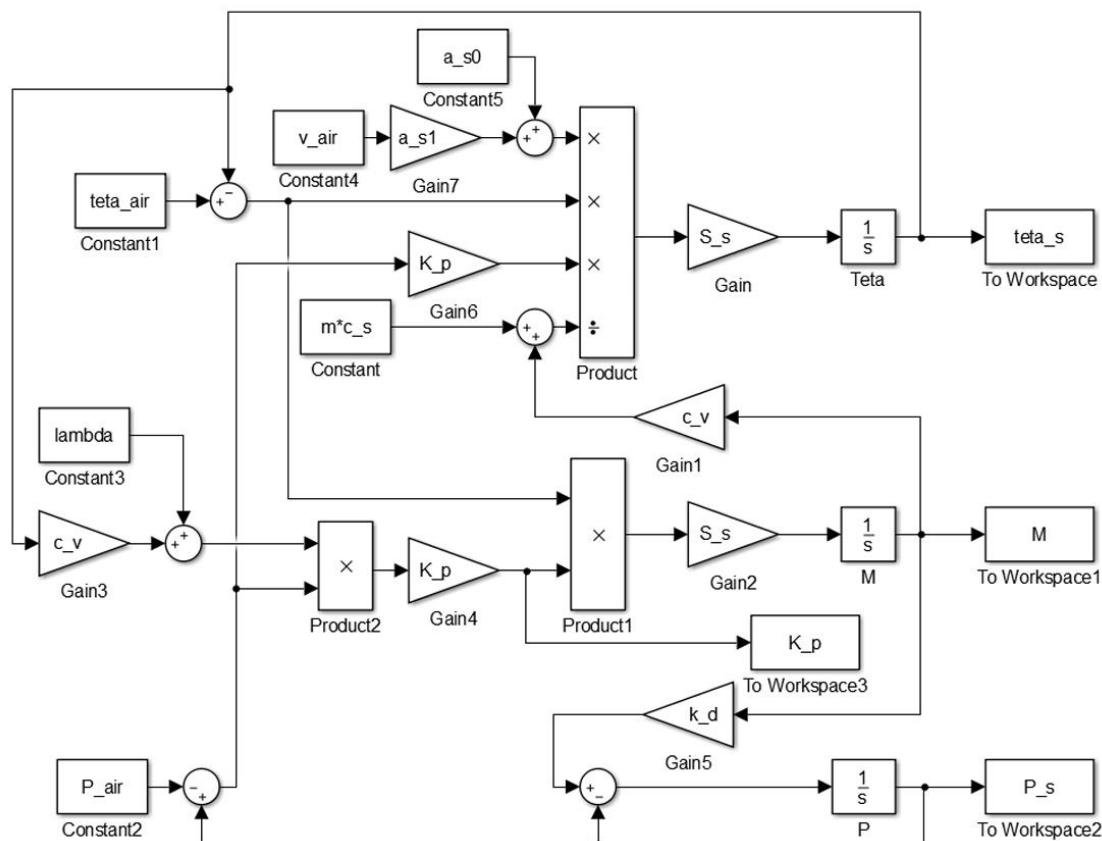


Рис. 1. Структура модели дегидрататора без учета сушащихся фруктов

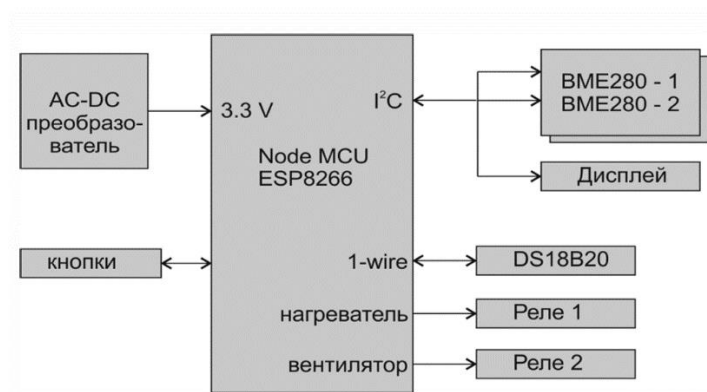


Рис. 2. Структурная схема системы управления дегидрататором

Схема электрических соединений представлена на рис. 3. В качестве особенностей реализации схемы электрических соединений следует упомянуть следующее:

- все модули, коммуникации с которым происходят по шине I²C подключаются на одну шину. Для исключения конфликта адресов датчиков BME280, которые по умолчанию имеют адрес на шине 0×76 , на плате второго датчика замыкается перемычка, и адрес переключается на 0×77 . Адрес дисплея, по умолчанию — $0 \times 3C$, и он не конфликтует с датчиками [8]. Для повышения скорости передачи по шине, согласно техническому описанию, линии SDA и SCL шины I²C подтянуты к питанию с помощью резисторов 4.7 кОм;

- цифровой датчик температуры DS18B20 подключен к микроконтроллеру по шине 1-Wire. Если для шины I²C подтяжка сигнальных линий SDA и SCL к питанию является желательной, но в ряде случаев информацию

можно передавать и без нее, то для шины 1-Wire подтяжка сигнальной линии к питанию является обязательной, в противном случае, в силу схемной реализации, датчик не сможет передавать информацию в контроллер;

– в силовой цепи подключения вентилятора и нагревателя использованы плавкие предохранители. Номинал тока срабатывания предохранителей выбирается исходя из мощности нагрузки. Для вентилятора, мощностью 20 Вт, выбран предохранитель на 0,15 А, для нагревателя мощностью 230 Вт выбран предохранитель на 1,5 А. Запас перегрузки по току составляет порядка 50 %, что гарантирует отсутствие ложных срабатываний, но обеспечивает защиту в случае короткого замыкания на нагрузку. При этом предельный ток симисторного реле (2А) также не будет превышен.

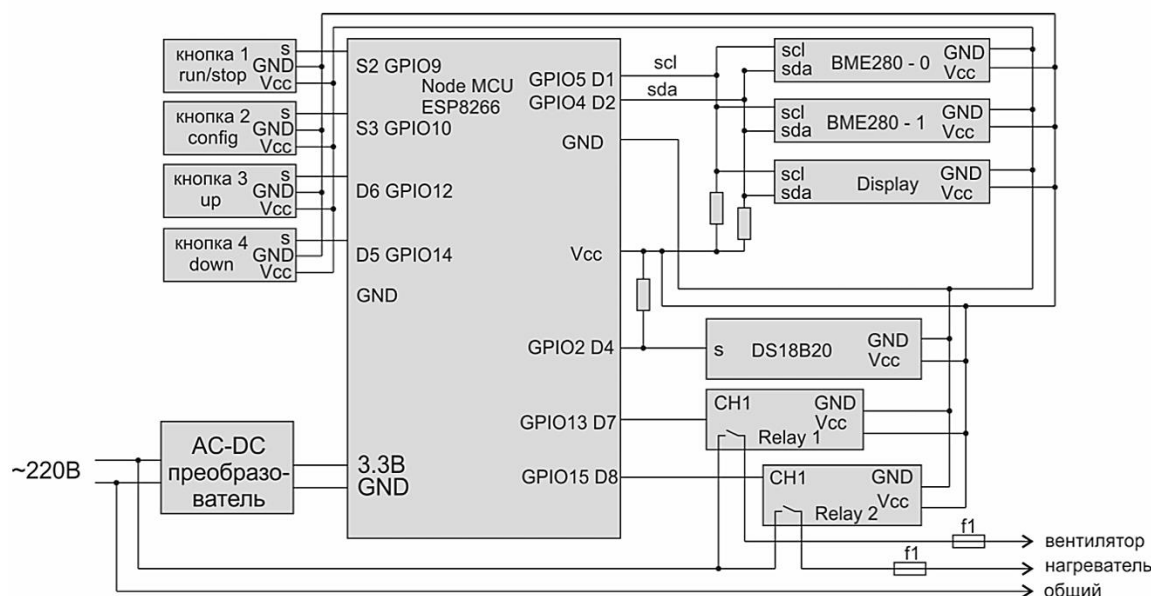


Рис. 3. Схема электрических соединений модулей системы управления сушильной установкой

Результаты исследования. Для тестового исследования процесса дегидрации на прототипе был проведен ряд экспериментов. Одним из первых экспериментов была экспериментальная тонкослойная сушка яблок. Яблоки были вымыты, высушены, разрезаны поперек на диски толщиной 7 мм (рис. 4, а). Точность измерения толщины диска: 0,1 мм. Разброс толщин дисков – 1 мм. Первые и последние диски, имеющие большую конусность, не использовались. Диски были размещены на решетках дегидратора, для определения необходимого количества, после чего собраны на тарелку и взвешены (рис. 4, б). Точность определения веса – 1 грамм. Начальная масса яблок: 577,2 грамм. После взвешивания диски были разложены по решеткам в прежнем порядке, и сфотографированы для определения площади. После сушки диски были вновь взвешены и измерена их толщина (рис. 4, в, г). Толщина дисков: 2 мм, вес – 89,4 грамм. Разница в весе составила 487,8 грамм.

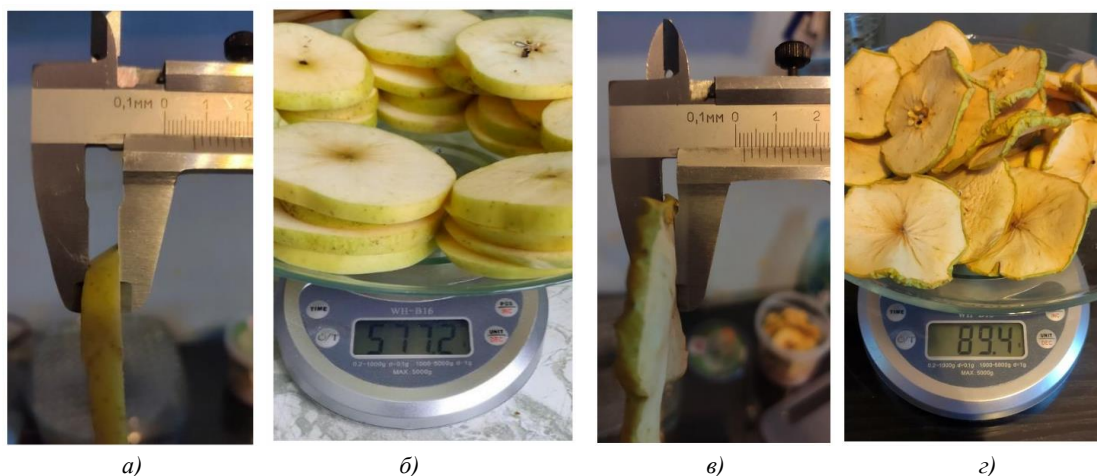


Рис. 4. Определение параметров яблочных дисков до и после сушки:

а – толщина диска до сушки; б – вес дисков до сушки; в – толщина диска после сушки; г – вес дисков после сушки

Энергия, затраченная на сушку, измерялась двумя способами:

– с помощью встроенного ваттметра (рис. 6), который измерял всю электрическую мощность, потребленную системой, и состоящую из мощности, потребляемой нагревателем, мощности, потребляемой вентилятором и мощности, потребляемой контроллером;

– косвенным методом, исходя из известной мощности нагревателя (210 Вт) и скважности работы реле управления нагревателем. Скважность, усредненная за 60 секунд выводилась в составе телеметрической информации в процессе работы дегидрататора. По показаниям встроенного ваттметра, потребленная энергия составила 1845 Вт·ч. Вентилятор потребляет 18 ватт, что позволяет определить энергию, затраченную непосредственно на сушку: 1700 Вт·ч.



Рис. 6. Показания табло встроенного ваттметра после окончания сушки на 1 этапе экспериментов

Телеметрическая информация о процессе дегидратации записывалась с массива датчиков и передавалась в Телеграм-бот каждую минуту. Управление дегидрататором также осуществлялось через команды телеграм-бота. Типичная картина телеметрической информации на экране бора приведена на рис. 7.



Рис. 7. Телеметрическая информация на экране бота

Блок одного сообщения телеметрической информации в формате json вы глядит следующим образом:

```
{
  "id": 269840,
  "type": "message",
  "date": "2022-01-16T11:30:53",
  "from": "DehydratorBot",
  "from_id": "user1724680776",
  "text": "121 52.31 37.91 27.69 100870.70 25.67 49.98 100898.66 24.90 26.45 100892.91 1.15 5.15 840.00 1000"
}
```

История работы дегидрататора экспортируется в текстовый файл в формате «машиночитаемый json», и с помощью программы на языке python преобразуется в текстовый файл с таблицей телеметрических переменных. Дальнейшая обработка данных производится в математическом пакете Matlab. Экспериментальные результаты, полученные после предварительной обработки телеметрии, приведены на следующих графиках (рис. 8–11).

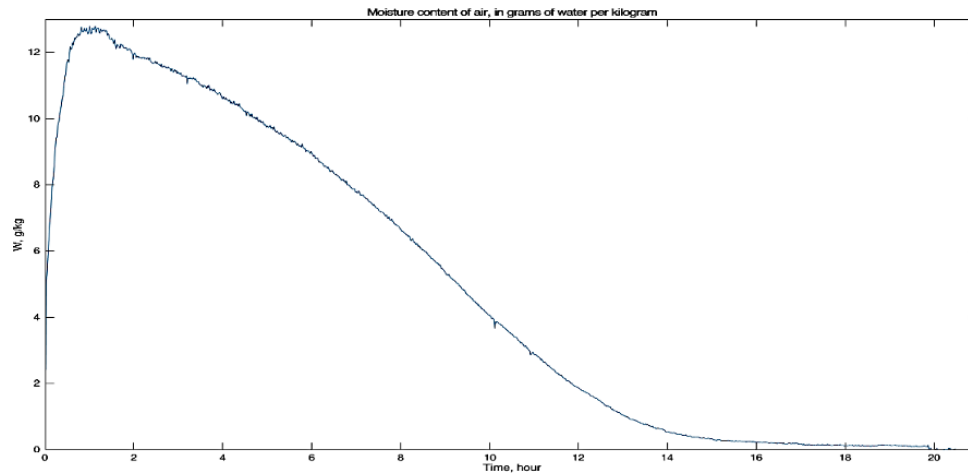


Рис. 8. Влажность воздуха на выходе сушилки

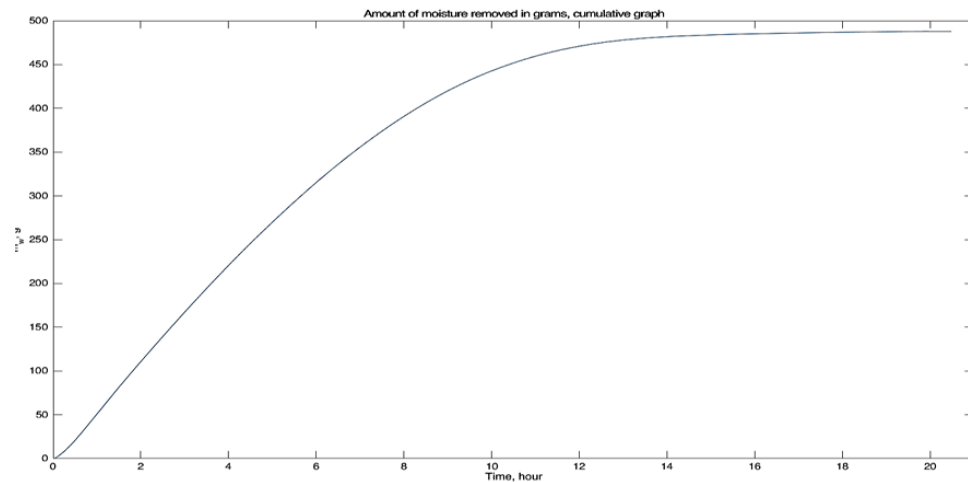


Рис. 9. Интегральная влагопотеря на выходе сушилки

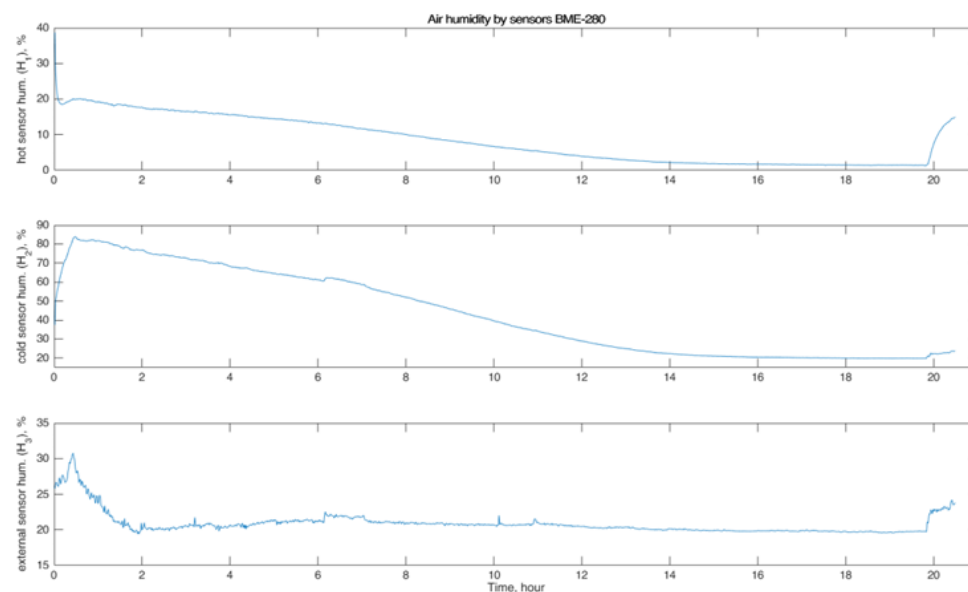


Рис. 10. Удельная влажность на датчиках в сушилке

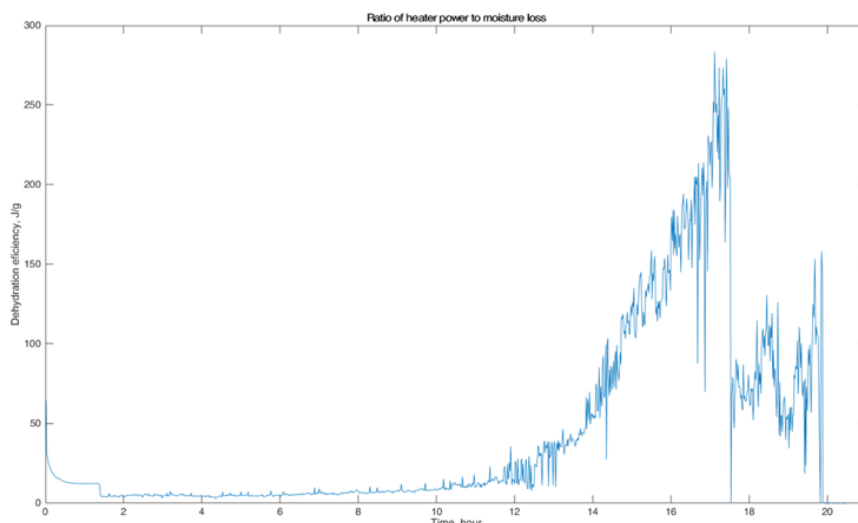


Рис. 11. Удельная эффективность (отношение влагопотери к мощности на нагревателе)

Обсуждение и заключение. Проведённое тестовое исследование процесса дегидратации на прототипе дегидрататора позволило экспериментально оценить ключевые параметры сушки на примере тонкослойной сушки яблочных дисков. В ходе работы был реализован комплексный подход к сбору и обработке данных: от контроля геометрических и массовых характеристик сырья до детального учёта энергозатрат и непрерывного мониторинга параметров процесса с помощью телеметрической системы.

Телеметрическая система, включающая массив датчиков и передачу данных в Телеграм бот с последующей обработкой в формате JSON, экспортом в табличный вид и анализом в Matlab, показала свою эффективность. Полученные графики (влагосодержание воздуха на выходе, интегральная влагопотеря, удельная влажность, удельная эффективность) позволили детально проследить динамику процесса дегидратации и оценить энергоэффективность работы установки. В частности, анализ удельной эффективности (отношения влагопотери к мощности нагревателя) даёт возможность оптимизировать режим работы дегидрататора для достижения наилучшего баланса между скоростью сушки и энергопотреблением.

Практическая значимость работы заключается в апробации прототипа дегидрататора и методики экспериментального исследования процессов сушки. Разработанная система сбора и обработки телеметрических данных может быть использована для тестирования и настройки аналогичных установок, а полученные количественные показатели — для сравнения с другими методами дегидратации и расчёта технико-экономических параметров. Таким образом, проведённое исследование подтвердило работоспособность прототипа дегидрататора, продемонстрировало эффективность выбранной методики эксперимента и заложило основу для последующих работ по совершенствованию технологии сушки.

Список литературы/References

1. Hatami S, Payganeh G, Mehrpanahi A. Energy and exergy analysis of an indirect solar dryer based on a dynamic model. *Journal of Cleaner Production*. 2020;244. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118809>
2. Jaszczur M, Dudek M, Rosen MA, Kolenda Z. An analysis of integration of a power plant with a lignite superheated steam drying unit. *Journal of Cleaner Production*. 2020;243. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118635>
3. Azaizia Z, Kooli S, Hamdi I, Elkhail W, Guizani AA. Experimental study of a new mixed mode solar greenhouse drying system with and without thermal energy storage for pepper. *Renewable Energy*. 2020;145:1972–1984. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.055>
4. Мякинков АГ. Расчет кинетики сушки зерна кукурузы (изучение гигроскопических свойств и особенностей конвективной сушки зерна кукурузы). *Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал*. 2000(2):444.
Myakinkov AG. Calculation of corn grain drying kinetics (study of hygroscopic properties and features of convective drying of corn grain). *Food and Processing Industry. Abstract Journal*. 2000(2):444.
5. Мирзаева МА, Мухтасархон АК. Технология сушки абрикосовых сортов, пригодных для сушки. *UNIVERSUM: Технические Науки*. 2020;12(81):90–92.
Mirzaeva MA, Mukhtasarkhon AK. Drying technology of apricot varieties suitable for drying. *UNIVERSUM: Technical Sciences*. 2020;12(81):90–92

6. Petković M, Filipović V, Filipović I, Lukyanov A, Studennikova S. Modeling of carrot thin layer convective drying process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1029:012046. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012046>

7. Кенжеханова М.Б., Мамаева Л.А., Ветохин С.С., Тулекбаева А.К. Разработка технологии изготовления яблочных чипсов на основе результатов оценки технологических и потребительских свойств исходного яблочного сырья. *Вестник Алматинского технологического университета*. 2024;144(2):43–53. <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2024-2-43-53>

Kenzhekhanova M.B., Mamaeva L.A., Vetokhin S.S., Tulekbaeva A.K. Development of technology for manufacturing apple chips based on the results of assessment of technological and consumer properties of raw apples. *The Journal of Almaty Technological University*. 2024;144(2):43–53 (In Russ.) <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2024-2-43-53>

8. Зайченко Д.А., Петюшев Н.Н., Евтушевская Л.В., Уложина М.Ю., Гоман Д.И., Станкевич О.Н. Разработка двухстадийной технологии сушки ягод и фруктов. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2023;16(4):53–60. URL: <https://foodindustry.belal.by/jour/article/view/626> (дата обращения 26.06.2026)

Zaichenko DA, Petyushev NN, Evtushevskaya LV, Ulozhinova MY, Goman DI, Stankevich ON. Development of a Two-Stage Technology for Drying Berries and Fruits. *Food Industry: Science and Technology*. 2023;16(4):53–60. (In Russ.) URL: <https://foodindustry.belal.by/jour/article/view/626> (accessed 26.06.2026)

Об авторах:

Тимошенко Мирослав Константинович, студент Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-1234), miroslav.timoshenko@gmail.com

Нгуен Суан Тьем, PhD, заместитель заведующего кафедрой автоматики и вычислительной техники Вьетнамского технического университета им. Ле Куй Дона, (11900, Вьетнам, г. Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, д. 236, район Бактылием), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-1234), conference.dts@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

М.К. Тимошенко: поиск и анализ источников, проведение экспериментов, подготовка текста, формирование выводов.

Нгуен Суан Тьем: научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Miroslav K. Timoshenko, student Don State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-1234), miroslav.timoshenko@gmail.com

Nguyen Xuan Thiem, PhD, Deputy Head of Automation and Computer Technology Department Le Quy Don Technical University (236 Hoang Quoc Viet St., Bac Tu Liem District, Hanoi, 11900, Vietnam), conference.dts@gmail.com

Claimed contributorship:

MK Timoshenko: conceptualization, literature search and analysis, conducting experiments, drafting the manuscript, formulating conclusions.

Nguyen Xuan Tiem: scientific supervision, conceptualization, defining research aims and objectives, analyzing research results, revising the manuscript, refining conclusions.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 27.06.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 18.07.2026

Принята к публикации/Accepted 02.08.2026