Тип статьи: научная
УДК 621.3.036
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-6-17-26

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СУШКИ И ОЧИСТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С ЭФФЕКТОМ САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Александр Викторович Щегольков
Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия
energynano@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4317-0689

Автор ответственный за переписку: Александр Викторович Щегольков, energynano@yandex.ru
Corresponding author: Alexandr Shchegolkov, energynano@yandex.ru

Реферат. *В статье представлена автоматизированная система для переработки плодоовощной продукции, которая включает в себя такие технологические операции как очистка паром от кожуры (термовакуумным методом), резка, конвективная и вакуумная сушка плодоовощной продукции. Для эффективного функционирования установки использована система управления, которая обеспечивает полную автоматизацию всего комплекса технологических элементов. Установка обладает высоким уровнем энергоэффективности, так как использует в своем составе тепловые аккумуляторы (с эффектом термомагнитной конвекции) и нагреватели с саморегулированием температуры. Параметры режимов работы тепловых аккумуляторов согласуются с работой нагревателя с адаптивным энергопотреблением (с изменяемой мощностью и постоянной температурой) в зависимости от температуры нагрева растительного сырья. На первой стадии, когда необходим интенсивный тепловой поток для сушки – тепловые аккумуляторы обеспечивают без инерционность нагрева плодоовощной продукции. Функция нагревателя, связана с управляемым нагревом в зависимости от температуры растительного сырья, обеспечивающий тепловой поток коррелируемый с работой тепловых аккумуляторов. Использование комбинированного и адаптивного нагрева от тепловых аккумуляторов и электронагревателей позволяет осуществлять равномерное распределение температур (температурное поле), что обеспечивает эффективную обработку растительного сырья. Автоматизированное изменение мощности нагрева от электронагревателей и тепловых аккумуляторов обеспечивает возможность адаптации к любой по мощности электрической сети исходя из потребности в уровне перерабатываемой плодоовощной продукции, а использование тепловых аккумуляторов позволяет накапливать тепловую энергию от солнечных коллекторов.*

Ключевые слова: *тепловой аккумулятор, саморегулирование температуры, растительное сырье, автоматизированная система.*

AUTOMATED SYSTEM OF DRYING AND PURIFICATION OF VEGETABLE RAW MATERIALS USING ELECTRIC HEATERS WITH SELF-REGULATION OF TEMPERATURE AND THERMAL ACCUMULATORS

Alexander Shchegolkov
Tambov State Technical University, Tambov, Russia
energynano@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-4317-0689

Abstract. *The paper presents an automated system for processing fruit and vegetable products, which includes such technological operations as steam peeling (thermovacuum method), cutting, convective and vacuum drying of fruit and vegetable products. For efficient operation of the plant a control system is used, which provides full automation of the whole complex of technological elements. The plant has a high level of energy efficiency, as it uses thermal accumulators (with the effect of thermomagnetic*

convection) and heaters with temperature self-regulation. The parameters of the operation modes of thermal accumulators agree with the operation of the heater with adaptive energy consumption (with variable power and constant temperature) depending on the temperature of heating of plant raw materials. At the first stage, when intensive heat flow is required for drying - thermal accumulators provide inertia-free heating of horticultural products. The function of the heater is connected with controlled heating depending on the temperature of plant raw material, providing heat flow correlated with the operation of thermal accumulators. The use of combined and adaptive heating from thermal accumulators and electric heaters allows for uniform temperature distribution (temperature field), which ensures efficient processing of vegetable raw materials. Automated change of heating power from electric heaters and thermal accumulators provides the possibility of adaptation to any power electric network based on the need for the level of processed horticultural products, and the use of thermal accumulators allows to accumulate thermal energy from solar collectors.

Keywords: *heat accumulator, temperature self-regulation, plant raw materials, automated system.*

Для цитирования: Щегольков А.В. Автоматизированная система сушки и очистки растительного сырья с применением тепловых аккумуляторов и электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2023. Т. 66, № 6. С. 17-26. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-6-17-26.

For citation: Shchegolkov A. Automated system of drying and purification of vegetable raw materials using electric heaters with self-regulation of temperature and thermal accumulators. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 66(6): 17-26. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-6-17-26.

Благодарности: работа выполнена при поддержке управления образования и науки Тамбовской области в рамках Соглашения №2/МУ2022 о предоставлении гранта по проекту № МУ 2022-02/5 областного конкурса «Гранты для поддержки прикладных научных исследований молодых ученых 2022 года».

Acknowledgments: the work was supported by the Department of Education and Science of the Tambov Region within the framework of Agreement No. 2/MU2022 on grant award under the project No. MMU 2022-02/5 of the regional competition "Grants to support applied scientific research of young scientists in 2022".

Введение. Тепломассообменный процесс, такой как сушка является неотъемлемой частью переработки плодоовощной продукции в технологиях АПК. Тепловая энергия может быть использована как на стадии очистки паром плодоовощной продукции от кожуры, так и на стадии получения конечного продукта в процессе сушки. Процесс сушки позволяет обрабатывать растительное сырье, которое способствует долговременному и безопасному хранению плодоовощной продукции. Однако сушка является одним из наиболее энергозатратных процессов производства продуктов питания и при этом процесс сушки должен обеспечивать хорошее качество плодоовощной продукции, а именно высокое содержание биологически–активных веществ (витаминов и антиоксидантов). Уменьшение затрат энергии на процесс сушки за счет рационального энергопотребления, прежде всего включает рекуперацию тепла и оптимизацию параметров нагрева (времени, температуры и градиента температур), является актуальной задачей. Таким образом одним из главных вопросов процесса сушки является повышение энергоэффективности за счёт оптимизации энергетических модулей, в частности минимизации тепловых потерь и выбора оптимальных параметров термообработки, способствующих сохранению биологически-активных веществ [1].

Основным элементом тепловых аккумуляторов является теплоаккумулирующий материал, который может быть реализован на основе эффекта сохранения тепловой энергии фазового перехода [2]. Наиболее доступным и сравнительно эффективным материалом для накопления тепловой энергии является парафин. Однако низкая теплопроводность парафина снижает эффективность режимов заряд/разряд. Для повышения теплопроводности парафина может быть использован графен и при увеличении длины его чешуек возрастает теплопроводность теплоаккумулирующего композита [3-5]. Применение таких углеродных материалов как

углеродное волокно, также может обеспечить улучшение теплопроводности. Результаты термогравометрии (ТГ) показали, что композит парафин/углеродное волокно@углеродные нанотрубки (П/УВ@УНТ) подвергается фазовому переходу с деструкцией при температуре более 215,6 °С с потерей массы 51,9%. При температуре плавления композита П/УВ@УНТ 40,01°С с тепловыделением скрытой теплоты 81,94 Дж/г, а после фазового перехода тепловыделение снижается до 15,28 Дж/г, а теплопроводность композита парафин/УВ@УНТ увеличивается на 573% (1,551 Вт/м°С)) по сравнению с чистым парафином. Проведенное термоциклирование показывает, что композит П/УВ@УНТ имеет термическую стабильность в течении 300 циклов заряд/разряд [6]. В работе [7] показано применение теплоаккумулирующих материалов с фазовым переходом для технологий получения пищевых продуктов.

Совмещение в едином технологическом комплексе операций очистки от кожуры [8] и сушки [9] плодоовощной продукции позволит существенно снизить как тепловые потери, так и массовые потери сырья, а также увеличить производительность переработки плодоовощной продукции. Следует учитывать, что тепловые аккумуляторы являются пассивным источником тепловой энергии. Активная генерация тепловой энергии может осуществляться преобразованием электрической энергии нагревателя или группой электрических нагревателей соединенных последовательно или параллельно.

Повышение энергоэффективности технологического оборудования для процессов сушки и очистки паром овощей и плодов от кожуры может быть реализована с применением тепловых аккумуляторов и электронагревателей, обладающих эффектом саморегулирования температуры [10,11], которые комплексно интегрируются в общую систему автоматизации процесса переработки растительного сырья.

Снижение материальных потерь (растительного сырья и сохранение всех ценных биологических компонентов [12-14] является первоочередной задачей, которая должна быть решена при создании технологического оборудования для переработки растительного сырья [15].

Следует уделить внимание такому вопросу, как возможность работы технологической линии по переработке плодоовощной продукции в автоматизированном режиме, при котором управление процессом переработки реализуется с учетом максимизации энергоэффективности или минимизации тепловых потерь. Использование автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) открывает серьезные перспективы, связанные с созданием высокоэффективной системы переработки, при которой используются передовые технологий управления всеми элементами сушильной установки [16,17].

Цель исследований – повышение эффективности системы сушки и очистки паром плодоовощной продукции с комбинированным применением тепловых аккумуляторов и электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры.

Материалы и методы.

На рисунке 1 показана структурная схема многофункциональной универсальной сушильной установки, работа которой осуществляется в автоматическом режиме АСУТП, включающую в себя взаимосвязанные блоки, к которым относятся, имеющие прямую-обратную связь – блоки нагревателей, клапанов и вакуумных насосов; прямую связь с блоками очистки (термовакуумным методом), механической нарезки, конвективной и вакуумной сушки плодоовощной продукции.

АСУТП процессом очистки от кожуры (термовакуумным методом) и сушки имеет 3 основных блока (рисунок 2). Для связи блоков используются аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), а также интерфейс беспроводной передачи информации, которой формирует взаимодействие с управляющим модулем, реализованным на ПК с автоматизированным рабочим местом (АРМ) технолога.

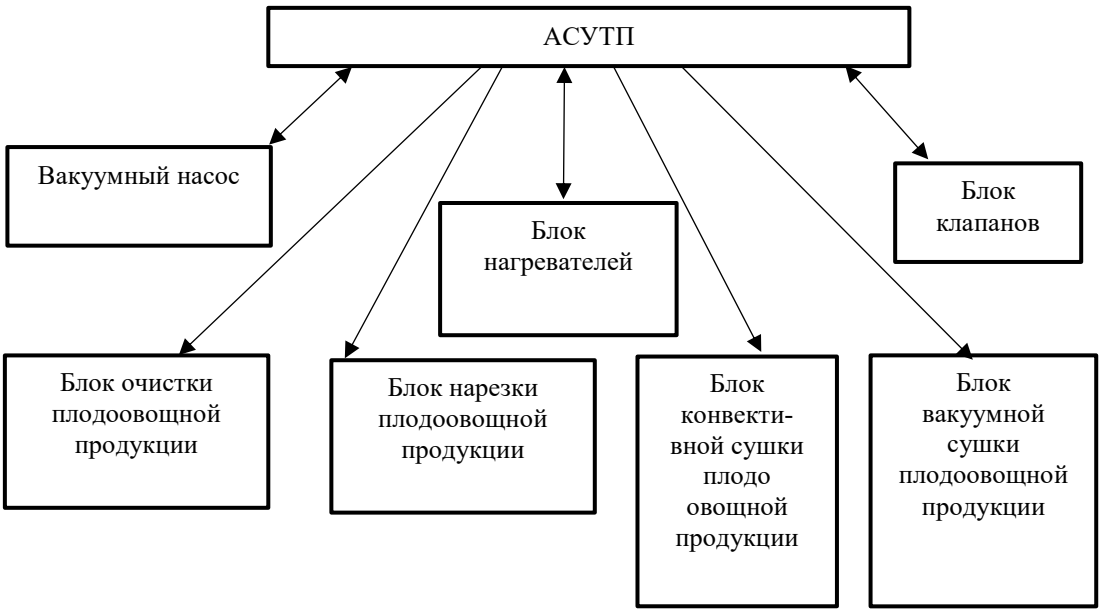


Рисунок 1 – Структурная схема многофункциональной универсальной сушильной установки

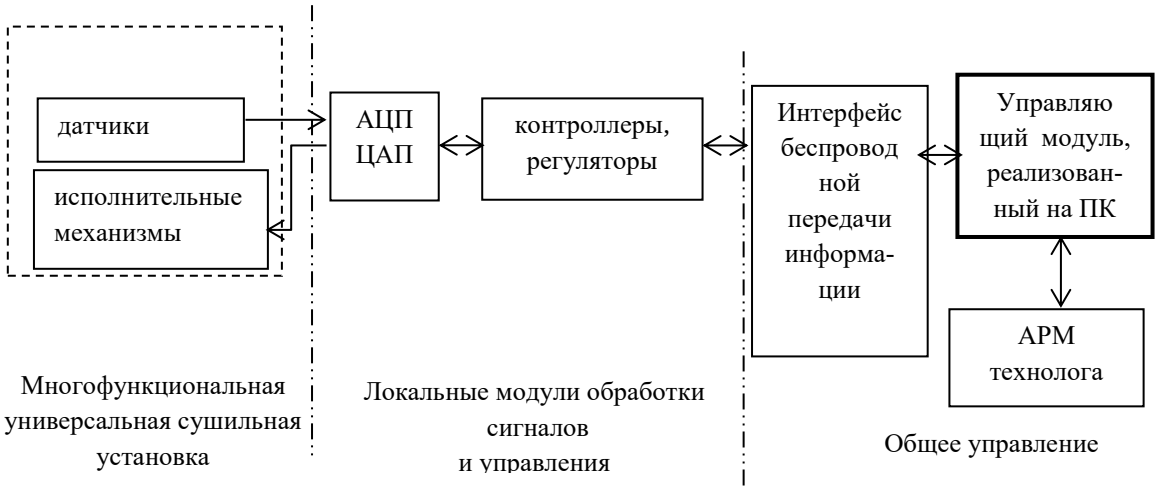


Рисунок 2 – АСУТП процессом очистки от кожуры и сушки

На рисунке 3 (а и б) показана многофункциональная универсальная сушильная установка, в которой происходит процесс переработки плодоовощной продукции с очисткой (термовакуумным методом), нарезкой, конвективной и вакуумной сушкой. На первом этапе плодоовощная продукция загружается в бункер для очистки от кожуры (1). При включении электрического нагревателя в сеть 220 В переменного напряжения происходит парообразование в бункере для очистки от кожуры (1). Воздействие пара на растительный материал сопровождается резким ростом температуры на поверхности, а последующее создание вакуума приводит к отслоению кожуры от плодоовощной продукции. Далее происходит процесс механической нарезки (2). После этого плодоовощная продукция поступает на конвективную сушку (3). Затем открывается вторая камера вакуумной сушки (5), где плодоовощная продукция полностью высушивается. Ключевой особенностью является применение вакуумного насоса (7) для стадий очистки, транспортировки и вакуумной сушки. Изменение режима работы вакуумного насоса происходит с помощью клапанов 8, 9 и 10. При конвективной сушке тепловые потоки создаются нагревателями (6) и

тепловыми аккумуляторами (5). В камере вакуумной сушки тепловые потоки формируются нагревателями (11) и тепловыми аккумуляторами (12).

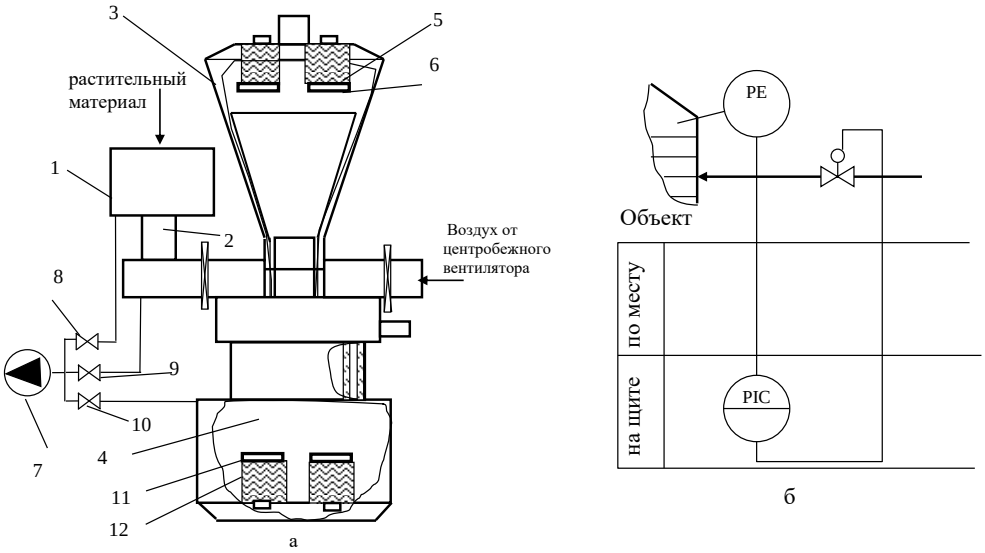


Рисунок 3 – Многофункциональная универсальная сушильная установка: а – устройство сушильной установки; б – функциональная схема автоматизации измерения и контроля давления

Использование единого вакуумного насоса (7) позволяет существенно снизить затраты на создание вакуума и повысить функциональность системы переработки растительного сырья. Изначально вакуум создается в камере 1, по завершению операции удаления кожуры включается вакуумный транспортер и переносит растительное сырье на стадию конвективной сушки (3), которая реализуется с закрученным потоком воздуха от центробежного вентилятора. После конвективной сушки, растительный материал перемещается на стадию вакуумной сушки 4. Открывается клапан (10) и создается разряжение в камере (4). Контроль и управление вакуумным насосом (7) организуется по схеме рис. 2 б – для каждого клапана (8,9 и 10), где PE – датчик давления (разряжения), а PIC – регулирование давления (разряжения) с помощью микропроцессорного регулятора.

Блок нагревательных элементов имеет параллельное соединение и подключается к системе автоматизированного управления. На рисунке 4 приведена принципиальная электрическая схема подключения нагревательных элементов с эффектом саморегулирования.

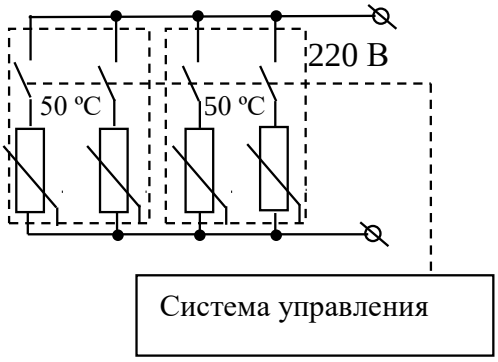
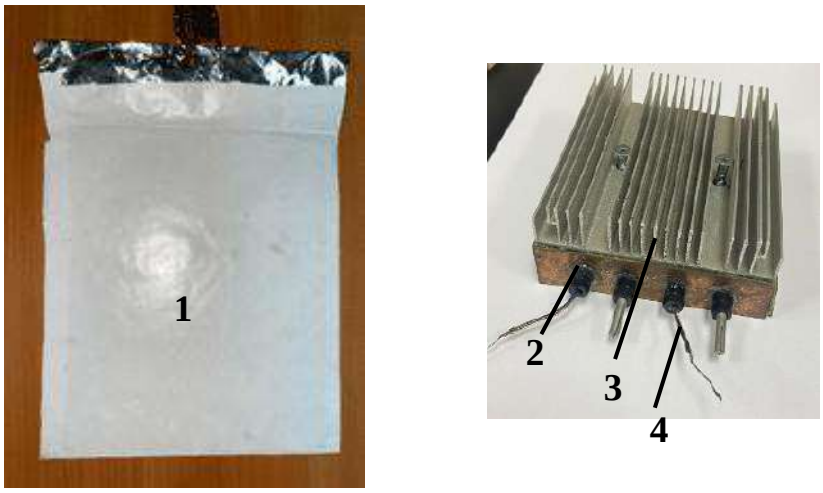


Рисунок 4 – Схема подключения нагревательных элементов в сушильной установке

На рисунке 5 (а и б) показан электрический нагреватель (1) с эффектом саморегулирования температуры и тепловой аккумулятор (2), в котором реализован эффект термомагнитной конвекции (с теплоаккумулирующим материалом на основе гранулированного парафина с УНТ (1) в жидкой фазе), используемый в режиме конвективной и вакуумной сушки (многофункциональной универсальной сушильной установки). Теплообменные элементы (3) интенсифицируют теплообмен и ускоряют режимы накопления и тепловыделения тепловых аккумуляторов (для контроля температурного режима используется термопара ХК (хромель капель) (3)).



(а) (б)

Рисунок 5 – Внешний вид электрического нагревателя (а) и теплового аккумулятора (б):
1 – электрический нагреватель; 2 – тепловой аккумулятор; 3 – теплообменник; 4 – термопара ХК

На рисунке 6 приведена структурная схема АСУ сушильной установки.

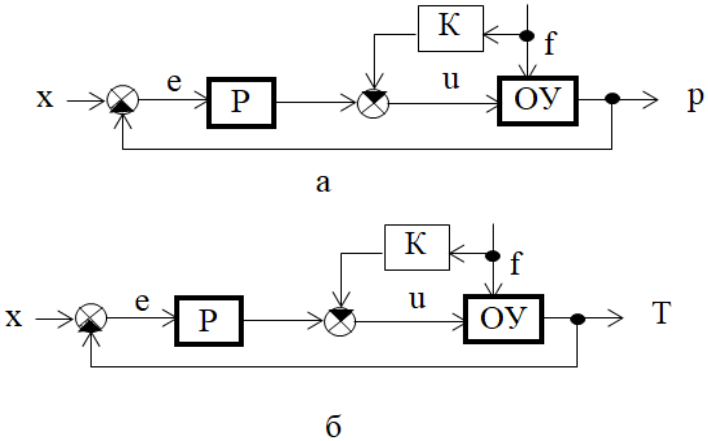


Рисунок 6 – Структурная схема автоматического регулирования (комбинированная) процесса сушки плодоовощной продукции: а – контур регулирования разряжения (модуль очистки от кожуры, пневмотранспортер, модуль вакуумной сушки); б – контур регулирования температуры. Где : К - усилитель с коэффициентом усиления К; возмущающее воздействие f; Р – регулятор; х – входное воздействие (в случае регулирования разряжения – длительность работы вакуумного насоса, при температуре напряжение питания нагревателя); е – сигнал рассогласования (ошибка управления); u – управляющее воздействие; ОУ – объект управления (сушильная установка); р, Т – выходные сигналы

В представленной АСУ многофункциональной универсальной сушильной установки, разомкнутая часть системы, передающая воздействия по возмущению, несет основную нагрузку по управлению объектом и связана с сигналами нагревателей, которые адаптируют своё энергопотребление (изменение величины мощности) при изменении давления и температуры. Применение комбинированного измерения давления и температуры в едином блоке нагревателей, обеспечивает необходимую инерционность процесса нагрева. Другой составляющей АСУ является контроль и коррекция выходных сигналов, работающей по отклонению регулируемой величины, которая позволяет исправить неточности в выполнении заданного регулирования, допускаемые системой и действующие по возмущению, минимизируя тем самым тепловые потери. Управляющим сигналом, который непосредственно осуществляет процесс термомагнитной конвекции является входное напряжение $U_{пит}$. Следует учитывать, что изменение значения величины электромагнитного поля влияет на тепловые потоки в системе накопления тепловой энергии, которым является тепловой аккумулятор. При этом необходимо отметить, что использование тепловых аккумуляторов позволяет накапливать тепловую энергию от солнечных коллекторов, которые в свою очередь являются тепловым буфером способным корректировать тепловой баланс в сушильной установке [18].

Результаты и их обсуждение. Многофункциональная универсальная сушильная установка имеет комплексные энергетические модули (с установленными нагревателями и тепловыми аккумуляторами). Тепловой баланс многофункциональной универсальной сушильной установки в рабочем режиме имеет вид:

$$Q_{р.м.} =(Q_{1э}+Q_{2э})+ (Q_{1а}+Q_{2а})– Q_{т}, \quad (1)$$

где $Q_{р.м}$ – теплота необходимая для реализации процесса сушки, Дж; $Q_{1э}$, $Q_{2э}$ – теплота полученная от электрических нагревателей, Дж; $Q_{1а}$, $Q_{2а}$ – запасенная тепловая энергия в тепловых аккумуляторах, Дж; $Q_{пот}$ – тепловые потери, Дж; $Q_{т}$ – теплота, которую необходимо передать растительному сырью в процессе сушки, Дж.

Мощностной режим для энергетического модуля $P_{\sum}$ при совместной работе нагревателей и теплового аккумулятора имеет вид представленный на рисунке 7.

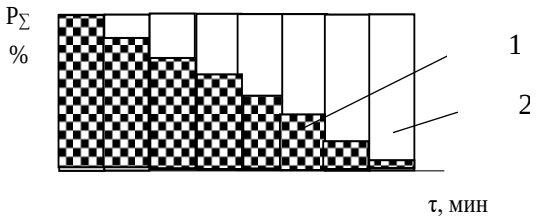


Рисунок 7 – Диаграмма изменения мощности в процессе сушки при совместной работе теплового аккумулятора (1) нагревателя (2)

Следует отметить, что – эффект саморегулирования температуры в нагревателях позволяет синхронизироваться с работой теплового аккумулятора, что в свою очередь и обеспечивает стабилизированное тепловыделение без процесса предварительного разогрева нагревателей. Таким образом, по мере разряда тепловых аккумуляторов, нагреватели с эффектом саморегулирования температуры увеличивают свою мощность при неизменном тепловыделении, которое позволяет сохранять постоянство температуры при сушке с изменяемой тепловой мощностью системы тепловых аккумуляторов и нагревателей.

Выводы. Разработана многофункциональная универсальная сушильная установка, которая позволяет обеспечивать автоматизированный эффективный процесс сушки совместно с обработкой плодоовощной продукции. Показана возможность использования АСУТП сушки в системе, осуществляемой управляемы нагрев от электрического нагревателя с эффектом саморегулирования температуры и накопителем тепловой энергии фазового перехода. Для эффективного функционирования установки, использована система управления, которая управляет всем комплексом технологических элементов и обеспечивает полную автоматизацию.

Установка обладает высоким уровнем энергоэффективности, так как используются тепловые аккумуляторы фазового перехода и нагреватели с эффектом саморегулирования температуру. Режимы работы тепловых аккумуляторов (с эффектом термомагнитной конвекции) согласуются с режимами работы нагревателей с саморегулированием температуры. Тепловые аккумуляторы позволяют накапливать тепловую энергию во всем объеме устройства, что существенно снижает расход энергии на процесс сушки и очистки плодоовощной продукции. Также эффект саморегулирования температуры в нагревателях позволяет согласовать режим работы с тепловыми аккумуляторами и обеспечить стабильный темп тепловыделений без режима предварительного разогрева нагревателей. Концепция совместного применения тепловых аккумуляторов и нагревателей с эффектом саморегулирования температуры открывают новые технологические возможности создания многофункциональных систем переработки растительного сырья с высоким уровнем автоматизации для предприятий АПК.

Список источников

1. Chojnacka K., Mikula K., Izydorczyk G., Skrzypczak D., Witek-Krowiak A., Moustakas K., Ludwig W., Kułażyński M. Improvements in drying technologies - Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 320. P. 128706. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128706

2. Fan L., Khodadadi J.M. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermalenergy storage: A review // Renewable and sustainable energy reviews. 2011. V. 15. P. 24–46.

3. Xu X., L. Pereira F.C., Wang Y., Wu J., Zhang K., Zhao X., Bae S., Bui C.T., Xie R., Thong J.T.L., HongB.H., Loh K.P., Donadio D., Li B., Özyilmaz B. Length-dependent thermal conductivity in suspendedsingle-layer grapheme // Nature communication. 2014. V. 5. № 3689, P. 1-6.

4. Renteria J.D., Nika D.L., Balandin A.A. Graphene thermal properties: applications in thermalmanagement and energy storage // Applied sciences. 2014. V. 4. P. 525-547.

5. Liu X., Rao Z. Experimental study on the thermal performance of grapheneandexfoliatedgraphitesheet for thermal energy storage phase changematerial // Thermochimicaacta. 2017. V. 647. P. 15–21.

6. Cheng F., Xu Y., Zhang J., Wang L., Zhang H., Wan Q., Xu S., Li W., Wang L. A Novel Flexible Carbon Fiber with Carbon Nanotubes Growing In-site to Impregnate Paraffin for Thermal Energy Application // Available at Research Square. 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2115128/v1

7. Devahastin S., Pitaksuriyarat S. Use of Latent Heat Storage to Conserve Energy during Drying and Its Effect on Drying Kinetics of a Food Product // Applied Thermal Engineering. 2006. V. 26. P. 1705–1713. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.11.007

8. Патент РФ № 2039477 C1. МПК A23N 7/00(2006.01). Устройство для очистки паром овощей и плодов от кожуры / А.А. Кирсанов; патентообладатель Липецкий политехнический институт. − № 93016368/13 ; заявл. 31.03.1993 ; опубл. 20.07.1995.

9. Патент РФ № 2771723 C1. МПК F26B 17/10, F26B 5/04, F26B 7/00. Энергоэффективная система для глубокой переработки растительного сырья с тепловыми аккумуляторами и электронагревателями / Ю.В. Родионов, А.В. Щегольков, А.В. Щегольков [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». − № 2021127502 ; заявл. 20.09.2021 ; опубл. 11.05.2022.

10. Shchegolkov A.V., Nachtane M., Stanishevskiy Y.M., Dodina E.P., Rejepov D.T., Vetcher A.A. The Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Heat-Release Properties of Elastic Nanocomposites // J. Compos. Sci. 2022. V. 6. P. 333. DOI: 10.3390/jcs6110333

11. Shchegolkov A.V., Jang S.-H., Shchegolkov A.V., Rodionov Y.V., Glivenkova O.A. Multistage Mechanical Activation of Multilayer Carbon Nanotubes in Creation of Electric Heaters with Self-Regulating Temperature // Materials. 2021. V. 14(16). P. 4654. DOI: 10.3390/ma14164654

12. Liu J., Liu Y., Wang X. Effects of bioactive compounds and pharmacological activities in medicinal fruits and vegetables by thermal processing // Journal of Future Foods. 2023. V. 3(3). P. 252-262. DOI: 10.1016/j.jfutfo.2023.02.009

13. Gomes B.A.F., Alexandre A.C.S., de Andrade G.A.V., Zanzini A.P., de Barros H.E.A., e Silva L.M.d.S.F., Costa P.A., Boas E.V.d.B.V. Recent advances in processing and preservation of minimally processed fruits and vegetables: A review – Part 2: Physical methods and global market outlook // Food Chemistry Advances. 2023. V. 2. P. 100304. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100304

14. Hu Q., Zhang J., He L., Xing R., Yu N., Chen Y. New insight into the evolution of volatile profiles in four vegetable oils with different saturations during thermal processing by integrated volatolomics and lipidomics analysis // Food Chemistry. 2023. V. 403. P. 134342. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134342

15. Патент РФ № 2759808 C1. МПК A23N 7/00. Установка на основе саморегулируемых электронагревателей с наномодифицированными эластомерами и тепловыми аккумуляторами для очистки растительного сырья / Ю.В. Родионов, А.В. Щегольков, Д.В. Никитин, И.В. Иванова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». − № 2021111299 ; заявл. 21.04.2021 ; опубл. 18.11.2021.

16. Пьявченко Т.А. Автоматизированные информационно – с применением SCADA – системы Trace Mode: учеб. Пособие. – М.: Лань, 2015. – 336 с.

17. Филиппов Ф.В. Моделирование нейронных сетей глубокого обучения: учеб. пособие. – Санкт–Петербург: СПбГУТим.М.А. Бонч–Бруевича, 2019. – 79 с.

18. Щегольков, А. В. Применение наномодифицированных теплоаккумулирующих материалов для солнечных энергетических установок / А. В. Щегольков, А. В. Щегольков, И. О. Плотницкий // Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – № 4(40). – С. 46-52.

References

1. Chojnacka K., Mikula K., Izydorczyk G., Skrzypczak D., Witek-Krowiak A., Moustakas K., Ludwig W., Kułażyński M. Improvements in drying technologies - Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 320. P. 128706. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128706

2. Fan L., Khodadadi J.M. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermalenergy storage: A review // Renewable and sustainable energy reviews. 2011. V. 15. P. 24–46.

3. Xu X., L. Pereira F.C., Wang Y., Wu J., Zhang K., Zhao X., Bae S., Bui C.T., Xie R., Thong J.T.L., HongB.H., Loh K.P., Donadio D., Li B., Özyilmaz B. Length-dependent thermal conductivity in suspendedsingle-layer grapheme // Nature communication. 2014. V. 5. № 3689, P. 1-6.

4. Renteria J.D., Nika D.L., Balandin A.A. Graphene thermal properties: applications in thermalmanagement and energy storage // Applied sciences. 2014. V. 4. P. 525-547.

5. Liu X., Rao Z. Experimental study on the thermal performance of grapheneandexfoliatedgraphitesheet for thermal energy storage phase changematerial // Thermochimicaacta. 2017. V. 647. P. 15–21.

6. Cheng F., Xu Y., Zhang J., Wang L., Zhang H., Wan Q., Xu S., Li W., Wang L. A Novel Flexible Carbon Fiber with Carbon Nanotubes Growing In-site to Impregnate Paraffin for Thermal Energy Application // Available at Research Square. 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2115128/v1

7. Devahastin S., Pitaksuriyarat S. Use of Latent Heat Storage to Conserve Energy during Drying and Its Effect on Drying Kinetics of a Food Product // Applied Thermal Engineering. 2006. V. 26. P. 1705–1713. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.11.007

8. RF patent N 2039477 C1, IPC A23N 7/00(2006.01). Device for steam peeling of vegetables and fruits from peels / A.A. Kirsanov; patentee Lipetsk Polytechnic Institute. − № 93016368/13; dec. 31.03.1993; publ. 20.07.1995.

9. RF patent N 2771723 C1, IPC F26B 17/10, F26B 5/04, F26B 7/00. Energy efficient system for deep processing of vegetable raw materials with thermal accumulators and electric heaters / Y.V. Rodionov, A.V. Shchegolkov, A.V. Shchegolkov [et al.] ; Applicant Tambov State Technical University. − № 2021127502; dec. 20.09.2021; publ. 11.05.2022.

10. Shchegolkov A.V., Nachtane M., Stanishevskiy Y.M., Dodina E.P., Rejepov D.T., Vetcher A.A. The Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes on the Heat-Release Properties of Elastic Nanocomposites // J. Compos. Sci. 2022. V. 6. P. 333. DOI: 10.3390/jcs6110333

11. Shchegolkov A.V., Jang S.-H., Shchegolkov A.V., Rodionov Y.V., Glivenkova O.A. Multistage Mechanical Activation of Multilayer Carbon Nanotubes in Creation of Electric Heaters with Self-Regulating Temperature // Materials. 2021. V. 14(16). P. 4654. DOI: 10.3390/ma14164654

12. Liu J., Liu Y., Wang X. Effects of bioactive compounds and pharmacological activities in medicinal fruits and vegetables by thermal processing // Journal of Future Foods. 2023. V. 3(3). P. 252-262. DOI: 10.1016/j.jfutfo.2023.02.009

13. Gomes B.A.F., Alexandre A.C.S., de Andrade G.A.V., Zanzini A.P., de Barros H.E.A., e Silva L.M.d.S.F., Costa P.A., Boas E.V.d.B.V. Recent advances in processing and preservation of minimally processed fruits and vegetables: A review – Part 2: Physical methods and global market outlook // Food Chemistry Advances. 2023. V. 2. P. 100304. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100304

14. Hu Q., Zhang J., He L., Xing R., Yu N., Chen Y. New insight into the evolution of volatile profiles in four vegetable oils with different saturations during thermal processing by integrated volatolomics and lipidomics analysis // Food Chemistry. 2023. V. 403. P. 134342. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134342

15. RF patent N 2759808 C1, IPC A23N 7/00. Installation on the basis of self-regulating electric heaters with nanomodified elastomers and thermal accumulators for purification of plant raw materials / Y.V. Rodionov, A.V. Shchegolkov, D.V. Nikitin, I.V. Ivanova ; Applicant Tambov State Technical University. − № 2021111299; dec. 21.04.2021; publ. 18.11.2021.

16. Pyavchenko T.A. Automated informationally - using SCADA - Trace Mode system: textbook. – M.: Lan, 2015. – 336 p.

17. Filippov F.V. Modeling of deep learning neural networks: textbook. – St. Petersburg: SPbSUTim M.A. Bonch-Bruevich., 2019. – 79 p.

18. Shchegolkov, A. V. Application of nanomodified heat-accumulating materials for solar energy installations / A. V. Shchegolkov, A. V. Shchegolkov, I. O. Plotnitsky // Bulletin of Agrarian Science of Don. - 2017. - № 4(40). - C. 46-52.

Информация об авторах

А.В. Щегольков – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. Shchegolkov - PhD, Associate Professor.

Поступила в редакцию (Received): 12.11.2023 Принята к публикации (Accepted): 20.12.2023