

УДК 662.997:621.47:62-52
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5011
Шифр специальности ВАК: 2.4.5
Научная статья

Влияние автоматического регулирования воздушного потока на производительность солнечной сушилки косвенного действия

Л.А. Алкахдери¹, А.В. Юрченко^{1✉}, Д.А.-К. Мохаммед², Н.В. Ершов¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Технологический университет Ирака, Ирак, г. Багдад

✉ reaper@tpu.ru

Аннотация. Из-за сильной летней жары и обильного сезона сбора урожая Ирак зависит от сушки на солнце для сохранения урожая. Однако интенсивный солнечный свет может привести к поверхностному высыханию, скрывая внутреннюю влагу. Неэффективное нагревание нарушает массоперенос, затрудняя сушку. Постоянная циркуляция воздуха и температура имеют жизненно важное значение. Автоматизированные системы управления могут управлять этими факторами, оптимизируя сушку в различных условиях, снижая потребление энергии и получая высококачественный продукт. **Цель.** Изучить повышение производительности не прямой солнечной сушилки с использованием материала с изменяемой фазой в качестве теплового накопителя при переменной скорости потока с помощью автоматического управления. **Методы.** Непрямая солнечная сушилка в сочетании с материалом с изменяемой фазой под автоматической системой управления для сушки сельскохозяйственной продукции. **Результаты.** Было проведено сравнительное исследование производительности не прямой солнечной сушилки, которая использует солнечный воздушнонагреватель с материалом с изменяемой фазой в качестве накопителя тепловой энергии. Солнечная сушилка была испытана для сушки сельскохозяйственной продукции в Багдаде, Ирак, при двух случаях воздушного потока: постоянный расход и автоматическое управление расходом. Были проанализированы такие параметры, как солнечное излучение, разница температур воздуха на нагревателе, тепловая эффективность нагревателя, эффективность сушки и время замораживания материала с изменяемой фазой. Материал с изменяемой фазой накапливает тепловую энергию в течение дня, высвобождая ее после наступления темноты для работы сушилки в течение 5–6 часов в случае постоянного потока и 8–9 часов в случае автоматизированного воздушного потока. Результаты показали 15%-е увеличение средней эффективности сушки и 31%-е увеличение средней эффективности коллектора при автоматически регулируемом воздушном потоке по сравнению с постоянным воздушным потоком.

Ключевые слова: косвенная солнечная сушилка, солнечный воздушный нагреватель, фазопереходный материал, автоматическое управление воздушным потоком, двигатель вентилятора постоянного тока

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-00389, <https://rscf.project/22-19-00389>

Для цитирования: Влияние автоматического регулирования воздушного потока на производительность солнечной сушилки косвенного действия / Л.А. Алкахдери, А.В. Юрченко, Д.А.-К. Мохаммед, Н.В. Ершов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 223–243. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5011

UDC 662.997:621.47:62-52
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5011
Scientific paper

Effect of automated airflow regulation on indirect solar dryer performance: comparative study

L.A. Alkahdery¹, A.V. Yurchenko^{1✉}, J.A.-K. Mohammed², N.V. Ershov¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² University of Technology, Baghdad, Iraq

✉reaper@tpu.ru

Abstract. Due to its intense summer heat and abundant harvest season, Iraq depends on sun drying to preserve crops. However, intense sunlight can lead to superficial drying, masking internal moisture. Inefficient heating disrupts mass transfer, hindering drying. Consistent air circulation and temperature are vital. Automated control systems can manage these factors, optimizing drying in diverse conditions, reducing energy consumption, and obtaining a high-quality product. **Aim.** To study the performance improvement of the indirect solar dryer using phase change material as a thermal storage under variable flow rate via automatic control. **Methods.** Indirect solar dryer combined with phase change material under an automatic control system for drying agricultural products. **Results.** The authors have conducted comparative study on the performance of an indirect solar dryer that uses a solar air heater with a phase change material as a thermal energy store. The solar dryer was tested for drying agricultural products in Baghdad, Iraq, under two cases of airflow: constant flow rate and automated flow rate control. The authors analyzed such parameters as solar radiation, difference of air temperature across the heater, heater thermal efficiency, drying efficiency, and phase change material freezing time. The phase change material stores thermal energy during the day, releasing it after dusk to run the dryer for 5–6 hours in the case of constant flow and 8–9 hours in the case of automated airflow. The results showed a 15% increase in average drying efficiency and 31% in average collector efficiency under automatically controlled airflow compared to constant airflow.

Keywords: indirect solar dryer, solar air heater, PCM, automatic airflow control, DC fan motor

Acknowledgment: The study was funded by the Russian Science Foundation grant, <https://rscf.project/22-19-00389>

For citation: Alkahdery L.A., Yurchenko A.V., Mohammed J.A.-K., Ershov N.V. Effect of automated airflow regulation on indirect solar dryer performance: comparative study. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 233–243. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5011

Введение

Ирак расположен в регионе, характеризующемся экстремально высокими летними температурами и одним из самых продолжительных сезонов сбора урожая в мире, поэтому одним из способов сохранения сельскохозяйственной продукции является сушка на солнце. Однако проблемы с процессом сушки возникают из-за сильного солнечного излучения и высоких температур в течение дня. Создание консервирующих косвенных солнечных сушилок (КСС) является результатом разработок в области использования солнечной энергии, таких как сушка урожая. Используя материалы для накопления тепловой энергии (НТЭ), КСС преодолевают нерегулярные поставки солнечной энергии и повышают эффективность, аккумулируя как чувствительное, так и скрытое тепло. Сухая кожистая пленка может образоваться на поверхности некоторых солнечных сушилок из-за перегрева, что останавливает перенос внутренней влаги. Это может создавать иллюзию полного высушивания.

Многие исследователи рассмотрели возможные решения этой проблемы. А. Абдулмунем и др. [1] использовали продольные ребра, встроенные в парафиновый воск, в качестве материалов для хранения тепла в климате Багдада для снижения потерь энергии и эксергии в солнечном воздушном коллекторе и достигли значительного уровня уменьшения теплопотерь по сравнению с коллектором без парафинового воска. С. Салих и др. [2] проанализировали работу солнечных воздушных нагревателей (СВН) с парафином и без него, показав влияние скорости потока на тепловую производительность. А. Абдулмунем и др. [3] показали с помощью экспериментов и численного анализа, что увеличение угла наклона в сторону вертикального угла может улучшить работу фазопереходного материала (ФПМ) как пассивного охлаждающего материала. А. Кабиль и др. [4] исследовали ребристую пластину СВН с парафиновым воском, продлевая работу воздушного нагревателя на четыре часа после

наступления темноты. Повышение температуры выходящего воздуха на 8,6 °C по сравнению с окружающей средой привело к увеличению дневной эффективности на 10,8–13,6 %. Сушилка с датчиком температуры и таймером была автоматизирована М. Сантосо и др. [5], что позволило достичь влажности менее 5 % за один–три часа. Для улучшения производительности сушки Т. Патипат и др. [6] создали автоматизированный вспомогательный нагревательный блок для солнечных сушильных шкафов. А. Хадрауи и др. [7] исследовали, как ФПМ в КСС может увеличить доступность в вечернее время. Поскольку температура в камере была на 16 °C выше, чем температура окружающего воздуха, и относительная влажность была на 17–34,5 % ниже, ФПМ обеспечивал идеальные условия для сушки. Ф. Абдулла и др. [8] исследовали КСС с ФПМ. Изменения массовых скоростей потока влияли на энергетическую и тепловую эффективность. Температура сушильного воздуха увеличивалась на 9–12 °C после заката, что ускоряло процесс сушки, повышало дневную энергетическую эффективность до 13,84 % и дневную тепловую эффективность до 35,8 %.

В течение продолжительного временного исследователи изучали разработки сушилок с использованием материалов накопления энергии (МНЭ) (energy storage materials – ESM), включая накопление скрытого тепла (НСТ) и накопление чувствительного тепла (НЧТ) (sensible heat storage – SHS). Они оценили энергетическую целостность сушильного устройства с использованием ESM, который включает и SHS, и LHS. В качестве ФПМ использовался парафин RT-42. Для конфигураций без и с ESM наблюдаемые энергетические эффективности составили 9,8 и 26,1 % соответственно [9]. Использование ФПМ в сушильном устройстве было предложено как способ снижения общего потребления энергии в процессе удаления влаги. Это позволяет накапливать избыточную солнечную энергию, собранную в течение дня [10]. Для лучшего понимания сушки винограда и определения критических факторов сушки, связанных с изменениями скорости воздуха, были проведены эксперименты. При массовом расходе 0,05 кг/с эффективность коллектора экспериментальной установки варьировалась от 29,6 до 88,5 % [11]. Температура имеет значительное влияние на процесс солнечной сушки, поэтому выбор правильного массового расхода воздуха имеет решающее значение. При использовании двух различных последовательных стационарных массовых расходов воздуха (0,06 кг/с) для сушки на солнце наблюдалось увеличение общей эффективности. Удивительно, но непрерывный поток оказался более эффективным, чем последовательный поток, особенно для сухих объектов [12].

Аналогичным образом при оценке конечного продукта в устройстве КСС с переменным массовым расходом было установлено, что увеличение скорости сушки коррелирует с более высоким массовым расходом 0,063 кг/с [13]. Важные различия были обнаружены при обследовании солнечного устройства в сочетании с парафином в качестве ФПМ. В сравнении с сушкой без ФПМ, температура горячего воздуха внутри сушилки повышалась на 3,5–6,5 °C после 14:00 при наличии ФПМ. Температура рабочего тела в сушильной камере была регулярно на 6 °C выше температуры окружающего воздуха, согласно результатам [14]. Благодаря своей широкой доступности, широкому диапазону плавления, высокой температуре плавления и особой способности замерзать без переохлаждения парафин является популярным выбором для МНЭ [15, 16]. Однако низкая теплопроводность парафина является значительным недостатком. Увеличивая площадь поверхности, доступную для теплообмена с используемой жидкостью, можно добавить материал с высокой теплопроводностью к ФПМ, чтобы эффективно преодолеть это ограничение. Решая проблемы теплопроводности парафинового воска, этот метод улучшает общую тепловую эффективность блока МНЭ [17].

С. Эбади и др. [18] экспериментально исследовали влияние включения медной проволочной сетки (пористой среды) в систему C-LHTES, заполненную n-октадеканом в качестве ФПМ. Были сравнены распределения температуры, числа Нуссельта, локальный и общий теплообмен, а также скорость накопленной энергии между чистым ФПМ и композитными ФПМ, которые подвергались воздействию трех различных изотермических температур, $T_h=38, 48$ и 58 °C. Использование медной проволочной сетки с пористостью 75 и 87 % привело к максимальному сокращению времени зарядки на 24 и 17 % соответственно. А. Рейес и др. [19] обнаружили, что добавление алюминиевых полос в солнечный коллектор с концентрацией 3 и 5 % по массе увеличило теплопроводность парафинового воска, которая варьировалась от 205 до 237 Вт/мК. Использование медной катушки в солнечном коллекторе с радиусом 40 мм и толщиной 5 мм С. Девахастини и др. [20], показало высокую теплопроводность (385–401 Вт/мК), что улучшило эффективную тепловую емкость ФПМ. Ж. Вакес и др. [21] исследовали использование алюминиевых полос в другой системе ESM с концентрацией 5 % по массе, доказывая достижение более быстрой температуры плавления ФПМ.

В [22] было изучено влияние массового расхода воздуха и интенсивности солнечного излучения на тепловую производительность солнечного воздушного коллектора (SP-SAC), улучшенного за счет

блокировки ФПМ, с использованием как экспериментальных, так и численных методов. С использованием математической модели на основе схемы конечного объема может быть применен алгоритм SIMPLE для решения задачи о трехмерном, стационарном, турбулентном потоке с вынужденной конвекцией в FORTRAN 90. В исследовании рассматривались три различных сценария: плоская пластина без препятствий, пластина с препятствиями и пластина с препятствиями и ФПМ. Максимальная разница температур: 30 °C при 950 Вт/м² и 0,0153 кг/с (без препятствий, без ФПМ). Изменения накопления и температуры: в течение двух часов использовались 10,12–4,1, 7,8–2,9 и 5–1,5 °C для различных ситуаций. В [23] исследовалась КСС в трех различных условиях: с ФПМ, включающим парафиновый воск, без ФПМ и с ФПМ, включающим алюминиевую катушку. Осенью и летом сушили *Coccinia grandis*. Эффективность составила 21,056 % при снижении влажности продукта массой 2,5 кг с 92,5 до 10 % за 10,25 часа летом (сценарий 6), используя КСС с ФПМ и алюминиевой катушкой.

Настоящая работа направлена на улучшение производительности КСС и тепловой эффективности СВН путем добавления автоматизированной системы для регулирования воздушного потока. Сушилка аккумулирует тепловую энергию с помощью СВН с ФПМ. В статье представлен сравнительный анализ производительности при двух условиях воздушного потока: постоянном потоке и автоматическом управлении потоком.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка сушилки, показанная на рис. 1, включает непрозрачную сушиль-

ную камеру с СВН с принудительной конвекцией, НТЭ (алюминиевый ящик с парафиновым воском, окрашенный в черный цвет для поглощения солнечной энергии) и внешнее охлаждение (автоматический вентилятор постоянного тока, вентиляция с помощью турбины). НТЭ накапливает тепло в течение дня для ночной сушки посредством преобразования солнечной энергии. Нагретый в солнечном воздушном нагревателе воздух проходит через каналы в сушильную камеру над лотками с урожаем. Влажный воздух выходит через вентиляционные отверстия/дымоход. Камера изготовлена из оцинкованного железа размером 1,50×0,87×0,87 м. Продукты размещаются на лотках, доступ к которым осуществляется через изолированную дверь. Для уменьшения конвективных потерь и повышения долговечности сушильной камеры (в пределах экономически обоснованных границ) два слоя стали (толщиной 2 мм) расположены между слоем изоляционной полиуретановой пены (толщиной 5 см).

Система сушки использует автоматическое управление скоростью мотора вентилятора постоянного тока с помощью методики широтно-импульсная модуляция (ШИМ) для обеспечения необходимой энергии для удовлетворения различных потребностей в сушке. На рис. 2 изображена электрическая схема для автоматического контроля температуры и влажности с адаптацией нагрева и потока воздуха к погодным и продуктовым условиям. Датчик DHT22 связан с Arduino Uno для корректировки данных о температуре и влажности путем управления скоростью вентилятора, приводимого в движение модулем L293D. Результаты отображаются на ЖК-дисплее.

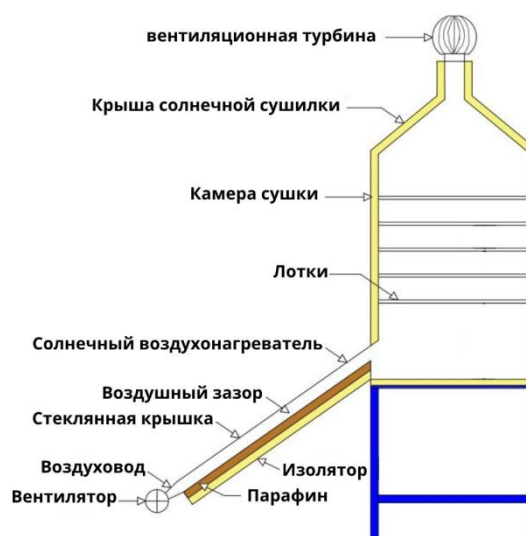


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки и схема солнечной сушилки
 Fig. 1. Photograph of the experimental setup and scheme of the solar dryer

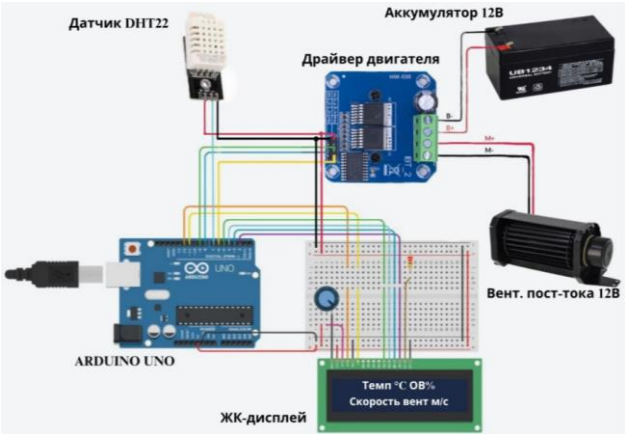


Рис. 2. Схема управления скоростью вентилятора постоянного тока на основе температуры и влажности
Fig. 2. DC fan speed control scheme based on temperature and humidity

Процедура эксперимента

В сентябре 2023 г. в Багдаде, Ирак (44.4N, 33.3E), были проведены испытания сушки для оценки эффективности автоматизированной солнечной сушильной системы в ясную солнечную погоду. В первом случае в сушилке использовалась СВН с ФПМ для накопления тепловой энергии при постоянном расходе воздуха (ПРВ). Во втором случае использовалось автоматическое управление расходом воздуха (АУРВ) в сочетании с СВН и ФПМ. В обеих ситуациях солнечное излучение преобразуется в тепловую энергию для нагрева воздуха. Испытания проводились для двух типов сушилок в сравнимых условиях 12 и 16 сентября того же месяца с 8:00 утра до 3:00 следующего дня. Для проведения исследований процессов заряда и разряда был применён СВН с использованием ФПМ. Датчик DHT22 внутри сушильной камеры был внедрен для контроля температуры воздуха и солнечного излучения, автоматически управляя скоростью вентилятора. Задействуя вентилятор для циркуляции горячего воздуха при поддержании диапазона температур с регулируемым расходом воздуха для сушки 3,6 кг

ломтиков банана в каждом эксперименте, автоматическая система устанавливает температуру в предложенной сушилке для сушки 5 мм ломтиков банана в невидимой камере.

Тепловыводящий патрубок воздушонагревательного агрегата соединен с базовым модулем сушильной камеры. Так как для этого не требовалось специального канализирования, потери тепла были уменьшены, и изоляция каналов не потребовалась, что сэкономило средства. Воздух проходит через открытый зазор между стеклянным покрытием солнечного воздушного нагревателя и абсорбирующей пластиной. Затем воздух входит в сушильную камеру и распределяется по пяти пластиковым лоткам с отверстиями. Часть солнечного излучения, которое прошло через прозрачное покрытие, была частично поглощена черной абсорбирующей поверхностью полости ФПМ во время процесса зарядки. Поглощенная тепловая энергия затем преобразовывалась в латентную и сенсительную формы тепла в СВН.

Образец продукции взвешивался каждый час для измерения уменьшения содержания влаги. Глобальные компоненты солнечного излучения непрерывно измерялись с помощью солнечного метра SM206-SOLAR. Кроме того, для измерения температур коллектора на входе и выходе абсорбирующей пластины, входе и выходе сушильной камеры и ФПМ использовался четырехканальный температурный регистратор Lutron (TM 903 A). Относительная влажность воздуха внутри сушильной камеры и окружающего воздуха измерялась с помощью анемометра TES 1341 HOT-WIRE ANEMOMETER. Анемометр UNI-T UT362 с USB-интерфейсом использовался для измерения скорости воздуха. Для определения средней скорости воздуха три раза измерялась скорость выхода воздуха в области апертуры в верхней части выходного горла сушильной камеры. Плотность воздуха, поперечное сечение апертуры и средняя скорость воздуха могут использоваться для вычисления расхода воздуха по массе. В табл. 1 приведен список всех характеристик измерительного оборудования.

Таблица 1. Спецификации измерительных устройств
Table 1. Specifications of measuring devices

Приборы/Devices	Точность/Accuracy	Диапазон/Range	Разрешение/Resolution
SM206-SOLAR Измеритель солнечного излучения SM206-SOLAR Solar irradiation meter	±5,0 %	1-3999 Вт/м ² W/m ² (btu)	0,10 Вт/м ² W/m ²
Lutron HT-3007SD Измеритель влажности/температуры Lutron HT-3007SD Humidity/temperature meter	3+1 % ОВ % RH, 0–50 %	5 to 95 % ОВ % R.H., ± 0,8 %	0,1 % ОВ/% R.H., 0,1 °C
4-канальный регистратор температурных данных Lutron (TM 903 A) 4-channels temp. data logger/Lutron (TM 903 A)	±(0,5 %+1 °C)	–100–1300 °C	0,1 °C
TES-1341 HOT-WIRE анемометр относительной влажности TES-1341 HOT-WIRE relative humidity anemometer	±3,0 % ОВ % RH	10–95 %	±3,0 % ОВ % RH
Анемометр UNI-T UT362 с USB UNI-T UT362 anemometer with USB	(± 3,0 %+5)	2~10 м/с (m/s)	–

Датчик DHT22, направленный на выход воздуха СВН, установлен внутри сушильной камеры для оценки температуры воздуха, как показано на рис. 10. Солнечное излучение и нагретая температура воздуха определяют необходимую скорость вентилятора.

Система нагрева работает в четыре этапа: датчик DHT22 замеряет температуру, значения передаются на Arduino, конвертируются в проценты/градусы Цельсия и отображаются на ЖК-дисплее. Однопроводная последовательная связь обеспечивает передачу данных. В диапазоне от 30 до 60 °C система регулирует скорость вентилятора для управления температурой выходного воздуха. Вентилятор работает до тех пор, пока температура не опустится ниже 30 °C, после чего выключается. Все характеристики измерительных приборов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики измерительных приборов
Table 2. Characteristics of measuring devices

Испытания Tests	Диапазон температур Temperature range (°C)	Рабочий цикл Operating cycle (%)	Скорость воздуха (м/с) Air velocity (m/s)	Массовый расход (кг/с) Mass flow rate (kg/s)
1	30–35	16,6	0,2	0,01
2	35–40	33,3	0,4	0,02
3	40–45	50,0	0,7	0,035
4	45–50	66,6	1,0	0,05
5	50–55	83,3	1,3	0,065
6	55–60	100,0	1,6	0,08

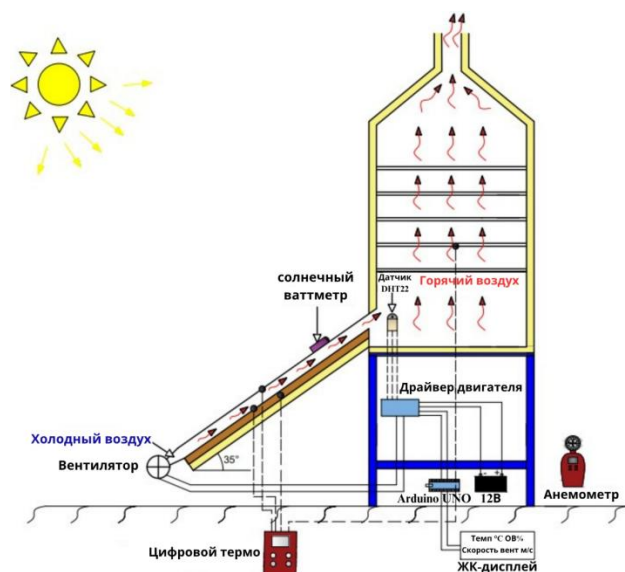


Рис. 3. Точки измерения всех параметров сушки солнечной сушилки

Fig. 3. Measurement points for all drying parameters of the solar dryer

Производительность сушилки может быть оценена по параметрам сушки (температура, относительная влажность и скорость воздуха). Схематическая диаграмма солнечной сушилки на рис. 3 показывает места, где были измерены температура, относительная влажность и скорость воздуха внутри и снаружи солнечной сушилки.

Анализ тепловых характеристик

Путем применения записанных данных эксперимента определяется первый закон термодинамического равновесия энергии. Написание общего уравнения для теплового баланса приводит к характеристикам СВН, сочетаемой с полостью ФПМ [2, 8].

$$Q_A = Q_u + Q_{st} + Q_{los},$$

$$Q_u = m_a^o C_{pa} (T_{oc} - T_{ic}),$$

$$Q_{los} = U_{los} A_c (T_{abs} - T_a),$$

где Q_A , Q_u и Q_{st} – поглощенная, полезная и сохраненная тепловая энергия соответственно, Вт; Q_{los} – потерянная мощность, Вт; m_a^o – массовый расход воздушного потока в секции воздушного канала нагревателя, кг/с; C_{pa} – удельная теплоемкость воздуха, кДж/кг, °C; T_{ic} и T_{oc} – температуры входящего и исходящего воздуха СВН, соответственно, °C; T_{abs} – температура поглотителя поверхности СВН, °C; T_a – температура окружающей среды, °C; U_{los} – коэффициент общих потерь тепла коллектора, Вт/м, °C; A_c – площадь поглотителя коллектора, м².

Во время фазы зарядки и разрядки запасенный поток тепла Q_{st} описывается следующим образом:

$$Q_{st} = q_s + L_F + q_L,$$

$$q_s = m_{pcm}^o C_{ps} (T_F - T_{pcm,i}),$$

$$q_L = m_{pcm}^o C_{pL} (T_{pcm,f} - T_F),$$

где q_s и q_L – удельная теплота твердого и жидкого воска, соответственно, кДж/кг; $L_F = 190$ кДж/кг – латентная теплота плавления; m_{pcm}^o – масса парафинового воска, г; C_{ps} и C_{pL} – удельная теплота твердого и жидкого воска, кДж/кг, °C соответственно; $T_{pcm,i}$ – начальная температура твердого воска, °C; $T_{pcm,f}$ – конечная температура жидкого воска, °C; T_F – температура плавления, °C.

В общем случае тепловая эффективность СВН η_c без ФПМ включает в себя получение тепла воздуха от солнечной энергии следующим образом:

$$\eta_c = \frac{\text{input heat}}{\text{output heat}} = \frac{Q_u}{A_c I},$$

где I – это глобальная солнечная радиация (Вт/м²).

Тепловой КПД СВН (η_c) с ФПМ во время зарядки включает в себя прирост тепла воздуха и скорость накопления ФПМ следующим образом:

$$\eta_c = \frac{Q_u + Q_{st}}{A_c I}$$

Тепловой КПД СВН с ФПМ во время разряда включает прирост тепла воздуха для восстановления тепла ФПМ в течение дня:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c I + Q_{st}}$$

Полезная энергия СВН извлекается из солнечной радиации в течение дня. Когда солнце садится, ФПМ начинает работать, пока его температура не сравняется с температурой окружающей среды.

Тепловой КПД СВН с ФПМ во время разряда включает прирост тепла воздуха от восстановленного тепла ФПМ в течение ночи следующим образом:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Q_{st}}$$

Эффективность сушки в течение дня составляет:

$$\eta_d = \frac{m_w h_i}{A_c I (t_d)}$$

где t_d – время сушки на солнце, ч; h_i – теплота парообразования воды, кДж/кг; m_w – масса испаренной воды, кг.

Эффективность сушки η_d в течении ночи составляет:

$$\eta_d = \frac{m_w h_i}{m_{pcm}^{o} C_{p,pcm} (T_{pcm,i} - T_{pcm,f})}$$

Для расчета содержания влаги M используется следующая формула:

$$M = \frac{w_o - w_d}{w_o} \cdot 100,$$

где W_o и W_d – начальный вес продукта и сухого вещества, соответственно, г.

Скорость сушки (CC) (drying rate – DR) определяется следующим образом:

$$DR = \frac{w_o}{t_d},$$

где m_o – масса влаги, извлеченной солнечным теплом, г.

Результаты и обсуждение

Рис. 4 иллюстрирует часовые изменения солнечной радиации и окружающей температуры во время испытаний сушки в Багдаде. Для сравнения был протестирован солнечный воздушный коллектор на основе ФПМ в двух случаях сушки: с постоянным потоком воздуха (ППВ) (constant flow rate – CFR) и автоматическим управлением потоком воздуха (АУПВ) (automatic airflow control – ARFC) в два дня, которые были практически идентичны днем по солнечной радиации и окружающей температуре 12 и 16 июля 2023 г., соответственно. Утренние часы характеризовались низкими уровнями в 9:00 со средними значениями 475 Вт/м² и 35 °С, достигая пиков в полдень (13:00) со средним значением 1180 Вт/м² и 44 °С. Изменения коррелируют с положением солнца и его лучами на коллекторе.

Рис. 5 показывает часовые температуры плоского солнечного нагревателя с 5-см хранилищем парафина, включая поглотительную пластину (Tabs), выходной воздух (Тс.о), парафиновый воск (Т_{PCM}) и сушильную камеру (Tr). Пиковые значения, °С: Tabs – 71, Тс.о – 53, Т_{PCM} – 64, Tr – 47. Парафиновый воск начинает плавиться в полдень, достигая 54 °С за 1,5 часа. После захода солнца парафиновый воск поддерживает температуру воздуха на 1,5–8 °С выше окружающей в течение 6 часов.

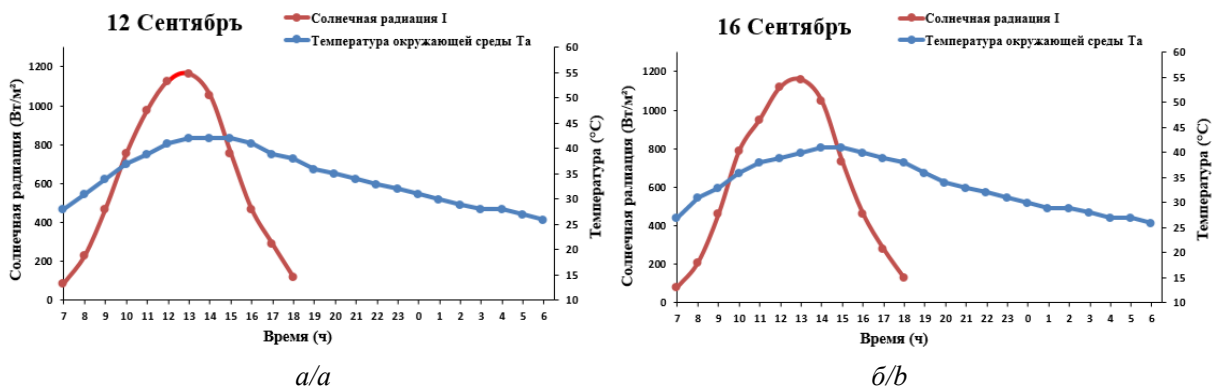


Рис. 4. Часовые изменения солнечной радиации и окружающей температуры в двух случаях сушки (а) ППВ и (б) АУПВ
Fig. 4. Hourly variations of solar radiation and ambient temperature in two drying cases (a) CFR and (b) ARFC

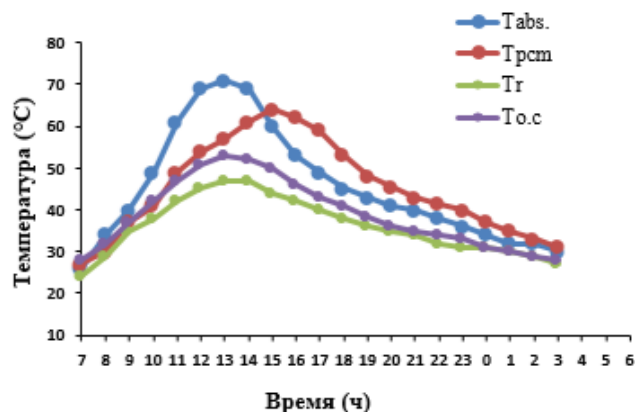


Рис. 5. Почасовое распределение измеренных температур сушилки под ПРВ с ФПМ

Fig. 5. Hourly distribution of measured temperatures of the dryer under CFR with PCM

Рис. 6 показывает изменения температуры с течением времени для поглотительной пластины (Tabs), ФПМ (парафиновый воск) (T_{PCM}), выходного воздуха из нагревателя ($T_{o.c}$) и сушильной камеры (T_r). Tabs достигает своего пика во время зарядки с 8 утра до 2 дня. Скорость вентилятора автоматически регулируется на основе солнечной радиации и температур, достигая максимума с 12 до 14 часов и замедляясь после 17 часов. В ходе экспериментальных наблюдений зафиксировано повышение температуры РСМ в процессе теплового аккумуляирования. Фазовый переход парафинового наполнителя инициировался в 11:30 при достижении температуры плавления, с полным переходом в жидкую фазу к 13:45 при стабилизированной температуре 54 °С. Энергия, накопленная таким образом, доступна после 14:30, когда солнечная радиация уменьшается.

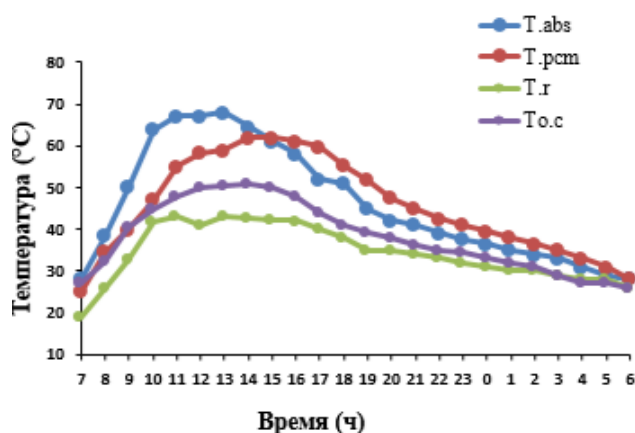


Рис. 6. Почасовое изменение температуры сушилки при АУРВ с ФПМ

Fig. 6. Hourly variation of dryer temperature during AFRC with PCM

Температура горячего воздуха отражает температуру поверхности поглощения, влияющую на солнечную радиацию днем и накопленную энергию ночью. Температура сушильной камеры снижается с уменьшением солнечной радиации, но остается повышенной во время термического хранения. РСМ поддерживает температуру воздуха на 1,5–8 °С выше окружающей в течение 9 часов под управлением AFRC.

Из рис. 7 видно, что эффективность коллектора, вероятно, выше в случае АУРВ по сравнению с ПРВ. Также отмечается, что сушильная машина в условиях CFR ПРВ прекращает сушку примерно в 22 часа, в то время как в случае АУРВ сушка продолжается до 3 часов следующего дня. С НТЭ видно, что средняя эффективность колеблется от 0,51 (случай 1) до 0,675 (случай 2), энергия, накопленная утром, высвобождается вечером, что приводит к более высокой эффективности в эти часы.

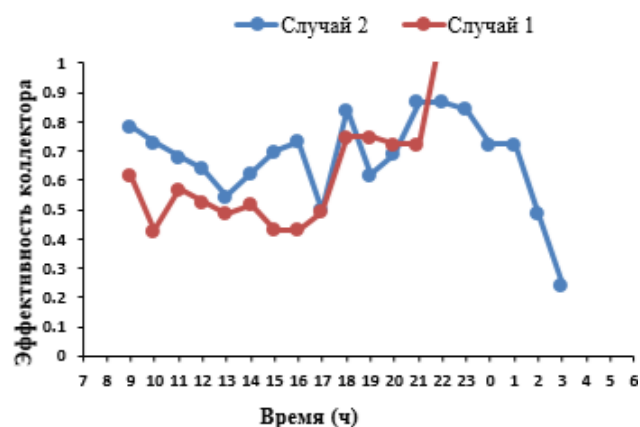


Рис. 7. Часовая эффективность коллектора в двух случаях сушки

Fig. 7. Hourly collector efficiency for the two drying cases

Рис. 8 показывает содержание влаги по сравнению со временем сушки в двух случаях сушки. Сушильная машина в условиях ПРВ сначала быстро осушает продукт, затем замедляется, в то время как в условиях АУРВ сушка начинается медленно из-за низкого потока воздуха, затем ускоряется с ростом солнечной радиации и температуры. Она достигает содержания влаги 0,19 после 9 часов после захода солнца благодаря термическому накоплению. Результаты подтверждают влияние потока воздуха и температуры на время сушки. Сушка в условиях АУРВ продолжается до 3:00 следующего дня.

Рис. 9 сравнивает средние скорости сушки с использованием ФПМ в двух случаях сушки. Скорости увеличились до 0,183 кг/ч (случай 1 ПРВ) и 0,222 кг/ч (случай 2 АУРВ) соответственно. Это подчеркивает улучшение скорости сушки за счет ФПМ. Сушильная

машина на основе ФПМ в условиях АУРВ дает самую высокую скорость из-за использования автоматической регулировки скорости вентилятора.

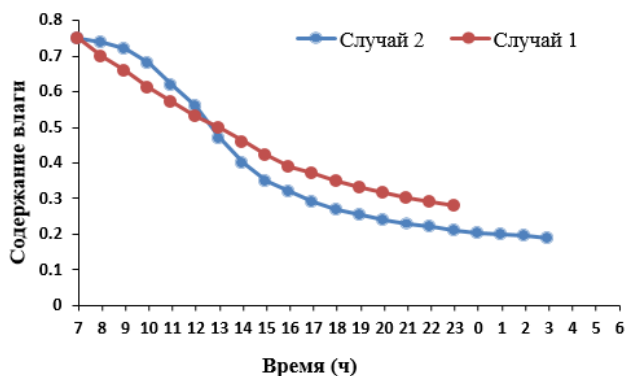


Рис. 8. Часовые изменения содержания влаги в двух случаях

Fig. 8. Hourly variations of moisture content in two cases

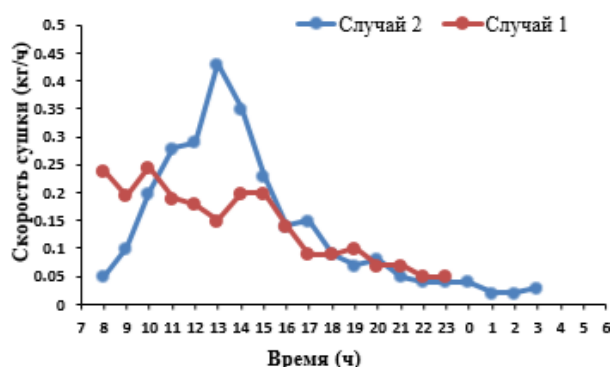


Рис. 9. Часовая скорость сушки в двух случаях сушки

Fig. 9. Hourly drying rate in two drying cases

Рис. 10 показывает часовую эффективность сушки в различных случаях. Большой поток воздуха способствует испарению водяного пара, увеличивая скорость сушки и эффективность в начале процесса. Эффективность уменьшается со временем. Видно, что средняя эффективность колеблется от 0,266 (случай 1) до 0,306 (случай 2), что благоприятствует термическому хранению для продолжительной работы после захода солнца. Эффективность сушки в случае АУРВ заметно выше, чем в случае ПРВ, из-за регулируемых скоростей воздушного потока в зависимости от температуры. В целом более высокая скорость воздушного потока повышает эффективность сушки.

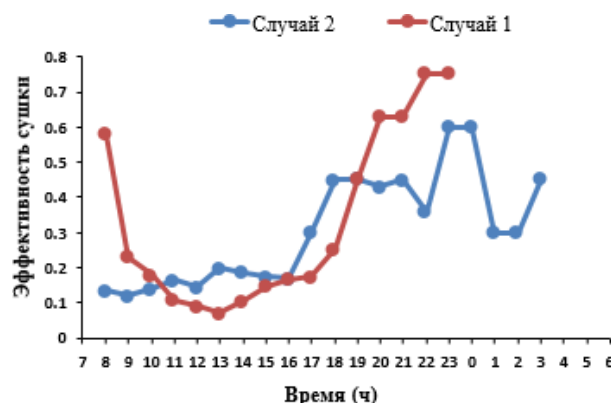


Рис. 10. Часовые изменения эффективности сушки в двух случаях сушки

Fig. 10. Hourly variations of dryer efficiency in two drying cases

Заключение

Система сушки с ФПМ улучшается за счет добавления автоматической системы управления. Скорость сушки может быть увеличена путем регулировки скорости воздушного потока в зависимости от значения температуры. Это позволяет поддерживать горячий воздух в допустимом диапазоне температур, улучшая поведение термической системы. Экономичный дизайн, доступность на рынке и передовые технологии производства улучшают надежность. Можно сделать некоторые выводы, как указано ниже:

1. Предложенное решение преодолевает недостатки традиционной сушки. Автоматическое регулирование скорости вращения вентилятора позволяет контролировать температуру в реальном времени в диапазоне 30–60 °С, снижает энергопотребление, повышает эффективность и ускоряет процесс сушки, сохраняя пищевую ценность.
2. ФПМ ускоряет процесс сушки пищевых продуктов, влияя на кинетику и экономя электроэнергию, особенно в случае АУРВ. Эффективность косвенного солнечного сушильного аппарата в сочетании с ФПМ составляет 26,6 % при ПРВ, а при АУРВ – 30,6 %.
3. Солнечная сушка с ФПМ при условии АУРВ позволила сократить время сушки продукта, обеспечивая наименьшее содержание влаги в рекордно короткие сроки. Среднее начальное содержание влаги 76 % уменьшилось до минимума 19 % за период сушки в 18 часов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Abdulmunem A.R., Jabal M.H., Samin P.M., Abdul Rahman H., Hussien H.A. Analysis of energy and exergy for the flat plate solar air collector with longitudinal fins embedded in paraffin wax located in Baghdad Center. *Int. j. of heat and tech.*, 2019, vol. 37, no. 4, pp. 1180–1186. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.370428>

2. Salih S.M., Jalil J.M., Najim S.E. Comparative study of novel solar air heater with and without latent energy storage. *J. of Ener. Stor.*, 2020, vol. 32, no. 101751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101751>
3. Abdulmunem A.R., Samin P.M., Abdul Rahman H., Hussien H.A., Mazali I.I., Ghazali H. Experimental and numerical investigations on the effects of different tilt angles on the phase change material melting process in a rectangular container. *J. of Ener. Stor.*, 2020, vol. 32, no. 101914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101914>
4. Kabeel A.E., Khalil A., Shalaby S.M., Zayed M.E. Improvement of the finned plate solar air heater by using latent heat thermal storage. *App. Ther. Eng.*, 2017, vol. 123, pp. 546–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.126>
5. Santoso M.T., Sudarto G., Nusriningyati N., Patni P. Modification of dryer cabinet based on automation system. *IJCAH 2022, ASSEHR*, vol. 724, no. 2023, pp. 1064–1071. DOI: https://doi.org/10.2991/978-2-38476-008-4_113
6. Patipat T., Pakamon, P. Nakorn T. Improving solar dryer performance with automatic control of auxiliary heated air. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, pp. 109–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.115>
7. El Khadraoui A., Bouadila S., Kooli S., Farhat A., Guizani A. Thermal behavior of indirect solar dryer: nocturnal usage of solar air collector with PCM. *J. of Clean. Produc.*, 2017, vol. 148, pp. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.149>
8. Bareen A., Dash S., Kalita P., Das K.K. Experimental investigation of an indirect solar dryer with PCM-integrated solar collector as a thermal energy storage medium. *Environ Sci Pollut Res.*, 2024, vo. 31, pp. 18209–18225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26690-2>
9. Bhardwaj A.K., Kumar R., Kumar S., Goel B., Chauhan R. Energy and exergy analyses of drying medicinal herb in a novel forced convection solar dryer integrated with SHSM and PCM. *Sustain Energy Technol Assessments*, 2021, vol. 45, no. 101119. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101119>
10. Chaatouf D., Raillani B., Salhi M., Amraoui S., Mezrhab A. Experimental and numerical study of a natural convection indirect solar dryer with PCM tubes: dynamic, thermal and nutritional quality analysis. *Solar Energy*, 2023, vol. 264, no. 111975. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2023.111975>
11. Hamdi I., Kooli S., Elkhadraoui A., Azaizia Z., Abdelhamid F., Guizani A. Experimental study and numerical modeling for drying grapes under solar greenhouse. *Renew Energy*, 2018, vol. 127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.027>
12. Ekka J.P., Bala K., Muthukumar P., Kanaujiya D.K. Performance analysis of a forced convection mixed mode horizontal solar cabinet dryer for drying of black ginger (*Kaempferia parviflora*) using two successive air mass flow rates. *Renew Energy*, 2020, vol. 152, pp. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.035>
13. Vijayan S., Arjunan T.V., Kumar A. Exergo-environmental analysis of an indirect forced convection solar dryer for drying bitter gourd slices. *Renew Energy*, 2020, vol. 146, pp. 2210–2223. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.066>
14. Jain D., Tewari P. Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. *Renew Energy*, 2015, vol. 80, pp. 244–250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.012>
15. Ceviz M.A., Mandev E., Muratcobanoğlu B., Çelik A., Afshari F. Experimental analysis of energy storage performance of phase change materials in horizontal double-glazing applications. *J Energy Storage*, 2023, vol. 73, no. 108836. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.108836>
16. Yoladi M., Akyurek E.F., Afshari F. Experimental study on the influence of inclination angle on phase change materials and natural convection during melting. *J Energy Storage*, 2024, vol. 83, no. 110769. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.110769>
17. Madhankumar S., Viswanathan K., Taipabu M.I., Wu W. A review on the latest developments in solar dryer technologies for food drying process. *Sustain Energy Technol Assessments*, 2023, vol. 58, no. 103298. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103298>
18. Ebadi S., Tasnim S.H., Aliabadi A.A., Mahmud S. An experimental investigation of the charging process of thermal energy storage system filled with PCM and metal wire mesh. *Appl. Therm. Eng.*, 2020, vol. 174, no. 115266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115266>
19. Reyes A., Negrete D., Mahn A., Sepúlveda F. Design and evaluation of a heat exchanger that uses paraffin wax and recycled materials as solar energy accumulator. *Energy Convers Manag*, 2014, vol. 88, pp. 391–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.032>
20. Devahastin S., Pitaksuriyarat S. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. *Appl. Therm. Eng.*, 2006, vol. 26, pp. 1705–1713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.11.007>
21. V´asquez J., Reyes A., Pailahueque N. Modeling, simulation and experimental validation of a solar dryer for agro-products with thermal energy storage system. *Renew Energy*, 2019, vol. 139, pp. 1375–1390. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.02.085>
22. Fadhil A.M., Jalil J.M., Bilal G.A. Experimental and numerical investigation of solar air collector with phase change material in column obstruction. *J. Energ. Stor.*, 2024, vol. 79, no. 110066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110066>
23. Rajesh S., Sekar S., Madhankumar S. Energy and environmental analysis in an indirect solar dryer with flat coil inserted phase change material. *Sustain. Ener. Techn. and Assessments*, 2024, vol. 66, no. 103805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103805>

Информация об авторах

Луай Абдулсалам Алкахдери, преподаватель кафедры энергетики, факультет электромеханической инженерии, Технологический университет, Ирак, г. Багдад, ул. Аль-Синаа, 50226@uotechnology.edu.iq

Алексей Васильевич Юрченко, доктор технических наук, профессор Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. reaper@tpu.ru

Джамаль Абдул-Карим Мохаммед, профессор кафедры систем, факультет электромеханической инженерии, Технологический университет, Ирак, г. Багдад, ул. Аль-Синаа, 50128@uotechnology.edu.iq
Никита Валерьевич Ершов, аспирант Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов nve5@tpu.ru

Поступила в редакцию: 17.02.2025

Поступила после рецензирования: 09.04.2025

Принята к публикации: 21.05.2025

Information about the authors

Louay Abdulsalam Alkahdery, Lecturer, University of Technology, Al Ainaa street, Bagdad, Iraq, 50226@uotechnology.edu.iq, <https://orcid.org/0000-0003-2785-0761>

Aleksey V. Yurchenko, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. reaper@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7854-5495>

Jamal A.-K. Mohammed, Professor, University of Technology, Al Ainaa street, Bagdad, Iraq. 50128@uotechnology.edu.iq, <https://orcid.org/0000-0003-1456-6673>

Nikita V. Ershov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nve5@tpu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-1717-5634>

Received: 17.02.2025

Revised: 09.04.2025

Accepted: 21.05.2025