



## Повышение энергоэффективности сушильной установки за счет применения термоэлектрических модулей

**Дмитрий Анатольевич Тихомиров,**  
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: tihda@mail.ru;

**Алексей Викторович Хименко,**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: avmkh87@gmail.com;  
**Алексей Васильевич Кузьмичев,**  
научный сотрудник, e-mail: alkumkuzm@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Сушка пищевых продуктов и материалов относится к наиболее распространенным способам и энергоемким процессам переработки сырья. Основным недостатком традиционных электрических конвективных бытовых сушилок являются потери теплоты в окружающую среду с влажным обработанным сушильным агентом. Также в подобных установках высушиваемый продукт нагревается неравномерно за счет снижения температуры и увеличения относительной влажности по мере продвижения снизу вверх. *(Цель исследования)* Провести лабораторные исследования процесса сушки на примере яблок для оценки энергозатрат на испарение 1 кг влаги разработанной конвективной термоэлектрической сушильной установкой и сравнить ее энергоэффективность с серийно выпускаемыми конвективными сушилками. *(Материалы и методы)* На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований были разработаны функциональная схема и лабораторный образец конвективной термоэлектрической сушилки с применением термоэлектрического теплового насоса. Сушка продукта осуществляется сушильным агентом (нагретым воздухом) с частичной рециркуляцией и рекуперацией теплоты удаляемого воздуха. *(Результаты и обсуждение)* Получены графики изменения температуры в контрольных точках и относительной влажности сушильного агента на входе и на выходе из разработанной установки. Представлены параметры яблок до и после сушки в термоэлектрической сушильной установке, а также в традиционной серийно выпускаемой конвективной сушилке бытового назначения. Разработана электрическая схема управления. Приведены выражения для расчета радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух». *(Выводы)* Оценено среднее значение количества утилизируемой теплоты радиатором холодного спая термоэлектрического теплового насоса из удаляемого сушильного агента в процессе сушки, которое составляет около 20 процентов от общего энергопотребления термоэлектрической установки из электрической сети. Выявлено, что лабораторный образец разработанной термоэлектрической сушильной установки обеспечивает более равномерный процесс сушки продукта за счет наличия боковых воздушных каналов и более эффективной организации движения сушильного агента в рабочей камере в отличие от традиционных конвективных сушилок, что подтверждается результатами испытаний. Показали, что применение термоэлектрического теплового насоса с рекуперацией теплоты отработанного сушильного агента позволит уменьшить установленную мощность нагревателя сушильного агента и снизить расход электроэнергии на процесс сушки по сравнению с серийно выпускаемыми бытовыми конвективными сушилками.

**Ключевые слова:** конвективная сушка, термоэлектрический тепловой насос, термоэлектрический модуль Пельтье, сушка пищевых продуктов, энергоэффективность, утилизация теплоты, рециркуляция воздуха, энергосбережение.

■ **Для цитирования:** Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Повышение энергоэффективности сушильной установки за счет применения термоэлектрических модулей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №2. С. 68-77. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77. EDN: VXKYOP.

Scientific article

## Increasing the Drying Unit Energy Efficiency Through with Thermoelectric Modules

**Dmitry A. Tikhomirov,**  
corresponding member of the Russian Academy  
of Sciences, Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,  
e-mail: tihda@mail.ru;

**Aleksey V. Khimenko,**  
Ph.D.(Eng.), senior researcher, e-mail: avmkh87@gmail.com;  
**Aleksey V. Kuzmichev,**  
researcher, e-mail: alkumkuzm@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** Drying food products and materials is one of the most common methods in processing raw materials, yet it remains

an energy-intensive process. The main drawback of traditional electric convective household dryers is the loss of heat and the wet waste drying agent into the environment. Furthermore, such units are characterized by uneven heating of the dried product, attributed to a temperature decrease and increasing humidity from bottom to top. (*Research purpose*) The purpose of this study is to conduct laboratory experiments on the drying process of apples focusing on evaluating the energy consumption required to evaporate 1 kilogram of moisture using a newly developed convective thermoelectric drying unit and compare its energy efficiency with mass-produced convective dryers. (*Materials and methods*) The findings from theoretical and experimental studies facilitated the development of a functional diagram and a laboratory prototype of a convective thermoelectric dryer using a thermoelectric heat pump. The drying process involves the utilization of a drying agent (heated air) with partial air recirculation, and heat recovery from the exhaust air. (*Results and discussion*) Temperature variations at designated control points and the relative humidity of the drying agent at both inlet and outlet of the developed unit were graphed and analyzed. The parameters of apples before and after drying in the thermoelectric drying unit are compared with those dried in a conventional household convective dryer. The study has resulted in developing an electrical control circuit for a thermoelectric drying unit and providing expressions to calculate the hot junction radiator of an air-to-air thermoelectric heat pump integrated into the developed drying unit. (*Conclusions*) The study estimated the average heat recovery by the cold junction radiator of a thermoelectric heat pump from the exhaust drying agent during the drying process, amounting to approximately 20 percent of the total energy consumption by the thermoelectric drying unit from the electrical grid. The research findings demonstrate that the laboratory prototype offers a more consistent drying process for the product. This is attributed to the incorporation of side air channels and a more efficient arrangement of the drying agent's movement within the working chamber, as opposed to traditional convective dryers. These conclusions are substantiated by the test results. It is illustrated that the use of a developed thermoelectric heat pump with heat recovery from the waste drying agent can lead to a reduction in the installed power capacity of the drying agent heater and a decrease in the energy consumption for the drying process in the developed convective thermoelectric drying unit compared to mass-produced household convective dryers.

**Keywords:** convective drying, thermoelectric heat pump, Peltier thermoelectric module, food drying, energy efficiency, heat recovery, air recirculation, energy saving.

■ **For citation:** Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Increasing the drying unit energy efficiency through with thermoelectric modules. *Agricultural machinery and technologies*. Vol. 18. N2. 68-77 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-68-77. EDN: VXKYOP.

Тепловая сушка является частью многих сельскохозяйственных технологий и относится к высокоэнергоемким процессам [1]. Сушеные овощи, фрукты и ягоды хорошо транспортируются, для их хранения требуется меньше складских площадей и они достаточно широко используются в качестве сырья для производства разнообразной пищевой продукции [2]. Однако при удалении влаги расходуется большое количество энергии при нагревании сушильного агента (воздуха), в связи с чем активно исследуются технологические и технические возможности по снижению энергозатрат за счет применения более экономичных решений и источников энергии, а также оптимизации процесса сушки.

Проведены теоретические исследования по определению времени и скорости нагрева измельченных яблок при радиационном способе сушки, а также экспериментальные исследования процесса сушки дикорастущих плодов и овощей в радиационной сушильной установке [3, 4]. Отмечено, что энерго-сберегающий режим работы кондуктивно-конвективной мини-зерносушилки может быть достигнут за счет частичного использования теплоты солнечного излучения, генерируемой в гелиоколлекторе и запасенной в тепловом аккумуляторе, а также рециркуляции отработанного сушильного агента [5].

Исследован процесс высушивания семян в кон-

вективно-радиационной установке с псевдооживленным слоем [6] и в конвективной сушилке с псевдооживленным слоем [7, 8]. Разработана автоматизированная система процесса сушки сельскохозяйственного сырья в условиях, обеспечивающих сохранение ценных биологических компонентов [9].

Возможность использования тепловых насосов в процессе сушки рассмотрена в работах [10, 11]. Предложена конструкция вакуум-сублимационной сушилки с использованием термоэлектрических модулей, обоснованы параметры и режимы ее работы [12].

В бытовых, а также в промышленных сушильных установках небольшой производительности продукт обычно нагревается конвективным способом. При этом с отработанным влажным воздухом в окружающую среду теряется часть теплоты. В то же время даже при частичной рециркуляции влажного воздуха в замкнутом контуре без осушения продолжительность сушки увеличивается, качество высушиваемого продукта ухудшается и энергосберегающий эффект будет невысокий [13]. Таким образом, недостатком электрических конвективных сушилок являются потери теплоты, уносимые с влажным воздухом в окружающую среду. Также к существенным недостаткам сушилок подобных конструкций можно отнести неравномерность нагрева высушиваемого продукта и сниже-

ние температуры сушильного агента по мере его продвижения снизу вверх через поддоны в корпусе сушилки, в результате чего продукты на нижних поддонах сушатся быстрее, чем на верхних поддонах.

Одним из способов повышения энергоэффективности тепловых процессов на объектах АПК является применение термоэлектрических модулей и сборок на базе элементов Пельтье (термоэлектрического теплового насоса) [14]. Например, для осушения и нагрева воздуха [15], локального обогрева молодняка животных [16], пастеризации и охлаждения молока (Кирсанов В.В., Кравченко В.Н., Филонов Р.Ф. Применение термоэлектрических модулей в пастеризационно-охладительных установках для обработки жидких пищевых продуктов. М.: МГАУ. 2011. 88 с.). Принцип работы термоэлектрического теплового насоса заключается в том, что холодный контур термоэлектрической сборки частично ассимилирует теплоту из отработанного воздуха и передает ее на горячий контур. В результате на горячей стороне термоэлектрического модуля генерация тепловой энергии для нагрева воздуха повышается.

Обосновано применение термоэлектрического теплового насоса в качестве нагревателя сушильного агента, разработаны функциональная схема и лабораторный образец конвективной сушильной установки с применением термоэлектрической сборки [14]. Данное решение позволит снизить потребление сетевой электроэнергии при сохранении высоких показателей качества продукта в сравнении с традиционными конвективными установками бытового назначения, в которых нагревателем сушильного агента служит, как правило, трубчатый электрический нагреватель (ТЭН).

**Цель исследования:** изучить процесс сушки яблок для оценки энергозатрат на испарение 1 кг влаги в разработанной конвективной термоэлектрической сушильной установке и ее сравнение по энергоэффективности с серийно выпускаемыми аналогами.

**Материалы и методы.** Принцип действия термоэлектрической сушильной установки с тепловым насосом показан на рисунке 1 (Патент RU2749682C1). Процесс осуществляется с частичной рециркуляцией воздуха и рекуперацией теплоты отработанного сушильного агента.

Воздух, проходя через радиатор горячего спая термоэлектрической сборки 5, подогревается и через приточный воздуховод 10 подается в сушильную камеру 11. Из нее поток сушильного агента удаляется в вытяжную камеру 12, разделяется и частично поступает в канал 14, а также в циркуляционный воздуховод 13. Через заслонку 8 вводится порция свежего наружного воздуха и через канал 7

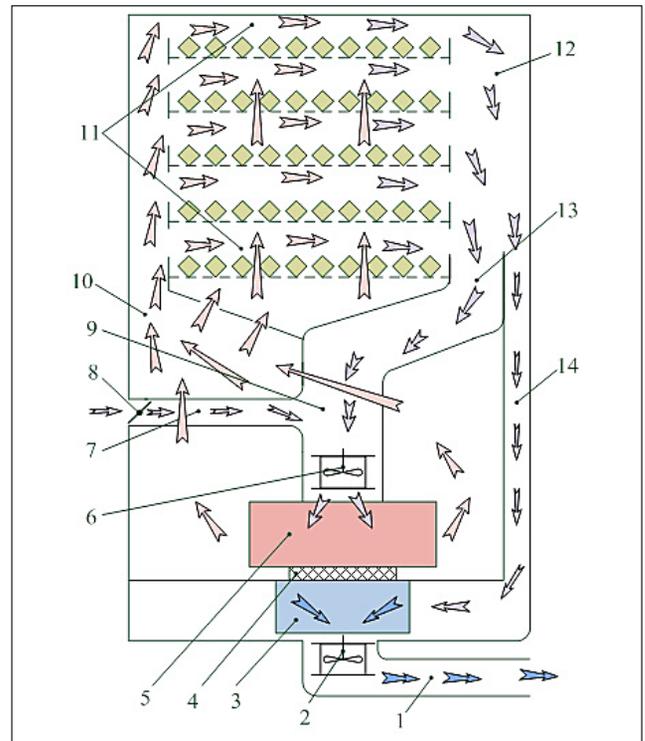


Рис. 1. Функциональная схема сушильной установки с применением термоэлектрической сборки, работающей в режиме теплового насоса

Fig. 1. Functional diagram of a drying unit using a thermoelectric assembly operating in heat pump mode

поступает в камеру смешения 9, откуда циркуляционным вентилятором 6 направляется на радиатор горячего спая 5 термоэлектрического теплового насоса 4. Часть удаляемого из сушильной камеры воздуха по каналу 14 направляется на радиатор холодного спая теплового насоса 3, где происходит рекуперация теплоты. Далее воздух вытяжным вентилятором 2, который обеспечивает подсос наружного воздуха через корпус основного блока питания ~220V/–24V, где он предварительно подогревается, охлаждая элементы схемы, выводится через канал 1 в окружающую среду.

**Результаты и обсуждение.** На основании разработанной функциональной схемы изготовлена физическая модель термоэлектрической сушильной установки для исследования параметров сушки (рис. 2).

Датчики температуры установлены в шести контрольных точках:  $T1$  – поверхность горячего радиатора;  $T2$  – воздух, подаваемый в сушильную камеру после подогрева;  $T3$  – воздух в сушильной камере;  $T4$  – воздух, уходящий из сушильной камеры;  $T5$  – отработанный воздух, удаляемый из сушильной установки;  $T6$  – воздух окружающей среды.

Проведены лабораторные испытания сушки яблок сорта «Гала» на пяти поддонах в термоэлектрической сушильной установке с исходным содер-

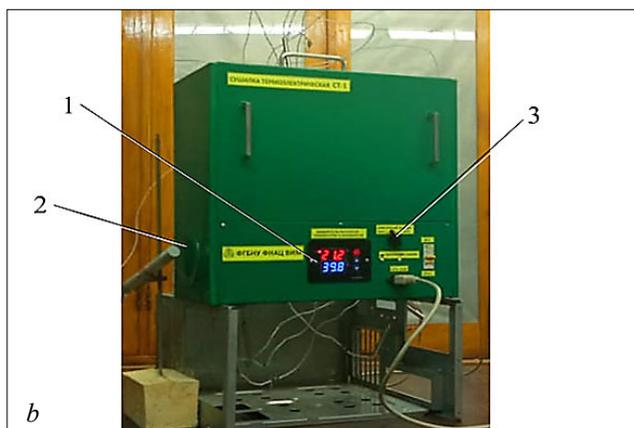
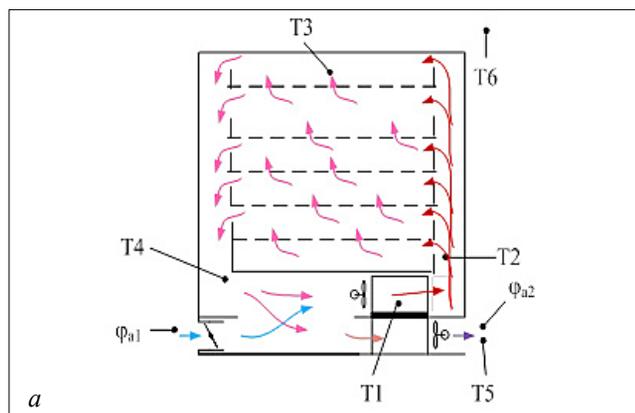


Рис. 2. Схема размещения датчиков температуры  $T1-T6$  и влажности воздуха  $\varphi_{a1}$ ,  $\varphi_{a2}$  в сушильной камере (а); общий вид лабораторного образца термоэлектрической сушильной установки (б): 1 – измеритель-регулятор температуры и влажности; 2 – отверстие для выхода отработанного сушильного агента; 3 – регулятор положения заслонки приточного воздуха

Fig. 2. Layout diagram of temperature sensors  $T1-T6$  and air humidity sensors  $\varphi_{a1}$ ,  $\varphi_{a2}$  in the drying chamber (a); overall view of the laboratory prototype of a thermoelectric drying unit (b): 1 – temperature and humidity controller; 2 – outlet for the exhaust dryer agent; 3 – supply air damper position regulator

жанием влаги 80-85% до конечной влажности 20%. Температурный и влажностный режимы соответствуют требованиям ГОСТ 32896-2014 «Фрукты сушеные. Общие технические условия». Температура окружающего воздуха  $19 \pm 1^\circ\text{C}$ , относительная влажность 45%.

Усредненные параметры яблок до и после сушки в термоэлектрической сушильной установке, полученные в лабораторных испытаниях, представлены в таблице 1. Усредненные параметры процесса сушки яблок в конвективной сушилке «РОТОР СШ-002» (рис. 3), полученные в лабораторных испытаниях, приведены в таблице 2.

Результаты оценки энергозатрат на 1 кг испаренной влаги в разработанной термоэлектрической су-



Рис. 3. Конвективная сушильная установка «РОТОР СШ-002» с датчиками температуры и влажности  
Fig. 3. Convective dryer ROTOR SH-002 with temperature and humidity sensors

шилке и некоторых серийно выпускаемых аналогах приведены в таблице 3 [17]. Для серийно выпускаемых образцов № 2-6 представлены расчетные значения, а для образцов № 1 и № 7 указаны экспериментальные данные, полученные при высушивании яблок в условиях, аналогичных для лабораторного образца № 8.

Графики изменения температуры в контрольных точках  $T1-T6$  и влажности сушильного агента на входе и выходе в процессе сушки лабораторного образца установки представлены на рисунке 4. Резкое повышение относительной влажности воздуха на выходе  $\varphi_{a2}$  в начальный период процесса сушки связано с интенсивным испарением поверхностной влаги из продукта. Циклическое изменение значений температуры  $T1-T6$  и относительной влажности воздуха на выходе из сушильной установки  $\varphi_{a2}$  обусловлено работой измерителя-регулятора температуры и влажности (рис. 2б).

Скорость в выходном канале отработанного воздуха ( $F_{\text{вк}} = 0,00232 \text{ м}^3$ ) измерялась с помощью термоанемометра ТКА-РКМ60 с выносным зондом ( $w_{\text{а,вк}} = 2-2,5 \text{ м/с}$ ). Температуру в контрольных точках определяли с помощью термопар хромель-копель и измерителя-регулятора температуры ТРМ138.

Среднее количество утилизируемой теплоты  $Q_{\text{оx}}$  из удаляемого сушильного агента, которое подводится к радиатору холодного спая термоэлектрического теплового насоса при среднем перепаде температур  $T4$  и  $T5$  в течение сушки  $7,3^\circ\text{C}$  и объемной теплоемкости влажного воздуха  $1,3 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$ , составляет 50,6 Вт. Это соответствует приблизительно 20% от общего потребления термоэлектрической сушильной установки из электрической сети (~240 Вт). Технические параметры лабораторного образца сушильной установки приведены в [14].

Образец термоэлектрической сушильной установки обеспечивает более равномерный процесс сушки продукта за счет наличия боковых воздушных каналов и более эффективной организации дви-

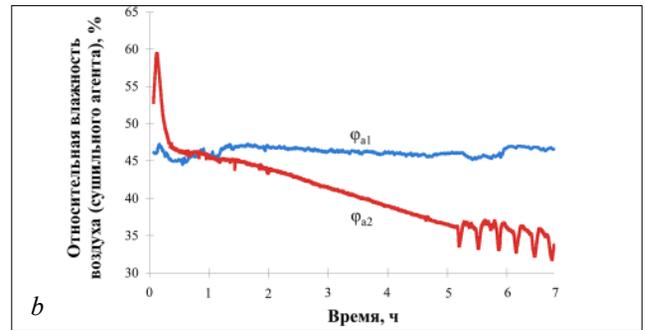
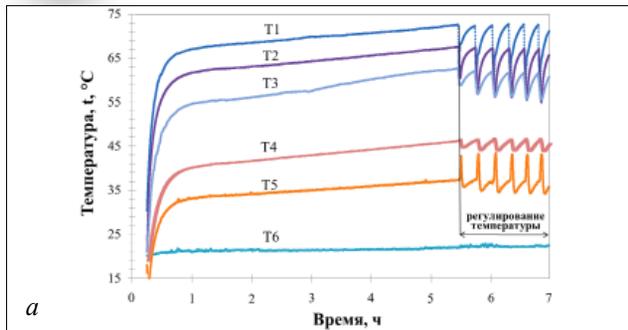


Рис. 4. Изменение в процессе сушки яблок в термоэлектрической установке: а – температуры в характерных точках (Т1-Т6); б – относительной влажности воздуха на входе ( $\phi_{a1}$ ) и на выходе ( $\phi_{a2}$ )

Fig. 4. Changes in the thermoelectric unit during the apple drying process: а – temperatures at characteristic points (Т1-Т6); б – air relative humidity at the inlet ( $\phi_{a1}$ ) and at the outlet ( $\phi_{a2}$ )

ПАРАМЕТРЫ ЯБЛОК ДО И ПОСЛЕ СУШКИ НА ЛАБОРАТОРНОМ ОБРАЗЦЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ							
APPLE DRYING PARAMETERS IN THE LABORATORY PROTOTYPE OF A THERMOELECTRIC DRYING UNIT							
№ поддона	До сушки			После сушки			
	Масса поддона и яблок, г	Масса поддона, г	Масса яблок, г	Масса поддона и яблок, г	Масса яблок, г	Количество испаренной влаги	
						г	%
1	446,4	171,6	274,8	235,7	64,1	210,7	76,67
2	438,5	170,4	268,1	233,3	62,9	205,2	76,54
3	420,1	173,4	246,7	225,3	51,9	194,8	78,96
4	462,3	172,4	289,9	236,4	64	225,9	77,92
5	444,6	175,4	269,2	233,8	58,4	210,8	78,31
Всего	2211,9	863,2	1348,7	1167,2	304	1044,7	

ПАРАМЕТРЫ ЯБЛОК ДО И ПОСЛЕ СУШКИ В КОНВЕКТИВНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ «РОТОР СШ-002»							
APPLE DRYING PARAMETERS IN ROTOR SH-002 CONVECTIVE DRYER							
№ поддона	До сушки			После сушки			
	Масса поддона и яблок, г	Масса поддона, г	Масса яблок, г	Масса поддона и яблок, г	Масса яблок, г	Количество испаренной влаги	
						г	%
1	623	252,6	370,4	351	98,4	272	73,43
2	593	252,4	340,6	353	100,6	240	70,46
3	634	252,0	382,0	377	125	257	67,28
4	619	252,3	366,7	387	134,7	232	63,27
5	583	251,9	331,1	381	129,1	202	61,01
Всего	3052	1261,2	1790,8	1849	587,8	1203	

СРАВНЕНИЕ БЫТОВЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПО РАСХОДУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА 1 КГ ИСПАРЕННОЙ ВЛАГИ ПРИ СУШКЕ ЯБЛОК			
COMPARISON OF HOUSEHOLD CONVECTIVE DRYERS IN TERMS OF ENERGY CONSUMPTION PER 1 KG OF EVAPORATED MOISTURE DURING THE APPLE DRYING PROCESS			
Модель установки	Мощность, потребляемая из сети, Вт	Количество поддонов	Расход энергии, кВт·ч на 1 кг испаренной влаги
№ 1 «Ветерок-2»	600	5	2,6
№ 2 Hyundai HYFD-S1202	500	12	2,5
№ 3 Vitek VT 5054	300	5	2,6
№ 4 Redmond RFD-0159	250	5	2,5
№ 5 Kitfort KT-1903	250	5	2,6
№ 6 «Мастерица»	150	5	2,8
№ 7 «РОТОР СШ-002»	520	5	2,8
№ 8 Лабораторный образец	240	5	2,2

жения сушильного агента в рабочей камере (рис. 1), что подтверждается результатами испытаний (табл. 1). В серийно выпускаемых бытовых конвективных установках (табл. 3) для более равномерного процесса сушки продукта необходимо периодически менять местами верхние и нижние поддоны.

#### Электрическая схема управления термоэлектрической сушильной установкой

Питание электрической схемы управления осуществляется от сети 220 В 50 Гц (рис. 5). Защита элементов схемы от перегрузки и при возникновении аварийных режимов осуществляется автоматическим выключателем *QF1*. Индикатором подачи напряжения служит светодиод *VD1*. В состав схемы управления установкой входят:

- *U1* – блок измерения температуры и влажности и регулирования процесса сушки продукта с датчиками температуры *ET* и влажности *EM*;
- *U2* – импульсный блок питания термоэлектрического модуля ~220В/–24В и током нагрузки до 20А, позволяющий в определенных пределах изменять выходное напряжение на элементах Пельтье; термоэлектрический модуль на элементах Пельтье, работающий в режиме теплового насоса;
- *U3* – импульсный блок ~220В/–12В и током нагрузки до 3А для питания двигателей вентиляторов *M1* и *M2* и индикатора окончания сушки. Контроль и регулирование процесса производится косвенным методом посредством замера параметров теплоносителя (температуры, влажности) в сушильной установке.

Первый канал блока измерения *U1* осуществляет регулирование температуры включением и отключением термоэлектрического модуля контактом реле регулятора *UIK1*. Второй канал измеряет влажность в камере и при достижении заданного значения включает светодиод «Окончание сушки». Влажность сушильного агента, уходящего из сушильной камеры, измеряемая на втором канале *U1*, задается конечной влажностью продукта согласно ГОСТ 32896-2014.

Датчики температуры и влажности блока *U1* размещены в сушильной камере. Верхнее предельное значение температуры режима сушки зависит от обрабатываемого материала и лимитируется соответствующими нормативными документами. Движение основной массы сушильного агента обеспечивает вентилятор *M1* по замкнутому контуру: нагреватель (элементы Пельтье «горячая сторона») – сушильная камера – нагреватель.

Термоэлектрическая сушильная установка для овощей и фруктов отвечает требованиям технологии процесса и позволяет поддерживать температурные режимы теплового агента в требуемом диапазоне.

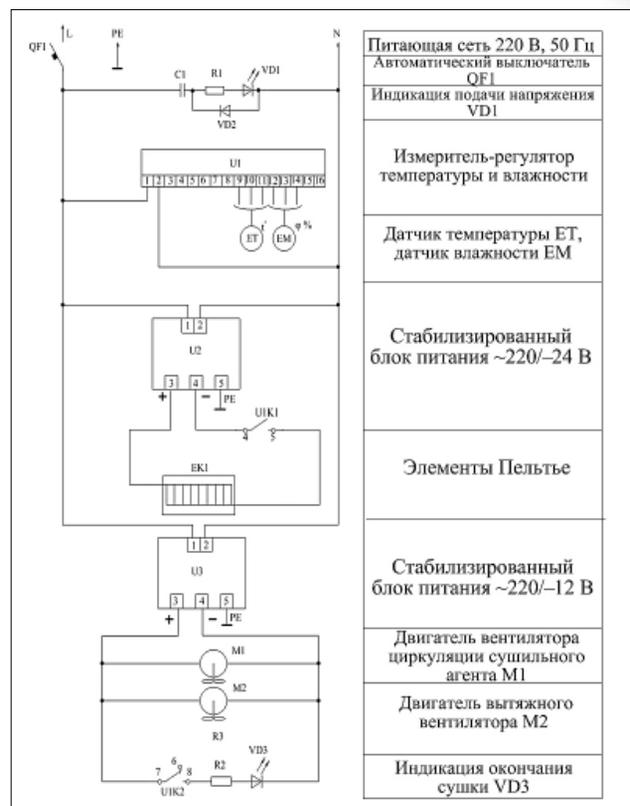


Рис. 5. Электрическая схема управления термоэлектрической сушильной установкой

Fig. 5. Electrical control circuit for the thermoelectric dryer

#### Расчет теплового баланса термоэлектрической сушильной установки

Уравнение внутреннего теплового баланса исследуемой установки будет иметь вид:

$$q_{\text{ок}} + q_{\text{э}} = q_{\text{м}} + q_{\text{к}} + kq_{\text{а}} - c_{\text{ж}} \cdot \theta_1, \quad (1)$$

где  $q_{\text{ок}}$  – удельное количество теплоты, утилизируемой из удаляемого сушильного агента, которое подводится к радиатору холодного спая термоэлектрического модуля, кДж/кг влаги;  $q_{\text{э}}$  – удельное количество теплоты, произведенной током в термоэлементе, кДж/кг влаги;  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость жидкости во влажном продукте при начальной температуре продукта на входе в сушилку  $\theta_1$  (приравниваем к температуре окружающей среды), кДж/(кг·°C);  $q_{\text{м}}$  – удельный подвод теплоты в сушилке на нагревание высушиваемого продукта, кДж/кг влаги;  $q_{\text{к}}$  – удельные потери теплоты поверхностью корпуса сушильной установки в окружающую среду, кДж/кг влаги;  $q_{\text{а}}$  – удельные потери теплоты с отработанным сушильным агентом (воздухом), кДж/кг влаги;  $k$  – коэффициент, учитывающий долю утилизируемой теплоты из удаляемого сушильного агента радиатором холодного спая модуля (0,88–0,80).

Суммарное удельное количество теплоты, утилизируемой из удаляемого сушильного агента, которое подводится к радиатору холодного спая термоэлек-

трического модуля  $q_{\text{ох}}$ , и удельное количество теплоты, произведенной током в термоэлементе  $q_3$ , составляет величину удельного количества теплоты, отбираемого сушильным агентом от радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса  $q_T$  [18].

Подвод удельный теплоты в сушильной установке на нагревание продукта

$$q_m = \frac{G_2 \cdot c_m \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{W} + c_{\text{ж}} \cdot (\theta_2 - \theta_1), \quad (2)$$

где  $G_2$  – производительность сушилки по конечному (высушенному) продукту, кг/с;  $c_m$  – теплоемкость высушенного продукта, кДж/(кг·°C) [для яблок принимаем среднее значение  $c_m = 3,88$  кДж/(кг·°C)];  $W$  – количество влаги, удаляемой из высушиваемого продукта, кг/с;  $\theta_2$  – температура продукта на выходе из сушилки, °C. Параметры  $G_2$  и  $W$  определяются при расчете материального баланса сушилки [13].

Принимаем температуру продукта на выходе из сушилки  $\theta_2$  равной температуре мокрого термометра  $t_{2\text{м}}$ . Процесс теоретической сушки принимаем адиабатным, находим  $t_{2\text{м}}$  с помощью  $i$ - $d$  диаграммы состояния влажного воздуха по начальным параметрам сушильного агента (температуре  $t_1$  и влажностному содержанию  $d_1$ ).

Теплоемкость высушенного продукта можно определить по формуле:

$$c_m = \frac{c_c \cdot 100 + c_{\text{ж}} \cdot \varphi_2}{100 + \varphi_2}, \quad (3)$$

где  $c_c$  – теплоемкость абсолютно сухого материала, кДж/(кг·°C);  $\varphi_2$  – конечная влажность продукта после завершения процесса сушки, %.

Удельные потери теплоты поверхностью корпуса сушильной установки в окружающую среду  $q_k$  принимаем в зависимости от влажности материала 125-420 кДж/кг испаренной влаги (для яблок принимаем меньшее значение) или 10-12% от значения удельного подвода теплоты в установке на нагревание высушиваемого продукта  $q_m$  (Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия. 1995. 368 с.). Также потери теплоты поверхностью корпуса сушилки в окружающую среду можно определить по коэффициенту теплопередачи через стенки корпуса  $K_c$  [13].

Удельные потери теплоты с отработанным сушильным агентом (воздухом)

$$q_a = \frac{G_a c_a (t_2 - t_0)}{W}, \quad (4)$$

где  $G_a$  – расход сушильного агента в процессе сушки, кг/с;  $c_a$  – теплоемкость агента сушки (воздуха), кДж/(кг·°C);  $t_2$  – температура отработанного воздуха, удаляемого из установки, °C;  $t_0$  – температура окружающей среды, °C.

Расход сушильного агента в процессе сушки

$$G_a = \frac{W}{d_2 - d_1}, \quad (5)$$

где  $d_1 = d_0$  – влагосодержание воздуха на входе в установку (воздух, проходящий через радиатор горячего спая термоэлектрической сборки, нагревается при постоянном влагосодержании  $d = \text{const}$ ), кг/кг;  $d_2$  – влагосодержание воздуха на выходе из установки, кг/кг.

*Расчет радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух» сушильной установки*

Целью расчета является определение конструктивных параметров воздушного радиатора (рис. 6), которые позволят с минимальными потерями передавать теплоту с горячей стороны термоэлектрического модуля сушильному агенту (воздуху).

Исходные данные для расчета:  $\Sigma Q$  – теплопроизводительность термоэлементов, Вт;  $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности материала радиатора, Вт/(м·°C);  $b$  – толщина ребра, м;  $h$  – расстояние между ребрами, м;  $H$  – высота ребра, м;  $L$  и  $B$  – размер воздушного радиатора вдоль и поперек ребер, соответственно, м;  $A$  – толщина основания радиатора, м.

В варианте с принудительным обдувом радиатора скорость воздуха  $v$  между ребрами воздушного радиатора принимаем равной от 2 до 4 м/с, исходя из анализа конструкций аналогичных установок [19].

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_r$  необходимо задать скорость воздуха  $w_a$ , выбрать коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  в зависимости от температуры воздуха, омывающего ребра радиатора, и определить критерий Рейнольдса  $Re$ . В зависимости от полученного значения  $Re$  (ламинарный или турбулентный режим течения) определяем критерий Нуссельта  $Nu$  по одной из формул (Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия. 1977. 344 с.):

при ламинарном режиме течения (для воздуха)

$$Nu_L = 0,57 Re_L^{0,5}, \quad (6)$$

при турбулентном режиме течения (для воздуха)

$$Nu_L = 0,032 Re_L^{0,8}. \quad (7)$$

Определяем коэффициент теплоотдачи  $\alpha_r$  потока сушильного агента (воздуха) к поверхности ребер радиатора по формуле:

$$\alpha_r = Nu \lambda_a / L, \quad (8)$$

где  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха при установленной температуре, Вт/(м·°C).

Габаритные размеры воздушного радиатора определяют по выражению, позволяющему выбрать наиболее рациональное соотношение между толщ-

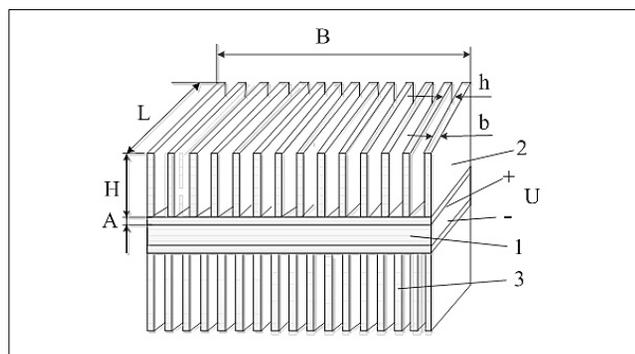


Рис. 6. Схема термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух»: 1 – термоэлектрический элемент Пельтье; 2 и 3 – ребра воздушного радиатора соответственно горячего и холодного контура

Fig. 6. Diagram of an air-to-air thermoelectric heat pump: 1 – Peltier thermoelectric element; 2 – hot circuit air radiator fins; 3 – cold circuit air radiator fins

ной ребра  $b$  и его высотой  $H$ , при котором достигается наибольший теплообмен при одинаковом расходе металла на ребра радиатора [19]:

$$H = 1,419 \frac{b}{2} \sqrt{\frac{2\lambda_r}{\alpha_r b}} \quad (9)$$

Площадь поверхности теплообмена с сушильным агентом одного ребра радиатора:

$$F_r' = 2HL \quad (10)$$

Теплота передается через суммарную площадь поверхности радиатора  $F_r$  и может быть выражена через уравнение теплового потока:

$$\sum Q = K_r F_r \Delta t_a, \quad (11)$$

где  $\sum Q$  – тепловой поток горячего контура термоэлектрической сборки (теплового насоса), Вт (определяется на основании технической характеристики термоэлектрических модулей);  $K_r$  – коэффициент теплопередачи горячей поверхности термоэлектрических модулей сушильному агенту, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F_r$  – площадь поверхности всех ребер радиатора, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_a = t_{a1} - t_{a2}$  – задаваемая разность температуры воздуха на входе и выходе из радиатора, °C.

$$K_r = \frac{1}{1/\alpha_r + A/\lambda_r} \quad (12)$$

Количество ребер радиатора

$$N = F_r / F_r' \quad (13)$$

С учетом принятой скорости теплоносителя  $w_a$  площадь (сечение) воздушного канала, в котором должен быть установлен воздушный радиатор

термоэлектрического модуля:

$$f_c = G_a / w_a \quad (14)$$

**Выводы.** В соответствии с предложенной функциональной схемой изготовлен лабораторный образец термоэлектрической сушильной установки. Проведены лабораторные исследования процесса сушки яблок для сравнения показателя энергозатрат на испарение 1 кг влаги разработанного образца с некоторыми серийно выпускаемыми сушилками бытового назначения.

Сушка продукта осуществляется сушильным агентом (нагретым воздухом) с частичной рециркуляцией и рекуперацией теплоты удаляемого воздуха. Получены графики изменения температуры сушильного агента на входе и на выходе из установки, характеризующие динамику процесса сушки. Приведены параметры яблок до и после сушки в термоэлектрической установке, а также в традиционной серийно выпускаемой конвективной сушилке.

Конструкция разработанного лабораторного образца термоэлектрической сушильной установки обеспечивает более равномерный процесс сушки продукта за счет наличия боковых воздушных каналов и более эффективной организации движения сушильного агента в рабочей камере в отличие от традиционных конвективных сушилок.

В конце процесса сушки яблок разница по количеству испаренной влаги в поддонах термоэлектрической установки не превышает 2,5% (в традиционной конвективной сушилке – более 12,5% даже при периодической перестановке верхних и нижних поддонов).

Применение термоэлектрического теплового насоса с рекуперацией теплоты отработанного агента позволяет уменьшить мощность нагревателя сушильного агента и снизить расход электроэнергии на процесс сушки до 20% по сравнению с традиционными серийно выпускаемыми бытовыми сушильными установками. Приведены формулы расчета радиатора горячего спая термоэлектрического теплового насоса «воздух-воздух» для обоснования параметров термоэлектрической сборки различной производительности сушильных установок предложенной конструкции.

Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию режимов работы конвективной термоэлектрической сушильной установки с учетом текущей влажности высушиваемого продукта, объема рециркуляционного воздуха и количества подмешиваемого наружного воздуха в процессе сушки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kudryashev G.S., Tretyakov A.N., Batishev S.V. et al. Characteristics of the cost of electricity consumption in agricultural production. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. 32087. DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032087.
2. Неверов Е.Н., Короткий И.А., Горелкина А.К. и др. Ис-

- следование параметров работы дегидрататора для реализации конвективной сушки влагосодержащих пищевых продуктов // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2023. N2(70). С. 466-479. DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-55.
3. Очиров В.Д., Федотов В.А. Определение времени и скорости нагрева измельченных плодов яблок при терморadiационной сушке // *Вестник КрасГАУ*. 2018. N1(136). С. 89-95. EDN: SCBYTT.
  4. Алтухов И.В., Очиров В.Д., Федотов В.А. Экспериментальная ИК-установка для сушки плодов и овощей // *Вестник ИрГСХА*. 2017. N81-2. С. 90-96. EDN: ZFOTTR.
  5. Гасанов У.Р., Магеррамова С.А. Эффективность работы энергосберегающей мини-зерносушилки с комбинированной системой теплоснабжения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N6. С. 9-14. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-6-9-14.
  6. Лобачевский Я.П., Павлов С.А. Инфракрасная сушка семян в псевдооживленном слое // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N5. С. 39-43. DOI: 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43.
  7. Надеев А.А., Бараков А.В., Дубанин В.Ю. и др. Экспериментальное исследование процесса сушки силикагеля в аппарате с центробежным псевдооживленным слоем // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018. Т. 14. N2. С. 44-50. EDN: YVOGXU.
  8. Надеев А.А., Бараков А.В., Прутских Д.А. и др. Экспериментальное исследование конвективной сушилки с центробежным псевдооживленным слоем // *Вестник ИГЭУ*. 2021. N2. С. 5-13. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.005-013.
  9. Altukhov I.V., Bykova S.M., Lukina G.V. et al. Automation of the drying process of agricultural raw materials to obtain products of high nutritional value. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 421. 32019. DOI: 10.1088/1755-1315/421/3/032019.
  10. Романова Е.В., Орлов А.Ю. Возможности использования тепловых насосов в процессе сушки // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2008. Т. 14. N3. С. 591-596. EDN: KXPDP.
  11. Коновалов В.И., Романова Е.В., Гагапова Н.Ц. Сушка с тепловыми насосами в химической промышленности: возможности и экспериментальная техника // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2011. Т. 17. N1. С. 153-178. EDN: NEEHUB.
  12. Барыкин Р.А., Пойманов В.В., Шахов С.В. Разработка вакуум-сублимационных сушилок с использованием термоэлектрических модулей // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2014. N1(59). С. 47-50. EDN: SDHAXD.
  13. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Кузьмичев А.В. и др. Принцип построения энергосберегающей сушильной установки с применением термоэлектричества // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N1(42). С. 16-22. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-16-22.
  14. Тихомиров Д.А., Яшин И.С., Хименко А.В. и др. Физическое моделирование процесса сушки с применением термоэлектрического теплового насоса // *Техника и оборудование для села*. 2023. N1(307). С. 40-45. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-40-45.
  15. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V., et al. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattle breeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6S6. 293-305. DOI: 10.1016/j.egy.2020.08.052.
  16. Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Напольный обогрев поросят с применением термоэлектрического теплового насоса // *Техника и оборудование для села*. 2021. N9(291). С. 28-32. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-9-28-32.
  17. Яшин И.С., Тихомиров Д.А. Обзор современных сушильных установок для овощей и фруктов и способы повышения их энергоэффективности // *Агротехника и энергообеспечение*. 2022. N4(37). С. 175-181. EDN: FHPRQ.
  18. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // *Компоненты и технологии*. 2010. N1(102). С. 102-109. EDN: LMCSSS.
  19. Капля В.И., Бурцев А.Г., Андриянов С.А. и др. Расчет режима работы элемента Пельтье, используемого в качестве охладителя в модуле осушки проб воздуха // *Инженерный вестник Дона*. 2017. N 2(45). 70. EDN: ZEONGH.

## REFERENCES

1. Kudryashev G.S., Tretyakov A.N., Batishchev S.V. et al. Characteristics of the cost of electricity consumption in agricultural production. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. 32087 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/677/3/032087.
2. Neverov E.N., Korotky I.A., Gorelkina A.K. et al. Investigation of the parameters of the dehydrator for the implementation of convective drying of moisture-containing foods. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023. N2(70). 466-479 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2023-02-55.
3. Ochirov V.D., Fedotov V.A. The determination of time and speed of chopped apples heating during thermal and radiation drying process. *The Bulletin of KrasGAU*. 2018. N1(136). 89-95 (In Russian). EDN: SCBYTT.
4. Altukhov I.V., Ochirov V.D., Fedotov V.A. Experimental installation for drying fruits and vegetables. *Vestnik IrGSHA*. 2017. N81-2. 90-96 (In Russian). EDN: ZFOTTR.
5. Gasanov U.R., Magerramova S.A. Performance efficiency of an energy-saving mini dryer with a combined heat supply system. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N6. 9-14 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-6-9-14.
6. Lobachevsky Ya.P., Pavlov S.A. Infrared drying of seeds

- in a fluidized bed. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N5. 39-43 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43.
7. Nadeev A.A., Barakov A.V., Dubanin V.Yu. et al. Experimental study of the silica gel drying process in the apparatus with centrifugal fluidized bed. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2018. Vol. 14. N2. 44-50 (In Russian). EDN: YVOGXY.
  8. Nadeev A.A., Barakov A.V., Prutskikh D.A. et al. Experimental study of convective dryer with centrifugal fluidized bed. *Vestnik IGEU*. 2021. N2. 5-13 (In Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.005-013.
  9. Altukhov I.V., Bykova S.M., Lukina G.V. et al. Automation of the drying process of agricultural raw materials to obtain products of high nutritional value. *IOP: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 421. 32019 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/421/3/032019.
  10. Romanova E.V., Orlov A.Yu. Possibilities of using heat pumps in drying process. *Transactions of the TSTU*. 2008. Vol. 14. N 3. 591-596 (In Russian). EDN: KXPDP.
  11. Konovalov V.I., Romanova E.V., Gatapova N.C. Drying with heat pumps in chemical industry: opportunities and experimental techniques. *Transactions of the TSTU*. 2011. Vol. 17. N1. 153-178 (In Russian). EDN: NEEHUB.
  12. Barykin R.A., Poymanov V.V., Shakhov S.V. Development of vacuum sublimation dryers using thermoelectric modules. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2014. N1(59). 47-50 (In Russian). EDN: SDHAXD.
  13. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V. et al. The principle of building an energy-saving drying plant using thermoelectricity. *Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex*. 2021. Vol. 68. N1(42). 16-22 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-1-16-22.
  14. Tikhomirov D.A., Yashin I.S., Khimenko A.V., et al. Physical modeling of the drying process using thermoelectric heat pump. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N1(307). 40-45 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-40-45.
  15. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Kuzmichev A.V. et al. Energy-efficient thermoelectric unit for microclimate control on cattle breeding premises. *Energy Reports*. 2020. Vol. 6S6. 293-305 (In English). DOI: 10.1016/j.egy.2020.08.052.
  16. Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Floor heating of piglets using a thermoelectric heat pump. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N9(291). 28-32 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-9-28-32.
  17. Yashin I.S., Tikhomirov D.A. Review of modern drying installations for vegetables and fruits and ways to increase their energy efficiency. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2022. N4(37). 175-181 (In Russian). EDN: FIHPRQ.
  18. Shostakovskii P. Modern thermoelectric cooling solutions for electronic, medical, industrial and household appliances. *Components and Technologies*. 2010. N1(102). 102-109 (In Russian). EDN: LMCSSS.
  19. Kaplya V.I., Burtsev A.G., Andriyanov S.A. et al. The calculation of peltier working mode using as a cooler in air drying module. *Engineering Journal of Don*. 2017. N 2(45). 70 (In Russian). EDN: ZEONGH.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Тихомиров Д.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования; лабораторные испытания сушильной установки;

Хименко А.В. – доработка и оформление текста статьи, анализ и выбор расчетных зависимостей, формулирование цели исследования и общих выводов, формирование библиографического списка;

Кузьмичев А.В. – анализ научных исследований и литературный обзор, лабораторные испытания термоэлектрической сушильной установки.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Tikhomirov D.A. – scientific guidance, formulating the main research directions; laboratory tests of the drying plant;

Khimenko A.V. – manuscript revision and formatting, calculated dependencies analysis and selection, formulating the study purpose and general conclusions, formation of the reference list;

Kuzmichev A.V. – research analysis and literature review; laboratory tests of the thermoelectric drying unit.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

10.01.2024

21.02.2024