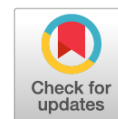


# СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СУШИЛКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА



## REDUCING THE ENERGY CONSUMPTION OF THE AERODYNAMIC HEATING DRYER

**А.И. КУПРЕЕНКО**, д.т.н.  
**Х.М. ИСАЕВ**, к.э.н.  
**С.Х. ИСАЕВ**

Брянский государственный аграрный университет,  
Брянск, Россия, kupreenkoai@mail.ru

**A.I. KUPREYENKO**, Dsc in Engineering  
**KH.M. ISAYEV**, PhD in Economics  
**S.KH. ISAYEV**

Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia,  
kupreenkoai@mail.ru

Перспективным направлением развития сушильных установок в технологиях переработки плодово-ягодного сырья является использование сушилок аэродинамического подогрева. В них реализуется принцип трансформации электрической энергии, расходуемой на привод центробежного вентилятора, в тепловую энергию за счет взаимного трения циркулирующих в замкнутой камере воздушных потоков. При этом подавляющая часть подводимой к ротору электрической энергии расходуется на преодоление аэродинамических потерь в проточной части рабочего колеса и в сушильной камере. Для снижения энергоемкости процесса сушки путем снижения расхода энергии на нагрев сушильного агента в сушильной камере предложено утилизировать теплоту отработанного сушильного агента за счет оснащения сушилки комбинированным теплообменником. Он совмещает в себе пластинчатый теплообменник и воздушный солнечный коллектор.

Целью исследования являлся анализ эффективности использования комбинированного теплообменника для снижения энергоемкости сушилки аэродинамического нагрева при сушке яблок. Исследовалась работа сушильной установки при использовании комбинированного теплообменника и без него. Для фиксации параметров сушильного агента, окружающей среды, расхода электроэнергии использовали восьмиканальный измеритель-терморегулятор ТРМ-138 с датчиками термосопротивления и счетчик электрической энергии с трансформаторами тока. Результаты исследования показали, что использование комбинированного теплообменника позволило повысить температуру поступающего в сушильную камеру сушильного агента в среднем на 20 °С относительно температуры атмосферного воздуха. Более интенсивный рост температуры сушильного агента при использовании комбинированного теплообменника позволил сократить продолжительность сушки на 3 часа. Расход электроэнергии при этом уменьшился на 27,4 %.

**Ключевые слова:** комбинированный теплообменник, сушилка аэродинамического нагрева, энергоемкость процесса сушки.

**Для цитирования:** Купреенко А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Снижение энергоемкости сушилки аэродинамического нагрева // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 1. С. 81–87. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-81-87.

A promising direction in the development of drying plants in the technologies of processing fruit and berry raw materials is the use of aerodynamic heating dryers. They implement the principle of transformation of electrical energy consumed to drive a centrifugal fan into thermal energy due to mutual friction of air flows circulating in a closed chamber. In this case, the overwhelming part of the electrical energy supplied to the rotor is spent on overcoming aerodynamic losses in the flow path of the impeller and in the drying chamber. To reduce the energy consumption of the drying process by reducing the energy consumption for heating the drying agent in the drying chamber, it is proposed to utilize the heat of the spent drying agent by equipping the dryer with a combined heat exchanger. It combines a plate heat exchanger and a solar air collector.

The aim of the study was to analyze the efficiency of using a combined heat exchanger to reduce the energy consumption of an aerodynamic dryer when drying apples. The operation of the drying plant was investigated with and without a combined heat exchanger. To record the parameters of the drying agent, the environment, and the consumption of electric energy, an eight-channel TRM-138 thermoregulator meter with thermal resistance sensors and an electric energy meter with current transformers were used. An eight-channel TRM-138 thermoregulator meter with thermal resistance sensors and an electric energy meter with current transformers was used to record the parameters of the drying agent, the environment, and the consumption of electric energy. The research results showed that the use of a combined heat exchanger made it possible to increase the temperature of the drying agent entering the drying chamber by an average of 20 °C relative to the ambient air temperature. A more intensive increase in the temperature of the drying agent when using a combined heat exchanger made it possible to reduce the drying time by 3 hours. At the same time, electricity consumption decreased by 27,4 %.

**Keywords:** combined heat exchanger, aerodynamic heating dryer, energy consumption of the drying process.

**Cite as:** Kupreyenko A.I., Isayev KH.M., Isayev S.KH. Reducing the energy consumption of the aerodynamic heating dryer. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 1, pp. 81–87 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-1-81-87.

## Введение

Принцип работы печей аэродинамического подогрева, или печей аэродинамических потерь заключается в том, что изолированный ротор (т.е. ротора без корпуса) центробежного вентилятора работает в режиме роторного нагрева. При этом подавляющая часть подводимой к ротору электрической энергии расходуется на преодоление аэродинамических потерь в проточной части рабочего колеса, в рабочей камере, преобразуясь при этом в тепловую энергию [1].

Установки аэродинамического нагрева имеют широкую область применения в процессах термообработки легких и цветных металлов и сплавов, полимеров, сушки пищевых продуктов, пиломатериалов и т.п.

Одним из перспективных направлений использования сушилок аэродинамического нагрева является сушка плодово-ягодного сырья. Сельхозпроизводителями Брянской области реализуется ряд крупных проектов по развитию плодового и ягодового хозяйства [2, 3].

В Брянском ГАУ были проведены исследования по повышению эффективности работы установки аэродинамического нагрева для сушки плодово-ягодного сырья [4–7]. Для снижения энергозатрат сушилками была оборудована комбинированным теплообменником [8–10]. Он совмещает в себе пластинчатый теплообменник и воздушный солнечный коллектор, исходя из перспективности использования гелиоколлекторов в условиях Брянской области [11, 12].

Были проведены испытания сушилки, оборудованной комбинированным теплообменником, на сушке яблок.

## Цель исследований

Анализ эффективности использования комбинированного теплообменника для снижения энергоемкости сушилки аэродинамического нагрева при сушке яблок. Исследовалась работа сушильной установки при использовании комбинированного теплообменника и без него.

## Материалы и методы

Принцип работы сушилки с комбинированным теплообменником показан на рис. 1.

На рис. 1 приведены следующие обозначения: 1 – сушильная камера; 2 – дверь; 3 – патрубки для подсоса сушильного агента; 4 – патрубок для выброса сушильного агента

(жалюзи в форме ромашки); 5 – нагревательный ротор центробежного вентилятора; 6 – приводной электродвигатель; 7 – комбинированный теплообменник; 8 – теплообменные поверхности; 9 – воздушный солнечный коллектор; 10 – светопрозрачное покрытие; 11 – патрубок для входа отработанного сушильного агента в верхнюю камеру; 12 – патрубок для выхода отработанного сушильного агента из верхней камеры; 13 – входной патрубок средней камеры; 14 – выходной патрубок средней камеры; 15 – перегородки; 16 – каналы для прохода подогреваемого атмосферного воздуха; 17 – патрубок для входа отработанного сушильного агента в нижнюю камеру; 18 – патрубок для выхода отработанного сушильного агента из нижней камеры; 19 – заслонка; 20 – жалюзи.

Сырье загружают в сушильную камеру 1 через дверь 2. В начале сушки на этапе разогрева сушилки заслонка 19 находится в положении, перекрывающем подачу отработанного сушильного агента в камеры комбинированного теплообменника 7. Атмосферный воздух через входной патрубок 13 поступает в среднюю камеру пластинчатого теплообменника. Двигаясь по каналам 16, атмосферный воздух подогревается за счет теплообмена с теплообменной поверхностью солнечного коллектора 9 и через выходной патрубок 14 средней камеры и входной патрубок 3 теплоизолированной камеры 1 поступает к нагревательному ротору 5, который обеспечивает дальнейший нагрев и циркуляцию сушильного агента по замкнутому контуру сушильной камеры 1. Контакт с высушиваемым сырьем, сушильный агент насыщается удаляемой влагой и через выходной патрубок 4 частично сбрасывается в атмосферу. При этом подогрев атмосферного воздуха (сушильного агента) в пластинчатом теплообменном аппарате 7 осуществляется за счет энергии солнечного излучения.

При достижении температуры сбрасываемого из сушильной камеры отработанного сушильного агента температуры подогретого сушильного агента, поступающего из комбинированного теплообменника 7, заслонку 19 ставят в положение, обеспечивающее подачу отработанного сушильного агента через входные патрубки 11 и 17 обратно в комбинированный теплообменник 7. Это обеспечивает дополнительный подогрев атмосферного воздуха (сушильного агента) за счет передачи теплоты

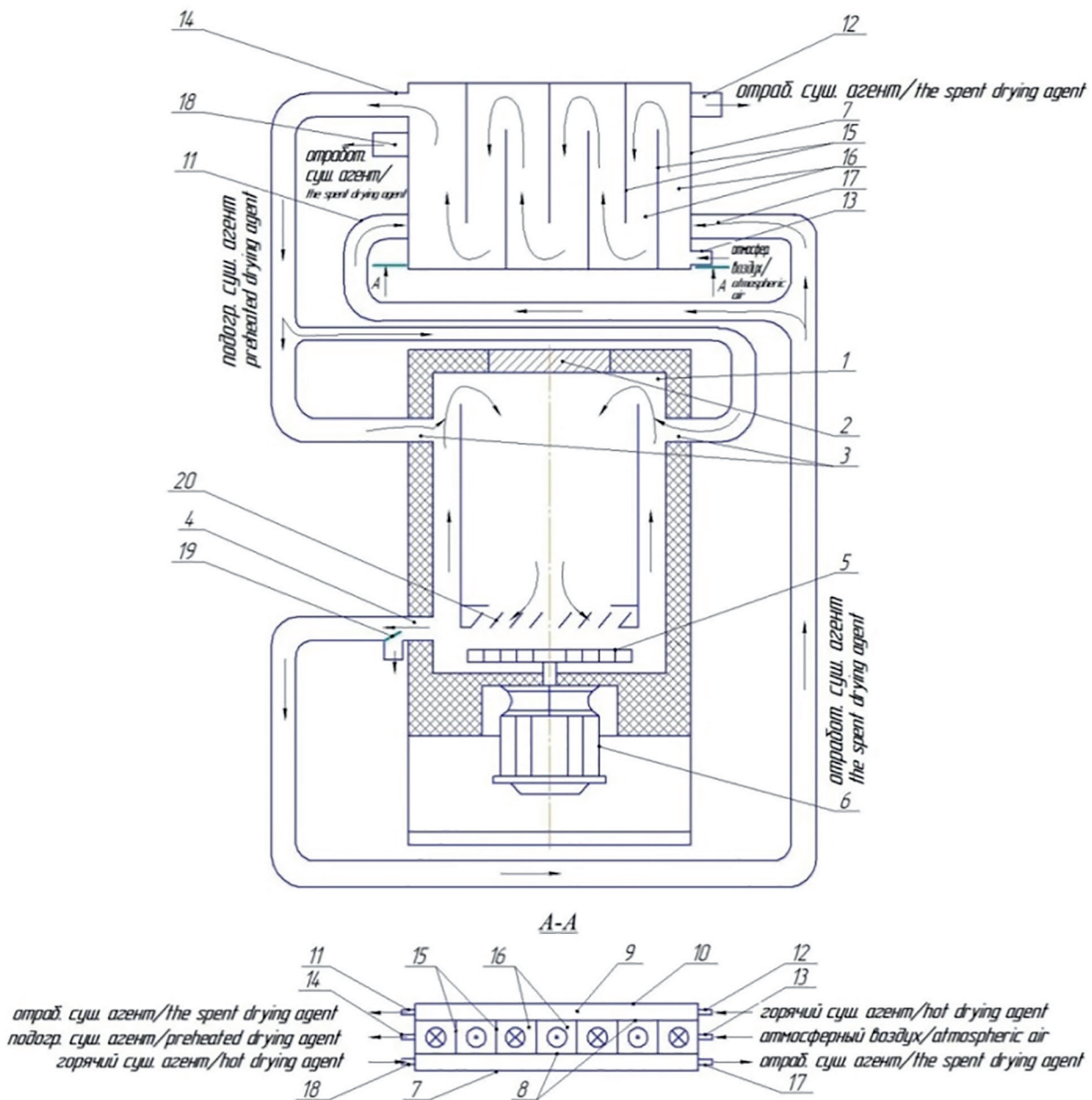


Рис. 1. Схема сушилки с комбинированным теплообменником

Fig. 1. Scheme of the dryer with combined heat exchanger

отработанного сушильного агента через теплообменные поверхности 8.

В сушильной камере перед нагревательным ротором 5 установлены жалюзи 20 для регулировки его производительности. С помощью жалюзи в форме ромашки на патрубке 4 также можно регулировать расход отработанного сушильного агента, направляемого в теплообменник. Отработанный сушильный агент удаляется из комбинированного теплообменника 7 через выходные патрубки 12 и 18. При этом обеспечивается повышение коэффициента регенерации теплоты и использование энергии солнечного из-

лучения для подогрева сушильного агента в начальный период работы сушилки до ее выхода на рабочую температуру в сушильной камере.

Общий вид сушилки с комбинированным теплообменником представлен на рис. 2.

Сушилка имеет следующие технические характеристики: мощность электродвигателя привода нагревательного ротора – 17,5 кВт; частота вращения ротора – 1500 мин<sup>-1</sup>; наружный диаметр ротора – 700 мм; внутренний диаметр ротора – 550 мм; ширина ротора – 150 мм; число лопаток – 20; рабочий объем сушильной камеры – 3,72 м<sup>3</sup>.



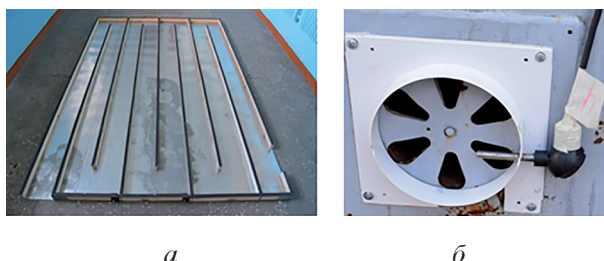
**Рис. 2. Общий вид сушилки с комбинированным теплообменником:**  
а – со стороны верхнего подсоса; б – со стороны нижнего подсоса

*Fig. 2. General view of the dryer with a combined heat exchanger:*  
а – from the side of the upper suction; б – from the side of the lower suction

Крыша сушильной камеры является стенкой нижней камеры комбинированного теплообменника, расположенного сверху сушилки в пределах ее габаритных размеров. Средняя камера теплообменника имеет 8 каналов сечением 220×50 мм (рис. 3).

Масса одной загрузки яблок в сушилку составляет 280 кг; они размещаются на 54 лотках в 3 яруса (рис. 4). Для фиксирования параметров

сушильного агента, окружающей среды, расхода электроэнергии использовали восьмиканальный измеритель-терморегулятор ТРМ-138 с датчиками термосопротивления и 3-фазный счетчик электрической энергии с трансформаторами тока. Периодичность фиксирования показаний измерителя-регулятора составляла 20 мин. При построении графиков для удобства представления информации использовались данные с периодичностью 40 мин.



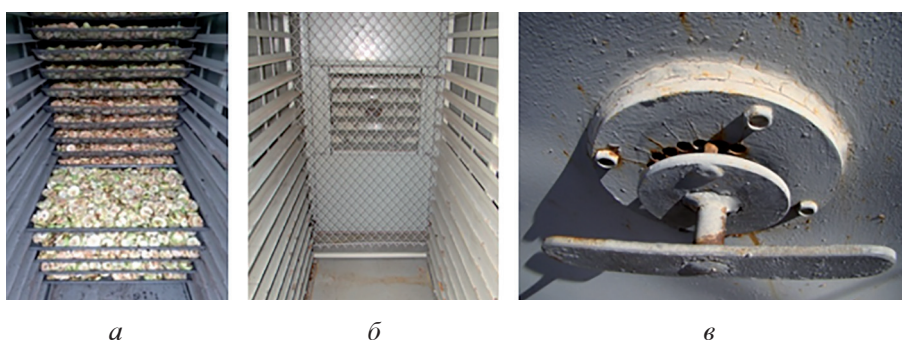
**Рис. 3. Вид средней камеры комбинированного теплообменника (а) и жалюзи в форме ромашки (б)**

*Fig. 3. View of the middle chamber of the combined heat exchanger (a) and daisy-shaped screen (b)*

## Результаты и обсуждение

На рис. 5 представлены результаты изменения температуры сушильного агента при работе сушилки с комбинированным теплообменником.

На рис. 5 линия «ромашка» соответствует температуре отработанного сушильного агента, подаваемого из сушильной камеры в верхнюю и нижнюю камеры комбинированного теплообменника. Линии «верхний подсос» и «нижний подсос» показывают температуру



**Рис. 4. Вид сушильной камеры (а), жалюзи ротора-нагревателя (б), рукоятки изменения величины открытия жалюзи (в)**

*Fig. 4. View of the drying chamber (a), screen of the rotor-heater (b), knobs for changing the magnitude of opening the screen (c)*

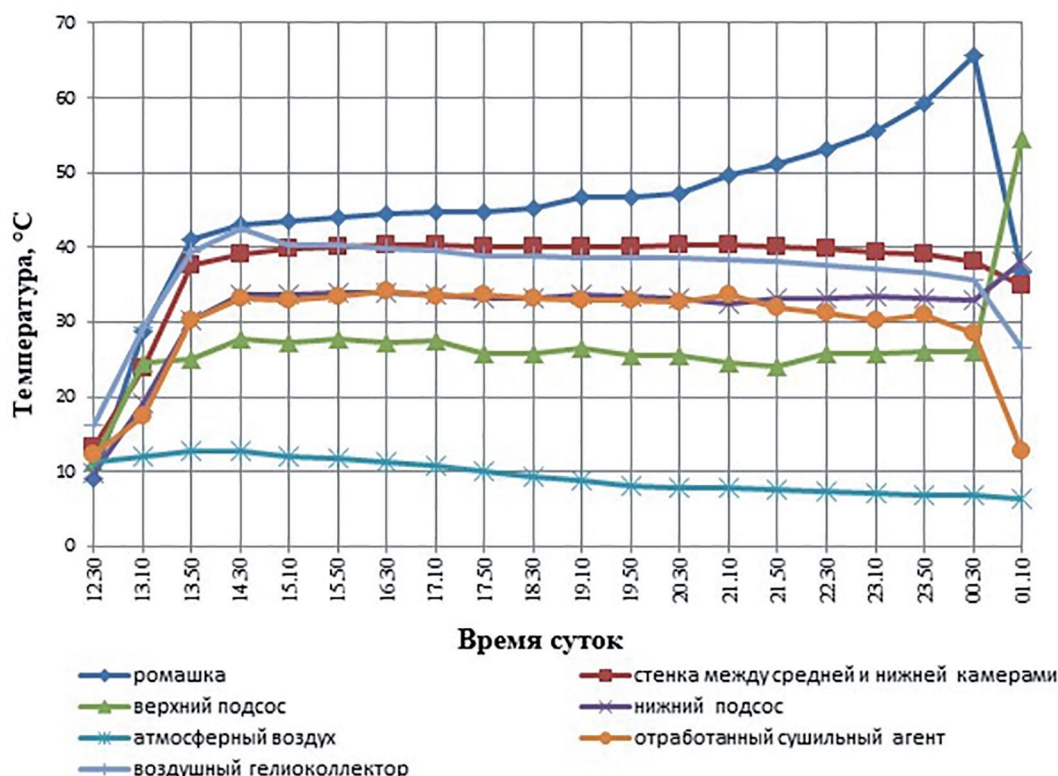


Рис. 5. Изменение температуры сушильного агента при использовании комбинированного теплообменника

Fig. 5. Changing the temperature of the drying agent when using a combined heat exchanger

подогретого в комбинированном теплообменнике сушильного агента, подаваемого в сушильную камеру с двух ее сторон и на разной высоте относительно уровня пола сушильной камеры. Линия «воздушный гелиоколлектор» соответствует температуре воздуха под светопрозрачным покрытием над его теплопринимающей поверхностью. Линия «стенка между средней и нижней камерами» показывает температуру поверхности, разделяющей среднюю и нижнюю камеры теплообменника, со стороны нижней камеры. Линия «отработанный сушильный агент» соответствует температуре отработанного сушильного агента, выходящего из теплообменника в атмосферу.

На рис. 6 представлены результаты изменения температуры сушильного агента при работе сушилки без использования теплообменника.

Анализ рис. 5 и 6 показывает, что продолжительность этапа прогрева сушильной камеры с продуктом в обоих случаях примерно одинакова и составляет 1 ч 20 мин.

На этапе постоянной скорости сушки наблюдается непрерывный небольшой рост температуры в обоих случаях. Однако температуры 50 °C сушилка с теплообменником достигла на 2 часа быстрее – за 8 ч 40 мин.

При этом разница температур подсосываемого сушильного агента составила в среднем 20 °C.

Температура нижней теплообменной поверхности средней камеры оставалась постоянной, в пределах 40 °C, несмотря на рост температуры подаваемого под нее отработанного сушильного агента. Это объясняется понижением температуры атмосферного воздуха, проходившего по каналам средней камеры над этой поверхностью.

Почти такая же температура была и в верхней камере, в воздушном солнечном коллекторе, но несколько ниже. Это объясняется тем, что нижняя камера располагается на крыше сушильной камеры, а светопрозрачное покрытие верхней камеры контактирует с атмосферным воздухом.

Разница температур верхнего и нижнего подсоса составила примерно 8 °C. Температура верхнего подсоса в среднем на 15...18 °C выше температуры атмосферного воздуха и примерно на 12...15 °C ниже температуры теплообменной поверхности средней камеры. Разница температур верхнего и нижнего подсоса объясняется разным положением их датчиков температуры: датчик верхнего подсоса расположен дальше от выходного патрубка

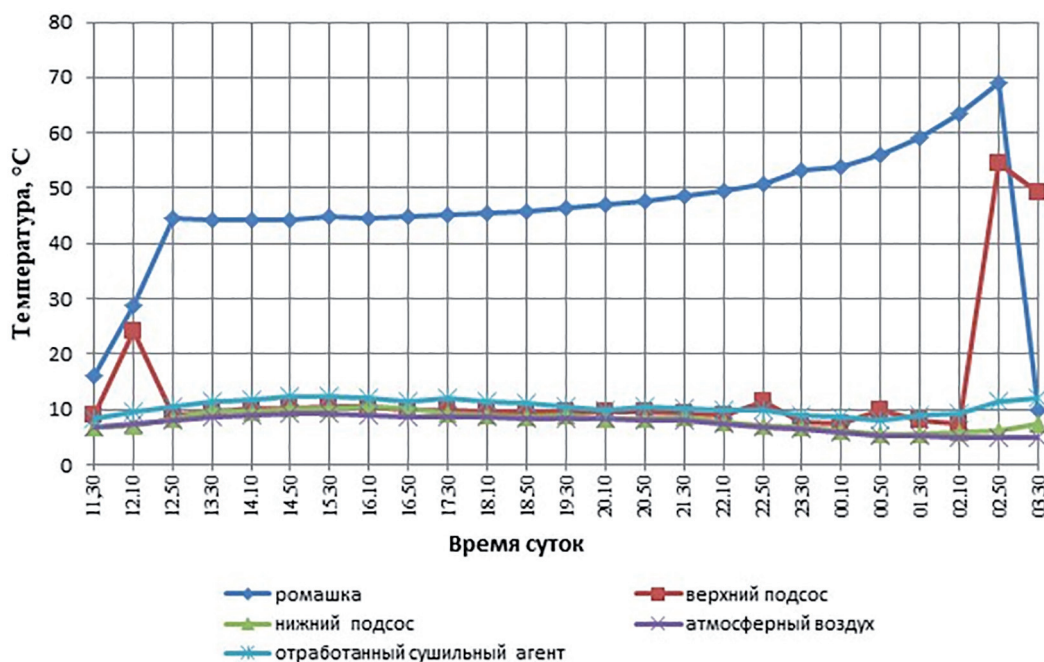


Рис. 6. Изменение температуры сушильного агента без использования комбинированного теплообменника

Fig. 6. Changing the temperature of the drying agent without using a combined heat exchanger

из средней камеры, и сушильный агент в большей степени охлаждается в процессе движения к датчику по воздуховоду. Поэтому важно конструктивно обеспечить теплоизоляцию и наименьшую протяженность воздухопроводов от выходного патрубка средней камеры до входных патрубков верхнего и нижнего подсоса в сушильную камеру.

Температура полностью отработанного сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника практически совпадает с температурой нижнего подсоса, и остается также постоянной в течение всего этапа постоянной скорости сушки.

Далее начинается этап убывающей скорости сушки и, соответственно, роста температуры в сушильной камере.

При использовании комбинированного теплообменника термостат сушилки произвел отключение приводного двигателя нагревательного ротора при температуре в сушильной камере 69,2 °С через 12 ч 40 мин от начала процесса сушки (в 01 ч 10 мин), и готовый продукт был выгружен из сушилки. Расход электроэнергии на сушку составил 223 кВт·ч.

Без использования комбинированного теплообменника термостат сушилки произвел отключение приводного двигателя нагревательного ротора при температуре в сушильной камере 66 °С через 15 ч 00 мин от начала процесса сушки (в 02 ч 30 мин). Далее про-

цесс сушки продолжался за счет естественной конвекции сушильного агента, и через 40 мин в 03 ч 10 мин готовый продукт был выгружен из сушилки. Общая продолжительность сушки составила 15 ч 40 мин. Расход электроэнергии на сушку составил 307 кВт·ч.

Экономия электроэнергии за счет использования комбинированного теплообменника составила 27,4 %.

## Выводы

Результаты исследования показали, что использование комбинированного теплообменника позволило повысить температуру поступающего в сушильную камеру сушильного агента в среднем на 20 °С относительно температуры атмосферного воздуха. При обеспечении теплоизоляции и минимальной протяженности подсосывающих воздухопроводов эта разница потенциально могла составить порядка 25 °С.

Более интенсивный рост температуры сушильного агента при использовании комбинированного теплообменника позволил сократить продолжительность сушки на 3 ч. Расход электроэнергии при этом уменьшился на 27,4 %.

Таким образом, использование комбинированного теплообменника является эффективным способом снижения энергоемкости процесса сушки в сушилках аэродинамического нагрева.

## Литература

1. Тевис П.И., Ананьев В.А., Шадек Е.Г. Рециркуляционные установки аэродинамического нагрева / под общей редакцией Е.Г. Шадека. М.: Машиностроение, 1986. 208 с.
2. Ториков В.Е., Евдокименко С.Н., Сазонов Ф.Ф. Перспективы развития садоводства в Брянской области // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 5 (51). С. 3–8.
3. Белоус Н.М., Евдокименко С.Н. Результаты сотрудничества ученых Брянского ГАУ и Кокинского опорного пункта ВСТИСП по развитию садоводства // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 1 (65). С. 15–22.
4. Купресенко А.И., Исаев Х.М., Коновалова И.И. К определению поверхности теплообмена утилизатора теплоты сушилки // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. Брянск: Изд. Брянского ГАУ, 2016. С. 72–79.
5. Исаев Х.М., Купресенко А.И., Коновалова И.И. Сушилка аэродинамического подогрева // Сельский механизатор. 2016. № 10. С. 5–19.
6. Исаев Х.М., Купресенко А.И., Кулипатова И.И. Сушилка: патент на полезную модель № 161162 Российская Федерация; опубл. 23.03.2016, Бюл. № 10.
7. Купресенко А.И., Исаев Х.М., Кулипатова И.И. Модернизированная сушилка // Вестник Брянской ГСХА. 2015. № 4. С. 49–51.
8. Купресенко А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Сушилка: патент на полезную модель № 192350 Российская Федерация; опубл. 13.09.2019, Бюл. № 26.
9. Исаев С.Х. Сушильная установка аэродинамического подогрева с утилизатором теплоты // Современные аспекты развития АПК: труды Всероссийского совета молодых ученых и специалистов аграрных образовательных и научных учреждений. М.: ФГБНУ «Росинформагротех». 2019. С. 60–64.
10. Исаев Х.М., Купресенко А.И., Исаев С.Х. Плодово-ягодная сушилка с комбинированным теплообменником // Сельский механизатор. 2020. № 1. С. 16–17.
11. Купресенко А.И., Байдаков Е.М., Исаев Х.М. Конструкция зернохранилища со встроенной гелиосушильной системой // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. Брянск: Изд. БГСХА. 2010. С. 3–8.
12. Купресенко А.И., Байдаков Е.М., Исаев Х.М., Ченин А.Н. Зерносушильный комплекс на основе альтернативного источника энергии // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 49–53.
13. va [Recirculating aerodynamic heating units]. Pod obshchey redaktsiyey YE.G. Shadeka. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1986. 208 p.
14. Torikov V.E., Yevdokimenko S.N., Sazonov F.F. Prospects for the development of horticulture in the Bryansk region. Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2015. No 5 (51), pp. 3–8 (In Russ.).
15. Belous N.M., Yevdokimenko S.N. The results of cooperation between scientists from the Bryansk State Agrarian University and the Kokinsky support point of All-Russian Institute of Selection and Technology of Horticulture and Nursery (VSTISP) on the development of horticulture. Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2018. No 1 (65), pp. 15–22 (In Russ.).
16. Kupreyenko A.I., Isayev K.H.M., Konovalova I.I. Determination of the heat exchange surface of the heat exchanger of the dryer. Design, use and reliability of agricultural machinery. Sb. nauch. rabot. Bryansk: Izd. Bryanskogo GAU, 2016, pp. 72–79 (In Russ.).
17. Isayev K.H.M., Kupreyenko A.I., Konovalova I.I. Air-heated dryer. Sel'skiy mekhanizator. 2016. No 10, pp. 5–19 (In Russ.).
18. Isayev K.H.M., Kupreyenko A.I., Kulipatova I.I. Sushilka [Dryer]: patent na poleznuyu model' No 161162 Rossiyskaya Federatsiya; opubl. 23.03.2016, Byul. No 10.
19. Kupreyenko A.I., Isayev K.H.M., Kulipatova I.I. Modernized dryer. Vestnik Bryanskoy GSKHA. 2015. No 4, pp. 49–51 (In Russ.).
20. Kupreyenko A.I., Isayev K.H.M., Isayev S.KH. Sushilka [Dryer]: patent na poleznuyu model' No 192350 Rossiyskaya Federatsiya; opubl. 13.09.2019, Byul. No 26.
21. Isayev S.KH. Drying plant for aerodynamic heating with heat recovery. Sovremennyye aspekty razvitiya APK: trudy Vserossiyskogo soveta molodykh uchenykh i spetsialistov agrarnykh obrazovatel'nykh i nauchnykh uchrezhdeniy. Moscow: FGBNU «RosinformagroteKH». 2019, pp. 60–64 (In Russ.).
22. Isayev K.H.M., Kupreyenko A.I., Isayev S.KH. Fruit and berry dryer with combined heat exchanger. Sel'skiy mekhanizator. 2020. No 1, pp. 16–17 (In Russ.).
23. Kupreyenko A.I., Baydakov YE.M., Isayev K.H.M. The design of granary with built-in solar drying system. Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya: sb. nauch. rabot. Bryansk: Izd. BGSKHA. 2010, pp. 3–8 (In Russ.).
24. Kupreyenko A.I., Baydakov YE.M., Isayev K.H.M., Chenin A.N. Grain drying complex based on an alternative energy source. Trudy GOSNITI. 2015. Vol. 120, pp. 49–53 (In Russ.).

## References

1. Tevis P.I., Anan'yev V.A., Shadek YE.G. Retsirkulyatsionnyye ustanovki aerodinamicheskogo nagre-