

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА /
POWER SUPPLY AND AUTOMATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 633.1:631.563.2

DOI: 10.26897/2687-1149-2020-6-66-73



ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КОМБИНИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА СУШИЛКИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОГРЕВА

КУПРЕЕНКО АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ, д-р техн. наук, доцент

E-mail: kupreenkoai@mail.ru

КОМОГОРЦЕВ ВЛАДИМИР ФИЛИППОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, доцент

ИСАЕВ ХАФИЗ МУБАРИЗ-ОГЛЫ, канд. экон. наук, доцент

E-mail: haf-is@mail.ru

ИСАЕВ САМИР ХАФИЗОВИЧ

E-mail: Samir.isaev.94@inbox.ru

Брянский государственный аграрный университет; 243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, 2А

Одним из перспективных направлений сушки плодово-ягодного сырья является использование сушилок аэродинамического подогрева, реализующих принцип трансформации электрической энергии, расходуемой на привод центробежного вентилятора, в тепловую энергию за счет взаимного трения циркулирующих в замкнутой камере воздушных потоков. Для снижения энергоёмкости процесса сушки предложено утилизировать теплоту отработанного сушильного агента за счёт оснащения сушилки комбинированным теплообменником. Для прогнозирования теплотехнических характеристик комбинированного теплообменника в зависимости от переменных внешних факторов на основании уравнения теплового баланса теоретически определена зависимость температуры сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника от времени работы сушилки. Наличие воздушного солнечного коллектора в составе комбинированного теплообменника позволило в данном случае повысить температуру сушильного агента на выходе из него ещё на 10°C без дополнительных затрат электрической энергии. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований показал их высокую сходимость.

Ключевые слова: уравнение теплового баланса, сушильный агент, комбинированный теплообменник, сушилка аэродинамического подогрева.

Формат цитирования: Купреенко А.И., Комогорцев В.Ф., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Тепловой баланс комбинированного теплообменника сушилки аэродинамического подогрева // Агроинженерия. 2020. № 6 (100). С. 66-73. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-6-66-73.

HEAT BALANCE OF COMBINED HEAT EXCHANGER USED IN AERODYNAMIC HEATING DRYERS

ALEKSEI I. KUPREENKO, DSc (Eng), Associate Professor

E-mail: kupreenkoai@mail.ru

VLADIMIR F. KOMOGORZEV, PhD (Math), Associate Professor

HAFIZ M. ISAEV, PhD (Econ), Associate Professor

E-mail: haf-is@mail.ru

SAMIR KH. ISAEV

E-mail: Samir.isaev.94@inbox.ru

Bryansk State Agrarian University; 243365, Russian Federation, Bryansk region, Vygonichi district, Kokino, Sovetov Str., 2A

One of the promising methods of drying raw fruit and berry materials is the use of aerodynamic heating dryers that transform electric energy spent on a centrifugal fan drive into heat energy due to the mutual friction of air flows circulating in a closed chamber. To reduce the energy intensity of the drying process, the authors propose to utilize the heat of the used drying agent by equipping the dryer with a combined heat exchanger. To predict the thermotechnical characteristics of the combined heat exchanger depending on variable external factors, based on the heat balance equation, the authors determined the theoretical relationship between the drying agent temperature at the outlet of the combined heat exchanger and the dryer operating time. The presence of an air solar collector in the combined heat exchanger allowed increasing the temperature of the drying agent at the outlet by another 10°C without additional electric energy costs. A comparative analysis of the results of experimental and theoretical studies has shown their high convergence.

Key words: heat balance equation, drying agent, combined heat exchanger, aerodynamic heating dryer.

For citation: Kupreenko A.I., Komogorzev V.F., Isaev H.M., Isaev S.Kh. Heat balance of combined heat exchanger used in aerodynamic heating dryers // *Agricultural Engineering*, 2020; 6 (100): 66-73 (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2020-6-66-73.

Введение. Решение проблемы импортозамещения в области производства плодово-ягодного сырья невозможно без обеспечения сельхозпроизводителей гарантированным сбытом произведенной продукции или организации её переработки на местах [1-5].

Дороговизна традиционных энергоресурсов заставляет всё в большей степени использовать альтернативные источники энергии для снижения энергоёмкости и повышения эффективности работы технических средств в сельскохозяйственном производстве [6-11]. Основой таких технических средств, например, для сушки зерна, естественной вентиляции животноводческих помещений, является воздушный гелиоколлектор [12, 13].

Одним из перспективных направлений в снижении энергоёмкости сушки, например, плодово-ягодного сырья, является использование сушилок аэродинамического подогрева, реализующих принцип работы изолированного ротора, то есть ротора без корпуса, центробежного вентилятора в режиме роторного нагрева. В этом случае подавляющая часть подводимой к ротору электрической энергии расходуется на преодоление аэродинамических потерь в проточной части рабочего колеса, в сушильной камере, преобразуясь в тепловую энергию. В этом заключается принцип работы печей аэродинамического подогрева (ПАП, или другое название – печи аэродинамических потерь).

Для снижения энергоёмкости процесса сушки предложено утилизировать теплоту отработанного сушильного агента за счёт оснащения сушилки комбинированным теплообменником [14].

Цель исследований: составление уравнения теплового баланса сушилки аэродинамического подогрева с комбинированным теплообменником с целью определения на его основе температуры сушильного агента на выходе из теплообменника.

Материал и методы. Принцип работы сушилки периодического действия с комбинированным теплообменником, отраженный на рисунке 1, проявляется следующим образом.

Сырье загружают в теплоизолированную камеру 1 через дверь 2. В начале сушки на этапе разогрева сушилки заслонки 19 находятся 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 теплоизолированной камеры 1. Контактная с высушиваемым сырьём, сушильный агент насыщается удаляемой влагой, а через выходные патрубки 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, заслонки 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 отработанного сушильного агента через теплообменные поверхности 8. Отработанный сушильный агент удаляется из комбинированного теплообменника 7 через выходные патрубки 12 и 18. При этом обеспечиваются повышение коэффициента регенерации теплоты и использование энергии солнечного излучения для подогрева сушильного агента в начальный период работы сушилки до её выхода на рабочую температуру в теплоизолированной камере.

При средней скорости воздушного потока на входе в теплообменник порядка 6,5 м/с динамическое давление составляет около 25 Па. В сравнении с полным давлением центробежных вентиляторов подобного типа в пределах 1500...2000 Па дополнительное гидравлическое сопротивление теплообменника пренебрежительно мало относительно гидравлических сопротивлений в проточной части нагревательного ротора и сушильной камеры, являющихся в данном случае полезными.

Для прогнозирования теплотехнических характеристик комбинированного теплообменника в зависимости от переменных внешних факторов необходимо знать зависимость температуры сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника от времени работы сушилки. Такая зависимость связывает параметры переменных внешних факторов с конструктивно-технологическими параметрами комбинированного теплообменника, что позволяет провести моделирование его выходных параметров в зависимости от различных внешних условий и теплового режима в сушильной камере.

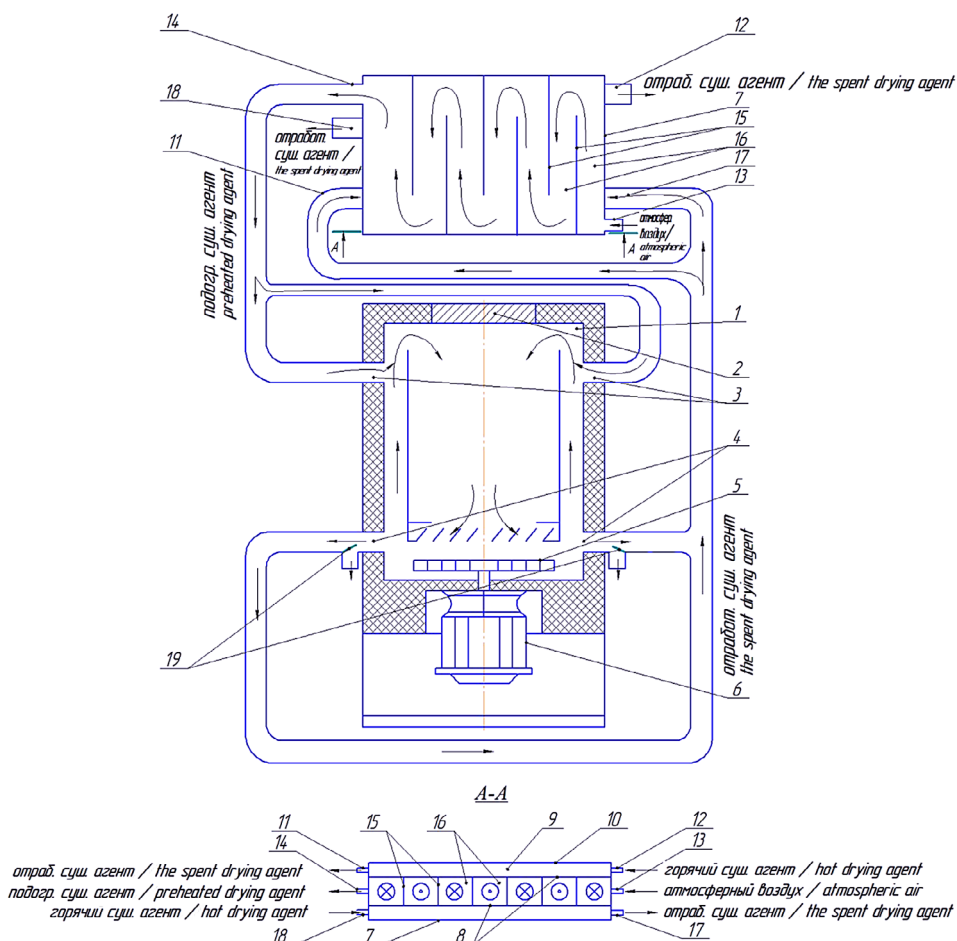


Рис. 1. Схема сушилки с комбинированным теплообменником:

- 1 – теплоизолированная камера; 2 – дверь; 3 – патрубки для подсоса сушильного агента;
- 4 – патрубки для выброса сушильного агента; 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

Fig. 1. Diagram of a dryer with a combined heat exchanger:

- 1 – a heat-insulated chamber; 2 – a door; 3 – pipes for drying agent suction; 4 – pipes for drying agent discharge;
- 5 – a heating rotor of a centrifugal fan; 6 – an electric drive motor; 7 – a combined heat exchanger; 8 – heat exchange surfaces;
- 9 – an air solar collector; 10 – translucent coating; 11 – a pipe conducting the spent drying agent into the upper chamber;
- 12 – a pipe releasing the spent drying agent from the upper chamber; 13 – an inlet pipe of the middle chamber;
- 14 – a output branch pipe of the middle chamber; 15 – partitions; 16 – channels for the passage of heated atmospheric air;
- 17 – branch pipe for entering the exhaust drying agent into the lower chamber;
- 18 – a branch pipe for releasing the exhaust drying agent from the lower chamber; 19 – a flap

Эффективная работа солнечного коллектора комбинированного теплообменника обеспечивается днем в период с 8 до 18 часов. Для этого периода составим уравнение теплового баланса.

Уравнение теплового баланса комбинированного теплообменника за бесконечно малый промежуток времени dt :

$$dQ_{a,b} + dQ_{c,3} + dQ_{o,a} = dQ_{c,a} + dQ_{ст.а} + dQ_b + dQ_n, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где $dQ_{a,6}$ – количество теплоты, поступившей в комбинированный теплообменник с атмосферным воздухом; $dQ_{c,3}$ – количество теплоты, поступившей с солнечной энергией

и поглощенной тепловоспринимающей поверхностью; $dQ_{o,a}$ – количество теплоты, поступившей в комбинированный теплообменник с отработанным сушильным агентом; $dQ_{c,a}$ – количество теплоты, отведенной сушильным агентом (подогретым атмосферным воздухом) после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями; $dQ_{ст.а}$ – количество теплоты для нагрева стенок комбинированного теплообменника; dQ_b – количество теплоты, отведенной в атмосферу отработанным сушильным агентом после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями; dQ_n – потери теплоты в окружающую среду через ограждения комбинированного теплообменника.

Определим выражения составляющих теплового баланса.

Количество теплоты, поступившей в комбинированный теплообменник с атмосферным воздухом, –

$$dQ_{a,b} = L_0 i_0(t) dt, \quad (2)$$

где L_0 – расход атмосферного воздуха, кг/с; $i_0(t)$ – энтальпия атмосферного воздуха в зависимости от времени в период сушки, Дж/кг.

Количество теплоты, поступившей с солнечной энергией и поглощенной тепловоспринимающей поверхностью, –

$$dQ_{c,s} = q_{c,s}(t) F_{т.п} \varepsilon dt, \quad (3)$$

где $q_{c,s}(t)$ – плотность потока солнечной энергии в зависимости от времени в период сушки, Вт/м²; $F_{т.п}$ – площадь тепловоспринимающей поверхности, м²; ε – степень черноты поверхности.

Количество теплоты, поступившей в комбинированный теплообменник с отработанным сушильным агентом, $dQ_{o,a}$, –

$$dQ_{o,a} = L_0 i_2(t) dt, \quad (2)$$

где $i_2(t)$ – энтальпия отработанного сушильного агента в зависимости от времени в период сушки, Дж/кг.

Количество теплоты, отведенной сушильным агентом после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями, –

$$dQ_{c,a} = L_0 i_1(t) dt, \quad (4)$$

где $i_1(t)$ – энтальпия сушильного агента в зависимости от времени в период сушки, Дж/кг.

Количество теплоты для нагрыва стенок комбинированного теплообменника, –

$$dQ_{ст.а} = M_{ст.а} C_{ст.а} dT_{ст.а}, \quad (5)$$

где $M_{ст.а}$ – масса стенок комбинированного теплообменника, кг; $C_{ст.а}$ – теплоёмкость материала стенок комбинированного теплообменника, кДж/(кг·К); $dT_{ст.а}$ – приращение температуры стенок комбинированного теплообменника, К.

Количество теплоты, отведенной в атмосферу отработанным сушильным агентом после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями, –

$$dQ_b = L_0 i_3(t) dt, \quad (6)$$

где i_3 – энтальпия отработанного сушильного агента после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями в зависимости от времени в период сушки, Дж/кг.

Потери теплоты в окружающую среду:

$$dQ_i = kF(T_{ст.а}(t) - T_{o,c}(t)) dt, \quad (7)$$

где k – коэффициент теплопередачи через ограждения комбинированного теплообменника, Вт/(м²·К); F – площадь ограждений комбинированного теплообменника, м²; $T_{ст.а}(t)$ – температура стенок комбинированного теплообменника в зависимости от времени в период сушки, К; $T_{o,c}(t)$ – температура окружающей среды в зависимости от времени в период сушки, К.

Подставив полученные выражения (2-7) в уравнение (1), получим:

$$L_0 i_0(t) dt + q_{c,s}(t) F_{т.п} \varepsilon dt + L_0 i_2(t) dt = L_0 i_1(t) dt + M_{ст.а} C_{ст.а} dT_{ст.а} + L_0 i_3(t) dt + kF(T_{ст.а}(t) - T_{o,c}(t)) dt. \quad (8)$$

После преобразований уравнения (8) получим:

$$(L_0(i_0(t) + i_2(t) - i_1(t) - i_3(t)) + q_{c,s}(t) F_{т.п} \varepsilon + kFT_{o,c}(t)) dt - kFT_{ст.а}(t) dt = M_{ст.а} C_{ст.а} dT_{ст.а}. \quad (9)$$

Примем, что температура стенок комбинированного теплообменника находится в прямой зависимости от температуры отработанного сушильного агента, то есть

$$T_{ст.а} = a T_2 + b_a,$$

где a , b_a – коэффициенты пропорциональности; T_2 – температура отработанного сушильного агента на входе в комбинированный теплообменник, поддерживаемая терморегулятором, К.

С учетом того, что $dT_{ст.а} = d(a T_2 + b_a) = 0$, уравнение (9) будет иметь вид:

$$(L_0(i_0(t) + i_2(t) - i_1(t) - i_3(t)) + q_{c,s}(t) F_{т.п} \varepsilon + kFT_{o,c}(t)) dt - kF(a T_2 + b_a) dt = 0. \quad (10)$$

Для функций $i_0(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$, $q_{c,s}(t)$, $T_{o,c}(t)$ и $T_2(t)$ известно, что

$$i_0(t) = C_{c,b} T_{o,c}(t) + 0,001 x_n (r_0 + C_n T_{o,c}(t)); \quad (11)$$

$$i_1(t) = C_{c,b} T_1(t) + 0,001 x_n (r_0 + C_n T_1(t)); \quad (12)$$

$$i_2(t) = C_{c,b} T_2 + 0,001 x_k (r_0 + C_n T_2); \quad (13)$$

$$i_3(t) = C_{c,b} T_3(t) + 0,001 x_k (r_0 + C_n T_3(t)), \quad (14)$$

где $C_{c,b}$ – теплоёмкость сухого воздуха, кДж/(кг·К); x_n , x_k – соответственно начальное и конечное влагосодержание сушильного агента, г/кг; r_0 – удельная теплота парообразования при температуре 0°C; C_n – теплоёмкость пара, кДж/(кг·К); T_1 – температура сушильного агента на входе в сушилку, К; T_3 – температура отработанного сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника, К.

Известно, что температура атмосферного воздуха пропорциональна плотности потока солнечной энергии [15]:

$$T_{o,c}(t) = a_0 q_{c,s}(t) + b_0, \quad (15)$$

где a_0 , b_0 – эмпирические коэффициенты;

$$q_{c,s}(t) = a_{c,s} t^2 + b_{c,s} t + c_{c,s}, \quad (16)$$

где $a_{c,s}$, $b_{c,s}$, $c_{c,s}$ – эмпирические коэффициенты.

Примем температуру отработанного сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника пропорциональной средней температуре между температурой подогретого сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника и температурой отработанного сушильного агента на входе в него:

$$T_3(t) = a_3 ((T_1(t) + T_2) / 2) + b_3, \quad (17)$$

где a_3 , b_3 – эмпирические коэффициенты.

Тогда с учетом выражений (11-17) уравнение (10) будет иметь вид:

$$T_1(t) = K_{10}t^2 + K_{11}t + K_{12}, \quad (18)$$

где $K_0 = 0,5a_3T_2 + b_3$; $K_1 = C_{c,b} + 0,001x_n C_n$;
 $K_2 = L_0T_2(c_{c,b} + 0,001C_n x_k) + c_{c,3} \varepsilon F_{m,n} + kF(a_0c_{c,3} + b_0 - a_a T_2 - b_a)$;
 $K_3 = a_{c,3}(\varepsilon F_{т.п} + kFa_0)$; $K_4 = b_{c,3}(\varepsilon F_{m,n} + kFa_0)$;
 $K_5 = L_0(K_1b_0 - 0,001C_n x_k K_0 - c_{c,b}K_0) + K_2$;
 $K_6 = L_0K_1a_0a_{c,3} + K_3$;
 $K_7 = L_0K_1a_0b_{c,3} + K_4$; $K_8 = L_0K_1a_0c_{c,3} + K_5$;
 $K_9 = L_0(K_1 + 0,5c_{c,b}a_3 + 0,0005C_n x_k a_3)$;
 $K_{10} = K_6 / K_9$; $K_{11} = K_7 / K_9$; $K_{12} = K_8 / K_9$.

Использование зависимости (18) применимо при времени суток $t \in [8-18]$ ч.

Результаты и обсуждение. Полученное выражение (18) зависимости температуры сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника от времени его работы в условиях переменных внешних факторов позволяет моделировать выходные теплотехнические характеристики сушилки аэродинамического подогрева с утилизатором теплоты в виде комбинированного с гелиоколлектором теплообменника.

На рисунке 2 представлены результаты экспериментального определения температуры сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника $T_1(t)$ и теоретическая зависимость данной температуры, полученная на основании выражения (18).

Эксперимент по сушке яблок был проведен в Брянском государственном аграрном университете 14 сентября 2020 г. Общий вид сушилки с комбинированным теплообменником представлен на рисунке 3.

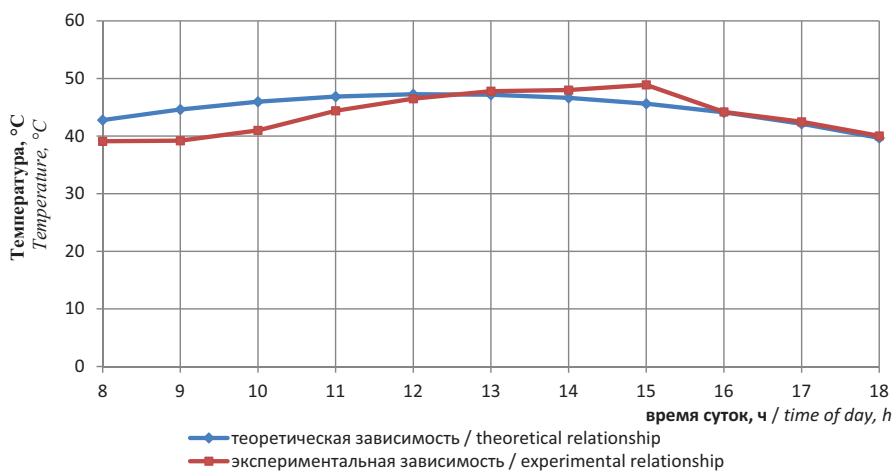


Рис. 2. Изменение температуры сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника
Fig.2. Changing the temperature of the drying agent at the outlet of the combined heat exchanger



Рис. 3. Общий вид сушилки с комбинированным теплообменником
Fig.3. General view of the dryer with a combined heat exchanger

Во время проведения эксперимента погода была солнечной, облачность отсутствовала. При математическом моделировании облачность можно учитывать корректировкой значения плотности потока солнечной энергии, подставляя соответствующие коэффициенты в уравнение (16). Используемые в расчетах конкретные значения коэффициентов определены по усредненным данным обработки замеров плотности потока солнечной энергии

в течение трех дней, предшествовавших эксперименту. При этом зависимость (16) представлена в виде:

$$q_{c,3}(t) = -6,3571t^2 + 157,02t - 510,57.$$

Исследуемая сушилка имеет следующие технические характеристики: мощность электродвигателя привода нагревательного ротора – 17,5 кВт; частота вращения ротора – 1500 мин⁻¹; наружный диаметр ротора – 700 мм;

внутренний диаметр ротора – 550 мм; ширина ротора – 150 мм; число лопаток – 20; рабочий объём сушильной камеры – 3,72 м³; масса загружаемого сырья – 280 кг; выход готового продукта – 13%; регулируемый диапазон температуры в сушильной камере в процессе сушки – от 40 до 80°С; расход электроэнергии – 1 кВт·ч/кг испаренной влаги. В сушильной камере перед нагревательным ротором установлены жалюзи для регулировки его производительности. С помощью жалюзи в форме ромашки на боковой стенке сушилки напротив ротора также можно регулировать расход отработанного сушильного агента, направляемого в теплообменник.

Крыша сушильной камеры является стенкой нижней камеры комбинированного теплообменника, расположенного сверху сушилки в пределах ее габаритных размеров. Ее площадь и площадь верхнего ограждения комбинированного теплообменника, являющегося светопрозрачным покрытием воздушного гелиоколлектора, при расчете теплопотерь не учитывались. Средняя камера теплообменника имеет 8 каналов сечением 220 × 50 мм (рис. 4).



Рис. 4. Вид средней камеры комбинированного теплообменника

Fig. 4. View of the middle chamber of the combined heat exchanger

В расчете использовались следующие значения параметров: расход атмосферного воздуха $L_0 = 0,3$ кг/с; площадь тепловоспринимающей поверхности комбинированного теплообменника $F_{mn} = 2,6$ м²; степень черноты поверхности $\varepsilon = 0,95$; коэффициент теплопередачи

через ограждения комбинированного теплообменника $k = 1,8$ Вт/(м²·К); площадь ограждений комбинированного теплообменника $F = 0,9$ м²; коэффициенты пропорциональности $a_a = 2,423$, $b_a = -62,0976$; средняя температура отработанного сушильного агента на входе в комбинированный теплообменник, поддерживаемая терморегулятором, $T_2 = 60$ °С; теплоёмкость сухого воздуха $C_{с.в} = 1006$ кДж/(кг·К); начальное и конечное влагосодержание сушильного агента x_n, x_k – соответственно 0,009 и 0,024 г/кг; теплоёмкость пара $C_n = 2040$ кДж/(кг·К); эмпирические коэффициенты $a_0 = 0,049$, $b_0 = 15,84$; эмпирические коэффициенты $a_3 = 1,4532$, $b_3 = -19,707$.

В соответствии с полученным уравнением теплового баланса в эксперименте отработанный сушильный агент сразу подавался в комбинированный теплообменник без выделения этапа его прогрева до температуры сушильного агента, поступающего из теплообменника. Выделение данного этапа является целесообразным при невысоких температурах атмосферного воздуха (примерно до 15°С). В этом случае его продолжительность составляет около получаса. При более высоких температурах продолжительность этапа прогрева составляет около 10 мин при общем времени сушки порядка 13 ч.

Анализ рисунка 2 показывает высокую сходимость результатов экспериментальных и теоретических исследований. Наличие воздушного солнечного коллектора в составе комбинированного теплообменника позволило в данном случае повысить температуру сушильного агента на выходе из него ещё на 10°С без дополнительных затрат электрической энергии.

Выводы

1. Использование комбинированных теплообменников в сельскохозяйственных сушильных установках позволит снизить энергоёмкость процессов сушки для сушилок не только аэродинамического подогрева, но и других типов, использующих активные побудители движения сушильного агента.

2. Полученная зависимость (18) позволяет прогнозировать температуру сушильного агента с учетом параметров окружающей среды и комбинированного теплообменника сушилки аэродинамического подогрева.

Библиографический список

1. Егорова Е.Ю. Комплексная переработка плодово-ягодного сырья: методические подходы // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 5. С. 12-15.
2. Киселева Т.Ф., Ушакова А.С., Газиева А.Ф. Комплексная переработка сушёного плодово-ягодного сырья // Техника и технология пищевых производств. 2015. № 3 (38). С. 30-34.
3. 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.
4. 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.

References

1. Egorova E.Yu. Kompleksnaya pererabotka plodovo-yagodnogo syr'ya: metodicheskie podkhody [Complex processing of fruit and berry raw materials: methodological approaches]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*, 2012; 5: 12-15. (In Rus.)
2. Kiseleva T.F., Ushakova A.S., Gazieva A.F. Kompleksnaya pererabotka sushonogo plodovo-yagodnogo syr'ya [Complex processing of dried fruit and berry raw materials]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*, 2015; 3 (38): 30-34. (In Rus.)
3. Torikov V.E., Evdokimenko S.N., Sazonov F.F. Perspektivy razvitiya sadovodstva v Bryanskoy oblasti [Prospects for the development of horticulture in the Bryansk region]. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2015; 5 (51): 3-8. (In Rus.)

5. Казаков И.В. Ягодные культуры в Центральном регионе России / И.В. Казаков, С.Д. Айтжанова, С.Н. Евдокименко и др. Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2009. 208 с.
6. Исаев С.Х. Сушильная установка аэродинамического подогрева с утилизатором теплоты // Труды Всероссийского совета молодых учёных и специалистов аграрных образовательных и научных учреждений «Современные аспекты развития АПК». М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. С. 60-64.
7. Исаев Х.М., Купреенко А.И., Исаев С.Х. Плодово-ягодная сушилка с комбинированным теплообменником // Сельский механизатор. 2020. № 1. С. 16-17.
8. Грибова Н.А., Божикина А.А. Переработка и хранение плодово-ягодного сырья с помощью физических методов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инструменты и механизмы современного инновационного развития» (5 марта 2018 г., г. Казань). В 2 ч. Ч. 2. Уфа, 2018. С. 24-27.
9. Еловских А.А., Дьякова А.А. Рациональная переработка вторичных ресурсов плодово-ягодного сырья Алтайского края с целью получения пищевых волокон // Сборник материалов VIII Региональной конференции студентов младших курсов «Проблемы, перспективы биотехнологии и биологических исследований». 2018. С. 138-140.
10. Емельянов А.А. Ресурсосберегающая переработка плодово-ягодного сырья // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии – основа модернизации отраслей производства и переработки сельскохозяйственной продукции» / Волгоградский государственный технический университет; ГНУ Поволжский НИИ производства и переработки мясомолочной продукции. 2011. С. 304-313.
11. Емельянов А.А. Ресурсосберегающая переработка плодово-ягодного сырья при пониженных температурах // Пищевая промышленность. 2009. № 7. С. 28-29.
12. Купреенко А.И., Байдаков Е.М., Исаев Х.М. Конструкция зернохранилища со встроенной гелиосушильной системой // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: Сборник научных работ. Брянск: Изд-во БГСХА, 2010. С. 3-8.
13. Купреенко А.И., Байдаков Е.М., Исаев Х.М. и др. Зерносушильный комплекс на основе альтернативного источника энергии // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 49-53.
14. Сушилка: Патент на полезную модель 192350 РФ, МКИ F26B9/06; F26B3/28, F26B21/04, № 2019103013 / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.Х. Исаев; заяв. 04.02.19; опубл. 13.09.19; Бюл. № 26.
15. Байдаков Е.М. Разработка барабанной гелиосушилки зерна и обоснование её конструктивно-технологических параметров: дис. ... канд. техн. наук. М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2012. 177 с.
4. Belous N.M., Evdokimenko S.N. Rezul'taty sotrudnichestva uchenykh Bryanskogo GAU i Kokinskogo опорного пункта VSTISP po razvitiyu sadovodstva [Results of cooperation between scientists from the Bryansk State Agrarian University and the Kokino support point of VSTISP on the development of gardening]. *Vestnik Bryanskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyaystvennoj akademii*, 2018; 1 (65): 15-22. (In Rus.)
5. Kazakov I.V., Aytzhanova S.D., Evdokimenko S.N. et al. Yagodnye kul'tury v tsentral'nom regione Rossii [Berry crops in the central region of Russia]. Bryansk, Izdatel'stvo Bryanskoj GSKHA, 2009: 208. (In Rus.)
6. Isaev S.Kh. Sushil'naya ustanovka aerodinamicheskogo podogreva s utilizatorom teploty [Drying plant based on aerodynamic heating with heat recovery]. *Sovremennyye aspekty razvitiya APK: trudy Vserossiyskogo soveta molodykh uchonykh i spetsialistov agrarnykh obrazovatel'nykh i nauchnykh uchrezhdeniy*. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2019: 60-64. (In Rus.)
7. Isaev Kh.M., Kupreenko A.I., Isaev S.Kh. Plodovo-yagodnaya sushilka s kombinirovannym teploobmennikom [Fruit and berry dryer with a combined heat exchanger]. *Sel'skiy mekhanizator*, 2020; 1: 16-17. (In Rus.)
8. Gribova N.A., Bozhilkina A.A. Pererabotka i khraneniya plodovo-yagodnogo syr'ya s pomoshch'yu fizicheskikh metodov [Processing and storage of fruit and berry raw materials using physical methods]. *Sb. materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Instrumenty i mekhanizmy sovremennogo innovatsionnogo razvitiya"*, 2018: 24-27. (In Rus.)
9. Elovskikh A.A., D'yakova, A.A. Ratsional'naya pererabotka vtorichnykh resursov plodovo-yagodnogo syr'ya altayskogo kraja s tsel'yu polucheniya pishchevykh volokon [Rational processing of secondary resources of fruit and berry raw materials of the Altai Territory for the purpose of obtaining food fibers]. *Sb. materialov VIII Regional'noy konferentsii studentov mladshikh kursov "Problemy, perspektivy biotekhnologii i biologicheskikh issledovaniy"*, 2018: 138-140. (In Rus.)
10. Emel'yanov A.A. Resursosberegayushchaya pererabotka plodovo-yagodnogo syr'ya [Resource-saving processing of fruit and berry raw materials]. *Sb. materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii – osnova modernizatsii otrasley proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaystvennoj produktsii"*. Volgogradskiy gosudarstvenniy tekhnicheskij universitet, GNU Povolzhskiy NII proizvodstva i pererabotki myasomolochnoy produktsii, 2011: 304-313. (In Rus.)
11. Emel'yanov A.A. Resursosberegayushchaya pererabotka plodovo-yagodnogo syr'ya pri ponizhennykh temperaturakh [Resource-saving processing of fruit and berry raw materials at low temperatures]. *Pishhevaya promyshlennost'*, 2009; 7: 28-29. (In Rus.)
12. Kupreenko A.I., Baydakov E.M., Isaev Kh.M. Konstruktsiya zernokhranilishcha so vstroennoy geliosushil'noy sistemoy [Design of a granary with a built-in solar drying system]. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya: Sb. nauch. Rabot*. Bryansk, Izd. BGSKHA, 2010: 3-8. (In Rus.)
13. Kupreenko A.I., Baydakov E.M., Isaev Kh.M. et al. Zernosushil'niy kompleks na osnove al'ternativnogo

istochnika energii [Grain drying facilities based on an alternative energy source]. *Trudy GOSNITI*, 2015; 120: 49-53. (In Rus.)

14. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Isaev S.Kh. Sushilka [Dryer]: Patent for utility model 192350 RF, MKI F26B9/06; F26B3/28, F26B21/04. No. 2019103013, 2019. (In Rus.)

15. Baydakov E.M. Razrabotka barabannoy geliosushilki zerna i obosnovanie eyo konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov [Designing a drum solar dryer for grain with the determination of its design and technological parameters]: PhD (Eng) thesis: 05.20.01. Moscow, GNU VIM Rossel'khozakademii, 2012: 177. (In Rus.)

Критерии авторства

Купреенко А.И., Комогорцев В.Ф., Исаев Х.М., Исаев С.Х. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Купреенко А.И., Комогорцев В.Ф., Исаев Х.М., Исаев С.Х. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 19.09.2020 г.

Опубликована 25.12.2020

Contribution

A.I. Kupreenko, V.F. Komogorzev, H.M. Isaev, S.Kh. Isaev performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. A.I. Kupreenko, V.F. Komogorzev, H.M. Isaev, S.Kh. Isaev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on September 19, 2020

Published 25.12.2020