

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632168>

EDN: OKORHC



Влияние коэффициента рециркуляции сушильного агента на его температуру в сушилке аэродинамического нагрева

В.Н. Ожерельев, А.И. Купреенко, Д.А. Безик, Х.М. Исаев, О.А. Купреенко

Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Расширение функциональных возможностей камерных сушилок аэродинамического нагрева возможно за счет оснащения их дополнительными модулями, например, в виде сушильной шахты для зерна. Однако, при этом необходимо обеспечить реализацию основного принципа работы сушилок аэродинамического нагрева — рециркуляцию сушильного агента с частичным его сбросом в процессе сушки.

Цель работы — определение зависимости температуры сушильного агента от коэффициента рециркуляции отработанного сушильного агента при использовании дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна.

Методы. Из уравнения теплового баланса сушилки за бесконечно малый промежуток времени получено дифференциальное уравнение, в результате решения которого методом Эйлера второго порядка найдена искомая зависимость. Построены графики изменения температуры сушильного агента в процессе сушки зерна для принятых исходных данных при значении коэффициента рециркуляции равном 0,3, 0,5, 0,7 и влагосодержании отработанного сушильного агента равном 0,012 и 0,041 кг/кг с.в.

Результаты. Анализ зависимостей показал, что температура сушильного агента растёт с увеличением коэффициента рециркуляции и влагосодержания сушильного агента. Максимально возможная температура сушильного агента для коэффициента рециркуляции, равного 0,3 составит 135 °С, для коэффициента рециркуляции, равного 0,5—158 °С, для коэффициента рециркуляции, равного 0,7—198 °С. Поддержание заданной температуры сушильного агента обеспечивается регулировкой коэффициента рециркуляции отработанного сушильного агента за счёт изменения его расхода в канале рециркуляции.

Заключение. Полученная на основании теплового баланса сушилки зависимость позволяет прогнозировать температуру сушильного агента в зависимости от установленного коэффициента рециркуляции отработанного сушильного агента при заданном диапазоне изменения его влагосодержания. При этом обеспечивается рабочий режим работы сушилки аэродинамического нагрева и при использовании её дополнительных модулей.

Ключевые слова: аэродинамический нагрев; сушильный агент; коэффициент рециркуляции; тепловой баланс; сушка зерна.

Как цитировать:

Ожерельев В.Н., Купреенко А.И., Безик Д.А., Исаев Х.М., Купреенко О.А. Влияние коэффициента рециркуляции сушильного агента на его температуру в сушилке аэродинамического нагрева // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 1. С. 99–106. DOI: 10.17816/0321-4443-632168 EDN: OKORHC

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-632168>

EDN: OKORHC

The effect of the recirculation coefficient of the drying agent on its temperature in the aerodynamic heating dryer

Viktor N. Ozherelyev, Aleksey I. Kupreenko, Dmitry A. Bezik, Khafiz M. Isaev, Oleg A. Kupreenko

Bryansk State Agrarian University, Bryansk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The expansion of the functionality of chamber dryers of aerodynamic heating is possible by equipping them with additional modules, for example, in the form of a drying shaft for grain. However, it is necessary to ensure the implementation of the basic principle of operation of aerodynamic heating dryers – recirculation of the drying agent with its partial discharge during the drying process.

AIM: Determination of the dependence of the temperature of the drying agent on the recirculation coefficient of the spent drying agent when using an additional module in the form of a drying shaft for grain.

MATERIALS AND METHODS: A differential equation was obtained from the heat balance equation of the dryer in an infinitesimal period of time, as a result of solving which the desired dependence was found by the second-order Euler method. Graphs of the temperature change of the drying agent during the grain drying process are constructed for the accepted initial data with a value of the recirculation coefficient equal to 0.3, 0.5, 0.7 and the moisture content of the spent drying agent equal to 0.012 and 0.041 kg/kg d.a.

RESULTS: The analysis of the dependencies showed that the temperature of the drying agent increases with an increase in the recirculation coefficient and moisture content of the drying agent. The maximum possible temperature of the drying agent for a recirculation coefficient equal to 0.3 will be 135 °C, for a recirculation coefficient equal to 0.5–158 °C, for a recirculation coefficient equal to 0.7–198 °C. Maintaining the set temperature of the drying agent is ensured by adjusting the recirculation coefficient of the spent drying agent by changing its flow rate in the recirculation channel.

CONCLUSION: The dependence obtained on the basis of the heat balance of the dryer makes it possible to predict the temperature of the drying agent depending on the established recirculation coefficient of the spent drying agent at a given range of changes in its moisture content. At the same time, the operating mode of the aerodynamic heating dryer is ensured even when using its additional modules.

Keywords: aerodynamic heating; drying agent; recirculation coefficient; thermal balance; grain drying.

To cite this article:

Ozherelyev VN, Kupreenko AI, Bezik DA, Isaev KhM, Kupreenko OA. The effect of the recirculation coefficient of the drying agent on its temperature in the aerodynamic heating dryer. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(1):99–106. DOI: 10.17816/0321-4443-632168 EDN: OKORHC

Received: 17.05.2024

Accepted: 09.03.2025

Published online: 17.03.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Технология аэродинамического нагрева в сельском и лесном хозяйстве реализуется в камерных сушилках, предназначенных для сушки пиломатериалов [1–3], орехов [4], плодово-ягодного сырья и др. [5].

Для снижения расхода электроэнергии плодово-ягодной сушилки она оснащена комбинированным теплообменником, утилизирующим часть теплоты отработанного сушильного агента [6].

Для расширения функциональных возможностей и увеличения годовой загрузки таких сушилок предложено оснащать их дополнительными модулями в виде, например, сушильной шахты для сушки зерна (рис. 1) [7].

При этом установлено, что при использовании дополнительных модулей также, как и в режиме камерной сушки необходимо обеспечить рециркуляцию

отработанного сушильного агента для обеспечения его заданной температуры.

ЦЕЛЬ

Цель работы — установление зависимости температуры сушильного агента в сушилке аэродинамического нагрева от коэффициента рециркуляции отработанного сушильного агента при использовании дополнительного модуля в виде сушильной шахты для зерна.

МЕТОДЫ

На рис. 2 представлена структурно-функциональная схема сушилки аэродинамического нагрева с комбинированным теплообменником и дополнительным модулем в виде сушильной шахты для зерна.



Рис. 1. Сушилка аэродинамического нагрева с комбинированным теплообменником и дополнительным модулем в виде сушильной шахты для зерна.

Fig. 1. An aerodynamic heating dryer with a combined heat exchanger and an additional module in the form of a drying shaft for grain.

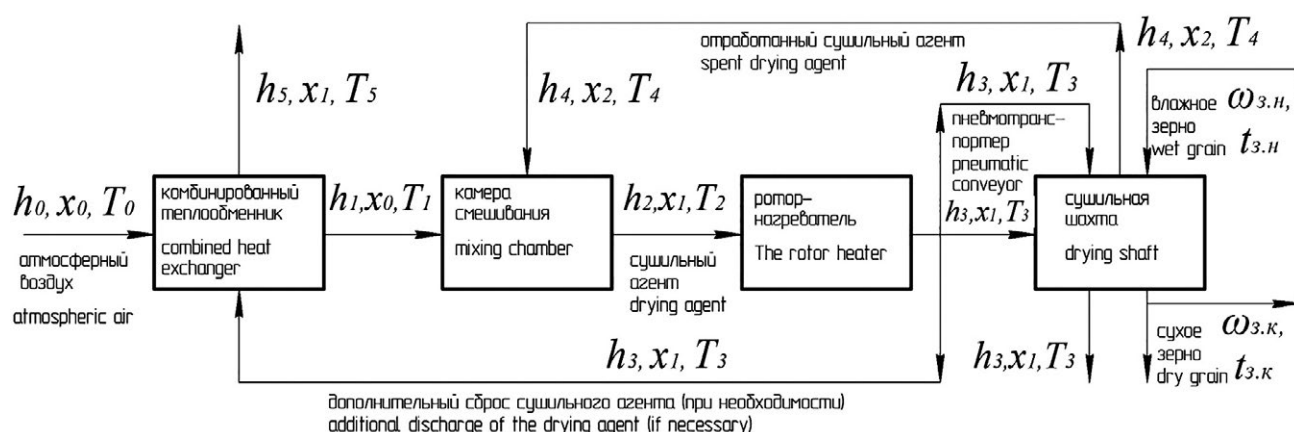


Рис. 2. Структурно-функциональная схема сушилки аэродинамического нагрева.

Fig. 2. Structural and functional diagram of the aerodynamic heating dryer.

Принцип работы сушилки следующий. Зерно загрузочным шнековым транспортером подается в зерновой бункер сушильной шахты и, распределяясь между подающими и отводящими сушильный агент коробами, под действием силы тяжести движется вниз к бесприводному выгрузному устройству пневмотранспортёра.

Атмосферный воздух, проходя через комбинированный теплообменник, подогревается за счёт теплообмена с частично сбрасываемым сушильным агентом (при необходимости регулирования его влажности), и поступает в камеру смешивания с рециркулирующим отработанным сушильным агентом.

Полученный сушильный агент дополнительно нагревается ротором-нагревателем и подается в сушильную шахту. Часть нагнетаемого сушильного агента используется для работы пневмотранспортера, обеспечивающего при необходимости рециркуляцию влажного зерна в сушильной шахте, либо выгрузку высушенного зерна.

Для решения поставленной задачи необходимо составить уравнение теплового баланса сушилки аэродинамического нагрева с комбинированным теплообменником и дополнительным модулем в виде сушильной шахты для зерна, из которого найти зависимость температуры сушильного агента от коэффициента его рециркуляции.

Уравнение теплового баланса сушилки аэродинамического нагрева с комбинированным теплообменником и дополнительным модулем в виде сушильной шахты для зерна за бесконечно малый промежуток времени dt :

$$dQ_{\text{КТ}} + dQ_{\text{П}} + dQ_{\text{РН}} = dQ_{\text{ЗЕР}} + dQ_{\text{П}} + dQ_{\text{СТ}} + dQ_{\text{ПТ}} + dQ_{\text{С.С.А}}, \quad \text{кДж}, \quad (1)$$

где $dQ_{\text{КТ}}$ — количество теплоты, воспринятой сушильным агентом (атмосферным воздухом) в комбинированном теплообменнике; $dQ_{\text{П}}$ — количество теплоты, поступившей с рециркулирующим отработанным сушильным агентом; $dQ_{\text{РН}}$ — количество теплоты, полученной в рабочей камере ротора-нагревателя; $dQ_{\text{ЗЕР}}$ — количество теплоты, идущей на нагрев зерна; $dQ_{\text{П}}$ — потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильной шахты; $dQ_{\text{СТ}}$ — количество теплоты, идущей на нагрев стенок и коробов сушильной шахты; $dQ_{\text{ПТ}}$ — потери теплоты с воздушным потоком пневмотранспортера сушилки; $dQ_{\text{С.С.А}}$ — количество теплоты, отведённой в атмосферу частично сбрасываемым сушильным агентом после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями комбинированного теплообменника.

Определим выражения составляющих теплового баланса. Количество теплоты, воспринятой сушильным агентом (атмосферным воздухом) в комбинированном теплообменнике

$$dQ_{\text{КТ}} = L_0 h_1(t) dt = (L_{\text{ПТ}} + L_5) h_1(t) dt, \quad (2)$$

где L_0 — расход атмосферного воздуха, кг с.в./с; $h_1(t)$ — энтальпия подогретого атмосферного воздуха, кДж/кг с.в.;

$L_{\text{ПТ}}$ — расход сушильного агента пневмотранспортёром, кг с.в./с; L_5 — расход сушильного агента, сбрасываемого через комбинированный теплообменник, кг с.в./с.

Энтальпия подогретого атмосферного воздуха может быть представлена в виде [8]:

$$h_1(t) = c_0 T_1(t) + x_0(r_0 + c_{\text{П}} T_1(t)), \quad (3)$$

где c_0 — теплоёмкость сухого воздуха, кДж/(кг·К); $T_1(t)$ — температура подогретого атмосферного воздуха на выходе из комбинированного теплообменника, °С; x_0 — начальное влагосодержание сушильного агента (атмосферного воздуха), кг/кг; r_0 — удельная теплота парообразования при температуре 0 °С, кДж/кг; $c_{\text{П}}$ — теплоёмкость пара, кДж/(кг·К).

Примем, что температура подогретого атмосферного воздуха на выходе из комбинированного теплообменника находится в прямой зависимости от температуры сбрасываемого в него (при необходимости, когда отвода влаги за счет работы пневмотранспортера будет недостаточно) части сушильного агента, т.е.:

$$T_1(t) = a_1 T_3(t) + b_1 \quad (4)$$

где a_1 , b_1 — эмпирические коэффициенты; $T_3(t)$ — температура сушильного агента, К.

Подставим выражения (3) и (4) в (2), проведём преобразования и получим:

$$dQ_{\text{КТ}} = k_0 T_3(t) dt + k_1 dt, \quad (5)$$

где

$$k_0 = (L_{\text{ПТ}} + L_5)(c_0 + x_0 c_{\text{П}}) a_1,$$

$$k_1 = (L_{\text{ПТ}} + L_5)(c_0 b_1 + x_0(r_0 + c_{\text{П}} b_1)). \quad (6)$$

Количество теплоты, поступившей с рециркулирующим отработанным сушильным агентом, вычисляется согласно:

$$dQ_{\text{П}} = k_{\text{Р}}(L_{\text{ПТ}} + L_5)(h_4(t) - h_1(t)) dt, \quad (7)$$

где $k_{\text{Р}}$ — коэффициент рециркуляции, равный отношению массового количества абсолютно сухого рециркулирующего сушильного агента к поступающему из комбинированного теплообменника абсолютно сухому сушильному агенту [8]; $h_4(t)$ — энтальпия рециркулирующего отработанного сушильного агента, кДж/кг с.в.

Энтальпия рециркулирующего отработанного сушильного агента

$$h_4(t) = c_0 T_4(t) + x_{\text{К}}(r_0 + c_{\text{П}} T_4(t)), \quad (8)$$

где $T_4(t)$ — температура рециркулирующего отработанного сушильного агента, °С; $x_{\text{К}}$ — конечное влагосодержание сушильного агента, кг/кг.

Примем, что температура, рециркулирующего отработанного сушильного агента, находится в прямой зависимости от температуры сушильного агента, т.е.:

$$T_4(t) = a_4 T_3(t) + b_4 \quad (9)$$

где a_4, b_4 — эмпирические коэффициенты.

Подставим выражения (8) и (9) в (7), проведём с учётом (3) и (4) преобразования, получим:

$$dQ_P = k_P(L_{\text{ПТ}} + L_5)(T_3(t)k_4 + x_K c_{\text{П}} a_4 T_3(t) + x_K k_3 + k_2)dt, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} k_2 &= c_0(b_4 - b_1) - x_0(r_0 + c_{\text{П}} b_1), \\ k_3 &= r_0 + c_{\text{П}} b_4, \\ k_4 &= c_0(a_4 - a_1) - x_0 c_{\text{П}} a_1. \end{aligned} \quad (11)$$

Количество теплоты, полученной в рабочей камере ротора-нагревателя,

$$dQ_{\text{РН}} = N(1 - \eta)dt = k_5 dt, \quad (12)$$

где N — мощность привода ротора-нагревателя, кВт; η — КПД ротора-нагревателя;

$$k_5 = N(1 - \eta). \quad (13)$$

Количество теплоты, идущей на нагрев зерна,

$$dQ_{\text{ЗЕР}} = M_3 c_3 dT_{\text{ЗЕР}}, \quad (14)$$

где M_3 — масса зерна в сушильной шахте, кг; c_3 — теплоемкость зерна, кДж/(кг·К); $T_{\text{ЗЕР}}$ — температура зерна, °С.

Примем, что температура зерна находится в линейной зависимости от температуры сушильного агента, т.е.:

$$T_{\text{ЗЕР}} = a_2 T_3(t) + b_2, \quad (15)$$

где a_2, b_2 — эмпирические коэффициенты.

Тогда

$$dT_{\text{ЗЕР}} = a_2 dT_3(t). \quad (16)$$

С учётом выражения (16) зависимость (14) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{ЗЕР}} = M_3 c_3 a_2 dT_3(t) = k_6 dT_3(t), \quad (17)$$

где

$$k_6 = M_3 c_3 a_2. \quad (18)$$

Потери теплоты в окружающую среду через ограждения сушильной шахты

$$dQ_{\text{П}} = kF(T_{\text{СТ}}(t) - T_0)dt, \quad (19)$$

где k — коэффициент теплопередачи через стенки сушильной шахты, кВт/(м²·К); F — площадь наружной поверхности сушильной шахты, м²; $T_{\text{СТ}}(t)$ — температура стенок комбинированного теплообменника в зависимости от времени в период сушки, К; T_0 — температура окружающей среды в период сушки, °С.

Примем, что температура стенок и коробов сушильной шахты находится в прямой зависимости от температуры сушильного агента, т.е.:

$$T_{\text{СТ}} = a_{\text{СТ}} T_3(t) + b_{\text{СТ}}, \quad (20)$$

где $a_{\text{СТ}}, b_{\text{СТ}}$ — эмпирические коэффициенты.

Выражение (19) с учётом зависимости (20) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{П}} = kFa_{\text{СТ}} T_3(t)dt + k_7 dt, \quad (21)$$

где

$$k_7 = kF(b_{\text{СТ}} - T_0). \quad (22)$$

Количество теплоты, идущей на нагрев стенок и коробов сушильной шахты,

$$dQ_{\text{СТ}} = M_{\text{СТ}} c_{\text{СТ}} dT_{\text{СТ}}, \quad (23)$$

где $M_{\text{СТ}}$ — масса стенок и коробов сушильной шахты, кг; $c_{\text{СТ}}$ — теплоёмкость материала стенок и коробов сушильной шахты, кДж/(кг·°С); $dT_{\text{СТ}}$ — приращение температуры стенок и коробов сушильной шахты, °С.

Из выражения (20)

$$dT_{\text{СТ}} = a_{\text{СТ}} dT_3(t). \quad (24)$$

С учётом выражения (24) зависимость (23) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{СТ}} = M_{\text{СТ}} c_{\text{СТ}} a_{\text{СТ}} dT_3(t) = k_8 dT_3(t), \quad (25)$$

где

$$k_8 = M_{\text{СТ}} c_{\text{СТ}} a_{\text{СТ}}. \quad (26)$$

Потери теплоты с воздушным потоком пневмотранспортера сушиллки

$$dQ_{\text{ПТ}} = L_{\text{ПТ}} h_3(t)dt, \quad (27)$$

где $h_3(t)$ — энтальпия сушильного агента, кДж/кг с.в.

Энтальпия сушильного агента

$$h_3(t) = c_0 T_3(t) + x_P(r_0 + c_{\text{П}} T_3(t)), \quad (28)$$

где x_P — влагосодержание сушильного агента, кг/кг.

Влагосодержание сушильного агента при его рециркуляции [8]

$$x_p = \frac{x_H + k_p x_K}{k_p + 1}. \quad (29)$$

Тогда выражение (27) с учётом зависимостей (28) и (29) будет иметь вид:

$$dQ_{\text{ПТ}} = L_{\text{ПТ}}(c_0 T_3(t) + \frac{r_0 + c_{\text{П}} T_3(t)}{k_p + 1} (x_H + k_p x_K)) dt. \quad (30)$$

Количество теплоты, отведенной в атмосферу частично сбрасываемым сушильным агентом после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями комбинированного теплообменника

$$dQ_{\text{C.C.A}} = L_5 h_5(t) dt, \quad (31)$$

где $h_5(t)$ — энтальпия сброшенного сушильного агента после теплообмена с тепловоспринимающими поверхностями комбинированного теплообменника, Дж/кг.

Энтальпия сброшенного сушильного агента

$$h_5(t) = c_0 T_5(t) + x_p (r_0 + c_{\text{П}} T_5(t)), \quad (32)$$

где $T_5(t)$ — температура сброшенного сушильного агента на выходе из комбинированного теплообменника, К.

Примем, что температура сброшенного сушильного агента находится в прямой зависимости от температуры сушильного агента, т.е.:

$$T_5 = a_5 T_3(t) + b_5, \quad (33)$$

где a_5 , b_5 — эмпирические коэффициенты. Подставив полученные выражения (32) и (33) в уравнение (31) с учетом выражения (29), получим:

$$dQ_{\text{C.C.A}} = (k_9 T_3(t) + k_{10} + k_{11} x_K + k_{12} x_K T_3(t)) dt, \quad (34)$$

где

$$\begin{aligned} k_9 &= L_5 a_5 (c_0 + \frac{x_H c_{\text{П}}}{k_p + 1}); \\ k_{10} &= L_5 (c_0 b_5 + \frac{x_H}{k_p + 1} (r_0 + c_{\text{П}} b_5)); \\ k_{11} &= L_5 k_p (\frac{r_0 + c_{\text{П}} b_5}{k_p + 1}); \quad k_{12} = \frac{L_5 a_5 k_p c_{\text{П}}}{k_p + 1}. \end{aligned} \quad (35)$$

Тогда, подставив выражения составляющих теплового баланса (5), (10), (12), (17), (21), (25), (30) и (34) в уравнение (1), после преобразований получим:

$$(k_{13} + k_{15} x_K) T_3(t) dt + (k_{14} + k_{16} x_K) dt - k_{17} dT_3(t) = 0, \quad (36)$$

где

$$\begin{aligned} k_{13} &= k_0 + k_p (L_{\text{ПТ}} + L_5) k_4 - k F a_{\text{CT}} - \\ &- L_{\text{ПТ}} c_0 - \frac{c_{\text{П}} x_H L_{\text{ПТ}}}{k_p + 1} - k_9; \end{aligned}$$

$$k_{14} = k_1 + k_p (L_{\text{ПТ}} + L_5) k_2 + k_5 - k_7 - \frac{r_0 x_H L_{\text{ПТ}}}{k_p + 1} - k_{10};$$

$$k_{15} = k_p (L_{\text{ПТ}} + L_5) c_{\text{П}} a_4 - \frac{c_{\text{П}} k_p L_{\text{ПТ}}}{k_p + 1} - k_{12};$$

$$k_{16} = k_p (L_{\text{ПТ}} + L_5) k_3 - \frac{r_0 k_p L_{\text{ПТ}}}{k_p + 1} - k_{11};$$

$$k_{17} = k_6 + k_8.$$

Дифференциальное уравнение (36) можно представить в виде:

$$a \frac{dT}{dt} + bT - c = 0, \quad (37)$$

где T — искомая температура сушильного агента на входе в сушильную камеру;

$$a = k_{17}; \quad b = -k_{13} - k_{15} x_K; \quad c = k_{14} + k_{16} x_K. \quad (38)$$

Решение уравнения (37) методом Эйлера второго порядка имеет вид:

$$T = \frac{c}{b} + (T_0 - \frac{c}{b}) e^{\frac{b}{a} t}, \quad (39)$$

где T_0 — температура атмосферного воздуха.

В выражениях коэффициентов (38) влагосодержание отработанного сушильного агента x_K имеет в начале процесса сушки максимальное значение, уменьшающееся к концу сушки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для прогнозирования температуры сушильного агента в процессе сушки по выражению (39) построим искомую зависимость для значения коэффициента рециркуляции равного 0,3, 0,5 и 0,7 при влагосодержании отработанного сушильного агента x_K равном 0,012 и 0,041 кг/кг с.в. Принятое влагосодержание соответствует значениям, полученным в результате поисковых опытов при сушке зерна в модульной сушилке аэродинамического нагрева.

Для построения графиков приняты также следующие исходные данные, полученные в ходе поисковых опытов: расход сушильного агента пневмотранспортёром $L_{\text{ПТ}}$ — 0,15 кг с.в./с; расход сушильного агента, сбрасываемого через комбинированный теплообменник L_5 — 0,05 кг с.в./с; теплоёмкость сухого воздуха c_0 — 1,01 кДж/(кг·К); начальное влагосодержание сушильного агента (атмосферного воздуха) x_0 — 0,008 кг/кг; удельная теплота парообразования при температуре 0 °С r_0 — 2493 кДж/кг;

теплоёмкость пара $c_{п}$ — 1,97 кДж/(кг·К); эмпирические коэффициенты: $a_1 = 0,1$, $b_1 = 25$, $a_2 = 0,8$, $b_2 = -8$, $a_{ст} = 0,8$, $b_{ст} = -10$, $a_4 = 0,8$, $b_4 = -8$, $a_5 = 0,9$, $b_5 = -5$; мощность привода ротора-нагревателя N — 17,5 кВт; КПД ротора-нагревателя η — 0,1; масса зерна в сушильной шахте M_3 — 400 кг; теплоёмкость зерна c_3 — 2,078 кДж/(кг·К); коэффициент теплопередачи через стенки сушильной шахты k — 0,002 кВт/(м²·К); площадь наружной поверхности сушильной шахты F — 5,2 м²; температура окружающей среды в период сушки T_0 — 17 °С; масса стенок и корбов сушильной шахты $M_{ст}$ — 300 кг; теплоёмкость материала стенок и корбов сушильной шахты $c_{ст}$ — 0,46 кДж/(кг·°С).

На рис. 3 представлены зависимости температуры сушильного агента от его коэффициента рециркуляции и влагосодержания отработанного сушильного агента.

Реальная температурная кривая в процессе сушки для каждого значения коэффициента рециркуляции с учетом переменного влагосодержания отработанного сушильного агента будет проходить в обозначенном соответствующими граничными кривыми температурном диапазоне.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ рис. 3 показывает, что температура сушильного агента растет с увеличением коэффициента рециркуляции и влагосодержания сушильного агента. Активный рост температуры продолжается в течение часа, после чего начинает замедляться. Это объясняется достижением баланса между теплопритоками и теплопотерями в системе.

Для каждого режима работы достижимая максимально возможная температура сушильного агента определяется по кривой меньшего значения влагосодержания отработанного сушильного агента.

Так для коэффициента рециркуляции, равного 0,3 она составит 135 °С, для коэффициента рециркуляции, равного 0,5—158 °С, для коэффициента рециркуляции, равного 0,7—198 °С.

В рассматриваемой сушилке, производительность пневмотранспортёра обеспечивает прохождение зерна через сушильную шахту за 40...60 минут. С момента запуска сушилки за это время температура сушильного агента достигнет порядка 100 °С при коэффициенте рециркуляции 0,7. При необходимости, например, дальнейшего поддержания данной температуры сушильного агента нужно уменьшить коэффициент рециркуляции отработанного сушильного агента изменением его расхода в канале рециркуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученная на основании теплового баланса сушилки зависимость (39) позволяет прогнозировать температуру сушильного агента в зависимости от установленного коэффициента рециркуляции отработанного сушильного агента при заданном диапазоне

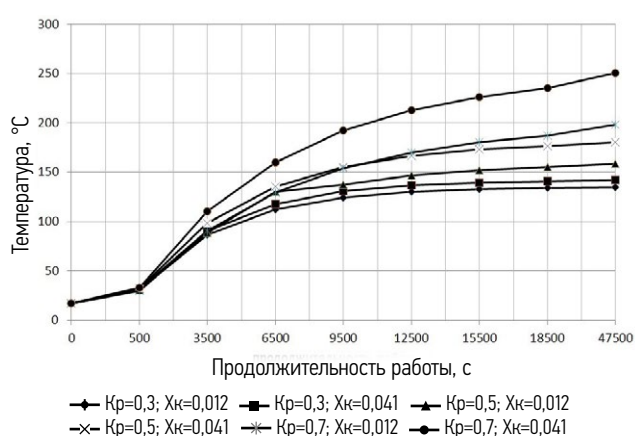


Рис. 3. Изменение температуры сушильного агента (K_p — коэффициент рециркуляции, X_k — влагосодержание отработанного сушильного агента, кг/кг).

Fig. 3. Temperature change of the drying agent (K_p — recirculation coefficient, X_k — moisture content of the spent drying agent, kg/kg).

изменения его влагосодержания. При этом обеспечивается рабочий режим работы сушилки аэродинамического нагрева и при использовании ее дополнительных модулей.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.Н. Ожерельев — разработка общей концепции; А.И. Купреенко — разработка математического аппарата и постановка задачи, редактирование статьи; Д.А. Безик — аналитическое решение поставленной задачи и ее графическое представление; Х.М. Исаев — сбор и анализ литературных источников; О.А. Купреенко — подготовка исходных данных и написание текста статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. V.N. Ozherelyev — development of the general concept; A.I. Kupreenko — development of the mathematical apparatus and formulation of the problem, editing of the article; D.A. Bezik — analytical solution of the problem and its graphical representation; H.M. Isaev — collection and analysis of literary sources; O.A. Kupreenko — preparation of initial data and writing of the text of the article. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Disclosure of interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding sources. Not specified.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Installation for drying wood "svh-les". [internet] (In Russ.) Accessed: 02.05.2024. Available from: <http://SVChlesyandex.ru/images>
2. Aerodynamic drying chambers. [internet] (In Russ.) Accessed: 02.05.2024. Available from: <https://sushilnye-kamery.ru/blog/vidy-sushilnyh-kamersposoby-sushki-drevesiny/898-2/>
3. Dianov LV, Klyuchnikov AS. Universal dryer for sawn timber and plant products. *Vestnik APK Verxnevolzh'ya*. 2012;(3):55–59. (In Russ.) EDN: PDUVLJ
4. Aerodynamic grain dryer RNU-50 [internet] (In Russ.) Accessed: 02.05.2024. Available from: <https://promportal.su/goods/84339249/aerodinamicheskaya-sushilka-zerna-rnu-50.htm>
5. Kupreenko AI, Isaev XM, Isaev SX. Dryers with aerodynamic air heating. *Sel'skij mexanizator*. 2021;(11):16–17. (In Russ.) EDN: JZPUQT
6. Kupreenko AI, Isaev XM, Isaev SX. Reducing the energy consumption of aerodynamic heating dryer. *Tractors and agricultural machinery*. 2021;88(1):81–88. (In Russ.) doi: 10.31992/0321-4443-2021-1-81-87 EDN: FJZTLU
7. Kupreenko AI, Isaev XM, Mixajlichenko SM, et al. Modular type domestic heating system. In: *Design, use and reliability of agricultural machinery. Collection of scientific papers*. Bryansk: Izd. Bryanskogo GAU 2022;1(21):218–222. (In Russ.) EDN: XMSPYM
8. Akulich P.V. *Calculations of drying and heat exchange installations* Minsk: Belarus. navuka; 2010. (In Russ.) Accessed: 02.05.2024. Available from: <https://e.lanbook.com/book/90533?category=931&publisher=44374>

ОБ АВТОРАХ

*** Купреенко Алексей Иванович,**

д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры технологического оборудования
животноводства и перерабатывающих производств;
адрес: Россия, Брянская область, Выгоничский район, 243365,
Кокино, ул. Советская, д. 2а;
ORCID: 0000-0002-3781-9592;
eLibrary SPIN: 9985-0975;
e-mail: kupreenkoai@mail.ru

Ожерельев Виктор Николаевич,

д-р с.-х. наук, профессор,
профессор кафедры «Технические системы в агробизнесе,
природообустройстве и дорожном строительстве»;
ORCID: 0000-0002-2121-3481;
eLibrary SPIN: 3423-0991;
e-mail: vicoz@bk.ru

Безик Дмитрий Александрович,

канд. техн. наук, доцент,
директор института энергетики и природопользования;
ORCID: 0000-0003-1883-716X;
eLibrary SPIN: 1052-9774;
e-mail: bda20101@yandex.ru

Исаев Хафиз Мубариз-оглы,

канд. экон. наук, доцент,
заведующий кафедрой технологического оборудования
животноводства и перерабатывающих производств;
ORCID: 0000-0003-4912-9908;
eLibrary SPIN: 1420-4155;
e-mail: haf-is@mail.ru

Купреенко Олег Алексеевич,

аспирант кафедры «Технические системы в агробизнесе,
природообустройстве и дорожном строительстве»;
ORCID: 0000-0002-1765-7282;
eLibrary SPIN: 7925-2899;
e-mail: 89996212885@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Aleksey I. Kupreenko,**

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Professor of the Technological Equipment of Animal Husbandry
and Processing Industries Department;
address: 2a Sovetskaya st, Kokino, Vygonichsky District
of Bryansk Oblast, Russia, 243365;
ORCID: 0000-0002-3781-9592;
eLibrary SPIN: 9985-0975;
e-mail: kupreenkoai@mail.ru

Viktor N. Ozherelyev,

Dr. Sci. (Agriculture), Professor,
Professor of the Technical Systems in Agrobusiness,
Environmental Management and Road Construction Department;
ORCID: 0000-0002-2121-3481;
eLibrary SPIN: 3423-0991;
e-mail: vicoz@bk.ru

Dmitry A. Bezik,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Director
of the Institute of Energy and Environmental Management;
ORCID: 0000-0003-1883-716X;
eLibrary SPIN: 1052-9774;
e-mail: bda20101@yandex.ru

Khafiz M. Isaev,

Cand. Sci. (Economics), Associate Professor,
Head of the Technological Equipment of Animal Husbandry
and Processing Industries Department;
ORCID: 0000-0003-4912-9908;
eLibrary SPIN: 1420-4155;
e-mail: haf-is@mail.ru

Oleg A. Kupreenko,

Postgraduate of the Technical Systems in Agrobusiness,
Environmental Management and Road Construction Department;
ORCID: 0000-0002-1765-7282;
eLibrary SPIN: 7925-2899;
e-mail: 89996212885@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author