

УДК 53.093:53.096

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОТДАЧИ ОТ АГЕНТА СУШКИ ЗЕРНОВКЕ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Кизуров А.С., Кокошин С.Н., Лапшин И.П.

ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья», Тюмень,
e-mail: Impossible_@mail.ru

В теории теплотехники рассматриваются коэффициенты теплоотдачи сухого воздуха либо насыщенного пара, в действительности же используется влажный воздух. В данной статье коэффициент теплоотдачи рассмотрен для влажного воздуха. Из физических свойств сухого воздуха и насыщенного пара получена зависимость коэффициента теплоотдачи α влажного воздуха. Для определения коэффициента теплоотдачи выделен коэффициент $B = f(T)$, зависящий от температур агента и зерновки. Значение коэффициента $B = f(T)$ для сухого воздуха при температуре 0...100 °C колеблется в пределах 0...12 единиц, а для насыщенного пара – в пределах 0...2000 единиц. Определено соотношение площадей теплообмена сухого воздуха и насыщенного пара в зависимости от температуры и влажности влажного воздуха. Получено выражение для определения коэффициента теплоотдачи влажного воздуха. Анализ показал, что параметры влажного воздуха (влажность), соответствующие сушке семян пшеницы (температура агента 0...80 °C, температура зерновки 0...45 °C, влажность агента 0...100%), не оказывали существенного влияния (максимальное отклонение составляет 8%) на значение коэффициента теплоотдачи. Представлена зависимость коэффициента теплоотдачи влажного воздуха для процесса сушки семян пшеницы. По результатам теоретических исследований представлены поверхности отклика, отображающие зависимости коэффициента $B = f(T)$ при различных температурах агента и зерновки. Из полученных результатов исследований видно, что при сушке зерна пшеницы (согласно кинетике сушки) при равных разностях температур поверхности зерновки и агента значение коэффициента теплоотдачи выше в процессе нагрева.

Ключевые слова: сушка семян пшеницы, коэффициент теплоотдачи, время нагрева, время охлаждения, гидравлический диаметр зерновки

THE COEFFICIENT OF HEAT TRANSFER FROM THE DRYING AGENT CARYOPSIS WITH NATURAL – CONVECTION

Kizurov A.S., Kokoshin S.N., Lapshin I.P.

FSBEI HPE «Northern Trans-Ural State Agricultural University», Tyumen, e-mail: Impossible_@mail.ru

Amount of transmitted heat appears in terms of the Newton-Richman, time of heating and heat transfer coefficient. In theory, heating engineers considered the heat transfer coefficients of dry air or saturated steam, in fact, used humid air. In this article, the heat transfer coefficient is considered to moist air. Of the physical properties of dry air and saturated steam the dependence of heat transfer coefficient α moist air. To determine the coefficient of heat transfer coefficient in the isolated $B = f(T)$, which depends on the temperature and agent weevil. The value of the coefficient $B = f(T)$ for dry air at a temperature ranging from 0 to plus 100 ranges from 0 to plus 12 units, and for saturated steam – in the range from 0 to 2000 units. The correlation of the heat transfer area of dry air and steam depending on the temperature and humidity of the humid air. An expression for determining the heat transfer coefficient of moist air. The analysis showed that the parameters of moist air (humidity), the corresponding drying wheat seeds (temperature agent 0 ... 80 degrees Celsius, the temperature weevil 0 ... 45 degrees Celsius, humidity agent 0 ... 100%), had no significant effect (the maximum deviation of the co-constitutes 8%) on the value of heat transfer coefficient. Shows the dependence of heat transfer coefficient of moist air to the drying process of wheat seed. According to the results of theoretical studies presented the response surface, showing the dependence of the coefficient $B = f(T)$ at different temperatures agent and weevil. From these results, research shows that when drying grain of wheat (according to the kinetics of drying) with equal surface temperature differences weevil agent and heat transfer coefficient is higher in the heating process.

Keywords: drying of the grain, heat transfer coefficient, heating time, cooling time, the hydraulic diameter of the grains

Сушка – этап послеуборочной обработки зерна, от которого зависит его дальнейшая сохранность, предназначен для удаления избыточного количества влаги из зернового материала. Известно, что наиболее распространенной является конвективная сушка, которая характеризуется наличием агента сушки (нагретый воздух) и агента охлаждения (атмосферный воздух), которые выполняют две функции: изменение температуры; удаление испаренной влаги за пределы зерносушилки [4].

Конвективный способ подразделяется на четыре зоны: нагрев зерна; период постоянной скорости сушки; период убывающей

скорости сушки; охлаждение. Интенсивность этого процесса зависит от температуры и скорости агентов сушки и охлаждения, а также от продолжительности нагрева и охлаждения. Временно-температурные показатели процесса влагоудаления отражены в кинетике сушки [7].

Определение времени сушки и времени охлаждения одной зерновки (как и любого другого тела) описывается выражением Ньютона-Рихмана [3]:

$$cM\Delta T = \alpha t S (T_a - T_z), \quad (1)$$

где c – теплоемкость зерновки, Дж/кг °C;
 M – масса одной зерновки, кг;

ΔT – изменение температуры зерновки, °C;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м² °C;
 τ – время нагрева или охлаждения, с;
 S – площадь поверхности зерновки, м²;
 T_a – температура агента сушки (охлаждения), °C;
 T_z – начальная температура зерновки, °C.

Представленное выражение (1) позволило сформулировать цель исследований – выявить влияние температурно-влажностных параметров агента сушки (охлаждения) на коэффициент теплоотдачи.

Для решения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- определить значение коэффициента теплоотдачи для влажного воздуха;
- определить коэффициент теплоотдачи для сухого воздуха;
- определить коэффициент теплоотдачи для насыщенного пара;
- оценить влияние влажности воздуха на коэффициент теплоотдачи влажного воздуха для диапазона параметров, ограниченных кинетикой сушки.

Материалы и методы исследования

Объект исследования: коэффициент теплоотдачи влажного воздуха при конвективной сушке зерен пшеницы.

Методы исследования: статистический и аналитический анализы.

Результаты исследования и их обсуждение

Учеными СибНИПТИП сформулирована концепция интенсификации процессов переработки биосырья, основанная на активизации гидроаэродинамического взаимодействия энергоносителя и объекта обработки [3]. Основываясь на данной концепции, была предложена схема сушки зернового материала на базе теплонасосной установки.

Известно, что влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и насыщенного пара [1].

Если разделить поток влажного воздуха на два параллельных потока сухого воздуха и насыщенного пара, то произведение эквивалентной теплоемкости на площадь определится по выражению (2) [10]

$$\alpha S = \alpha_{\text{св}} \cdot S_{\text{св}} + \alpha_{\text{нп}} \cdot S_{\text{нп}}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи влажного воздуха, Вт/м² °C;

$\alpha_{\text{св}}$ – коэффициент теплоотдачи сухого воздуха, Вт/м² °C;

$\alpha_{\text{нп}}$ – коэффициент теплоотдачи насыщенного пара, Вт/м² °C;

S – площадь теплоотдачи, м²;

$S_{\text{св}}$ – площадь теплоотдачи от сухого воздуха, м²;

$S_{\text{нп}}$ – площадь теплоотдачи от насыщенного пара, м².

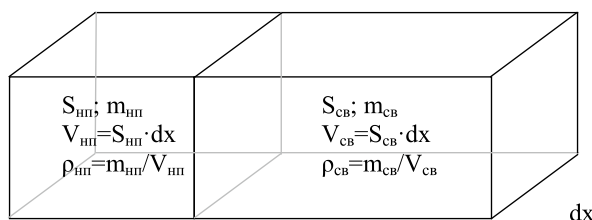


Рис. 1. расчетная схема для определения соотношений площадей.

Примечание: dx – толщина слоя, м; $V_{\text{нп}}$ – объем, занимаемый насыщенным паром, м³;
 $V_{\text{св}}$ – объем, занимаемый сухим воздухом, м³; $m_{\text{нп}}$ – масса насыщенного пара, кг; $m_{\text{св}}$ – масса сухого воздуха, кг; $\rho_{\text{нп}}$ – плотность насыщенного пара, кг/м³; $\rho_{\text{св}}$ – плотность сухого воздуха, кг/м³

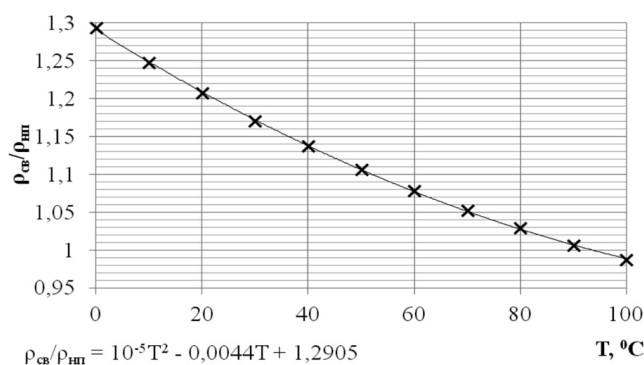


Рис. 2. Соотношение плотностей сухого воздуха к насыщенному пару в зависимости от температуры

Для расчета соотношений площадей насыщенного пара и сухого воздуха была составлена расчетная схема (рис. 1) при постоянном значении атмосферного давления.

Соотношение площадей насыщенного пара и сухого воздуха будет определяться по выражению

$$K = S_{\text{нп}}/S_{\text{св}} = S_{\text{нп}} \cdot dx/(S_{\text{св}} \cdot dx) = V_{\text{нп}}/V_{\text{св}}, \quad (3)$$

где K – коэффициент соотношения площадей теплоотдачи.

Известно, что произведение объемов на плотности есть масса, поэтому:

$$K = V_{\text{нп}}/V_{\text{св}} = m_{\text{нп}} \cdot \rho_{\text{св}}/(m_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{нп}}). \quad (4)$$

Соотношение масс, содержащихся в выражении (4), определяется из выражения влагосодержания влажного воздуха (5):

$$m_{\text{нп}}/m_{\text{св}} = d/1000, \quad (5)$$

где d – влагосодержание влажного воздуха, г/кг.

Соотношение плотностей – это функция от температуры, т.к. плотность сухого воздуха и насыщенного пара при постоянном давлении зависят только от температуры (6), что видно из данных, которые были получены при анализе физических свойств сухого воздуха и насыщенного пара. По результатам анализа было определено соотношение плотностей сухого воздуха к насыщенному пару [2].

Результаты расчетов соотношения плотностей сухого воздуха к насыщенному пару представлены на рис. 2.

Из графика (рис. 2) видно, что с увеличением температуры влажного воздуха, соотношение сухого воздуха к насыщенному пару уменьшается нелинейно (1,207 при $T = 20^\circ\text{C}$; 1,106 при $T = 50^\circ\text{C}$; 1,052 при $T = 70^\circ\text{C}$). Зависимость соотношения плотностей от температуры представлена следующим выражением:

$$\rho_{\text{св}}/\rho_{\text{нп}} = f(T) = 10^{-3} \cdot (10^{-5} \cdot T^2 - 0,0044 \cdot T + 1,2905), \quad (6)$$

где T – температура воздуха, $^\circ\text{C}$.

Подставив (6) и (5) в (4), получили:

$$K = d \cdot 10^{-6} \cdot (10^{-5} \cdot T^2 - 0,0044 \cdot T + 1,2905) = S_{\text{нп}}/S_{\text{св}}. \quad (7)$$

Откуда следует, что:

$$\begin{cases} S = S_{\text{нп}} + S_{\text{св}} \\ K = S_{\text{нп}}/S_{\text{св}} \\ S_{\text{св}} = S/(K+1) \\ S_{\text{нп}} = S \cdot (1 - 1/(K+1)) \end{cases} \quad (8)$$

Подставив систему уравнений (8) в выражение (2), получили:

$$\alpha S = \alpha_{\text{св}} \cdot S_{\text{св}} + \alpha_{\text{нп}} \cdot S_{\text{нп}} = \alpha_{\text{св}} \cdot S \cdot (1/(K+1)) + \alpha_{\text{нп}} \cdot S \cdot (1 - 1/(K+1))$$

или

$$\alpha = \alpha_{\text{св}} \cdot (1/(K+1)) + \alpha_{\text{нп}} \cdot (1 - 1/(K+1)). \quad (9)$$

Данное выражение (9) показывает взаимосвязь коэффициента теплоотдачи влажного воздуха по данным коэффициентов теплоотдачи сухого воздуха и насыщенного пара в зависимости от температуры.

Коэффициент теплоотдачи α при естественной конвекции определяется из выражения [5]:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \cdot (Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25}, \quad (10)$$

где $Nu = \alpha \cdot l/\lambda$ – критерий Нуссельта,

где $l = 2 \cdot L \cdot A/(L + A)$ – гидравлический диаметр, м;

$L = 4,2 - 8,6 \cdot 10^{-3}$ – длина зерновки, м;

$A = 1,6 - 4 \cdot 10^{-3}$ – толщина зерновки, м;

$Gr = g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta T/\nu^2$ – критерий Грасгофа;

где β – коэффициент температурного расширения, K^{-1} ;

ΔT – разность температур поверхностей теплообмена, $^\circ\text{C}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

$Pr = \nu/a = c \cdot \mu/\lambda$ – критерий Прандтля;

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$;

μ – динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$

C – для ламинарного режима $C = 1,18$;

n – для ламинарного режима $n = 0,125$.

При этом коэффициент теплоотдачи определили из выражения:

$$\alpha = 1,18 \cdot g^{0,125} \cdot \beta^{0,125} \times \times \Delta T^{0,125} \cdot Pr^{0,375} \cdot \lambda/Pr_{\text{ст}}^{0,25} \cdot l^{0,625} \cdot \nu^{0,25}. \quad (11)$$

На основании физических данных сухого воздуха получено следующее значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{св}} = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot l^{-0,625} \cdot (|T_{\text{агента}} - T_{\text{зерна}}|)^{0,125} \times \times 0,49635 \cdot (0,0148 \cdot T_{\text{агента}} + 11,234)/ / (0,9169 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{зерна}}),$$

где $T_{\text{агента}}$ – температура агента сушки (охлаждения), $^\circ\text{C}$;

$T_{\text{зерна}}$ – температура поверхности зерна, $^\circ\text{C}$.

Заменив части выражения, содержащие переменные температур, коэффициентом $B = f(T_{\text{агента}}; T_{\text{зерна}})$, получим:

$$\alpha_{\text{св}} = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot l^{-0,625} \cdot B_{\text{св}}(T_{\text{агента}}; T_{\text{зерна}}), \quad (12)$$

где

$$B_{\text{св}} = (|T_{\text{агента}} - T_{\text{зерна}}|)^{0,125} \cdot 0,49635 \times \times (0,0148 \cdot T_{\text{агента}} + 11,234)/(0,9169 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{зерна}});$$

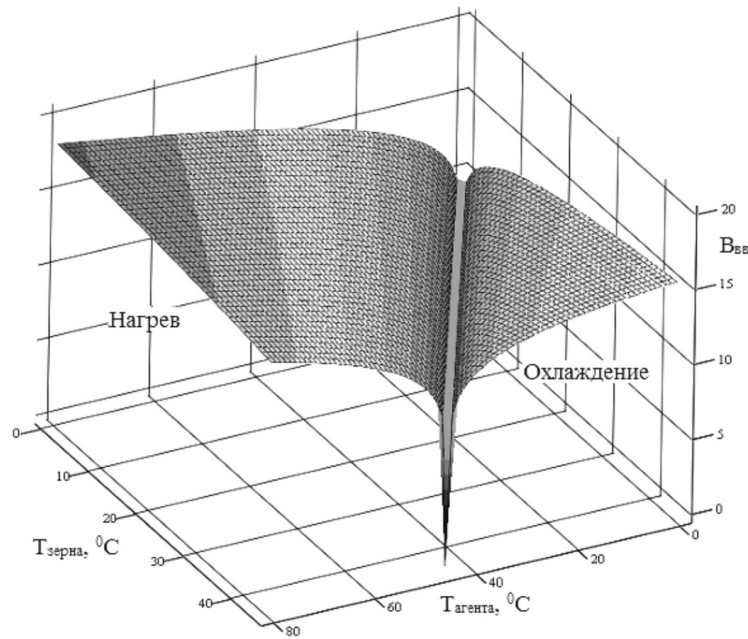


Рис. 3. Значение коэффициента B_{vv} в зависимости от температуры агента и зерновки

$$\alpha_{\text{нп}} = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot I^{-0,625} \cdot (|T_{\text{агента}} - T_{\text{зерна}}|)^{0,125} \cdot (0,0013 \cdot T_{\text{агента}}^3 - 0,272 \cdot T_{\text{агента}}^2 + 18,801 \cdot T_{\text{агента}} + 1045,3) / (1,8976 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{зерна}}^2 - 0,0139 \cdot T_{\text{зерна}})$$

или

$$\alpha_{\text{нп}} = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot I^{-0,625} \cdot B_{\text{нп}}(T_{\text{агента}}, T_{\text{зерна}}), \quad (13)$$

где

$$B_{\text{нп}} = (|T_{\text{агента}} - T_{\text{зерна}}|)^{0,125} \cdot (0,0013 \cdot T_{\text{агента}}^3 - 0,272 \cdot T_{\text{агента}}^2 + 18,801 \cdot T_{\text{агента}} + 1045,3) / (1,8976 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{зерна}}^2 - 0,0139 \cdot T_{\text{зерна}})$$

Для анализа полученной зависимости использована компьютерная программа MathCad [9], график зависимостей представлен на рис. 3.

Учитывая полученные данные коэффициента теплоотдачи сухого воздуха и насыщенного пара, коэффициент теплоотдачи влажного воздуха представит собой следующее выражение:

$$\alpha = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot I^{-0,625} \cdot (B_{\text{св}} / (K + 1) + B_{\text{нп}} \cdot (1 - 1 / (K + 1))) = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot I^{-0,625} \cdot B(T_a; T_z; \varphi), \quad (14)$$

где $\varphi = f(d; T_a)$ – относительная влажность, %.

При сушке зерен пшеницы в семенном режиме, нормативными документами установлены следующие ограничения [8]:

$$T_{\text{агента}} = 0..80^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{зерна}} = 0..45^\circ\text{C};$$

$$\varphi = 0..100\%.$$

Выявлено, что при таких ограничениях влажность воздуха не оказывает существенного изменения коэффициента $B = B_{\text{св}} / (K + 1) + B_{\text{нп}} \cdot (1 - 1 / (K + 1))$. Коэффициент примерно равен коэффициенту сухого воздуха (максимальное значение $B = 1,08 \cdot B_{\text{св}}$ при $T_a = 80$; $T_z = 45$; $\varphi = 100\%$), вследствие чего влажностью воздуха можно пренебречь.

Следовательно, в процессе сушки зерен пшеницы в семенном режиме коэффициент теплоотдачи от агента зерновке может быть определен по выражению:

$$\alpha = 1,57 \cdot 10^{-3} \cdot I^{-0,625} \cdot (|T_{\text{агента}} - T_{\text{зерна}}|)^{0,125} \cdot 0,49635 \times (0,0148 \cdot T_{\text{агента}} + 11,234) / (0,9169 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{зерна}}),$$

или

$$\alpha = 10^{-3} \cdot I^{-0,625} \cdot B_{\text{вв}}, \quad (15)$$

где

$$B_{\text{вв}} = 1,57 \cdot (|T_{\text{агента}} - T_{\text{зерна}}|)^{0,125} \cdot 0,49635 \times (0,0148 \cdot T_{\text{агента}} + 11,234) / (0,9169 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot T_{\text{зерна}}).$$

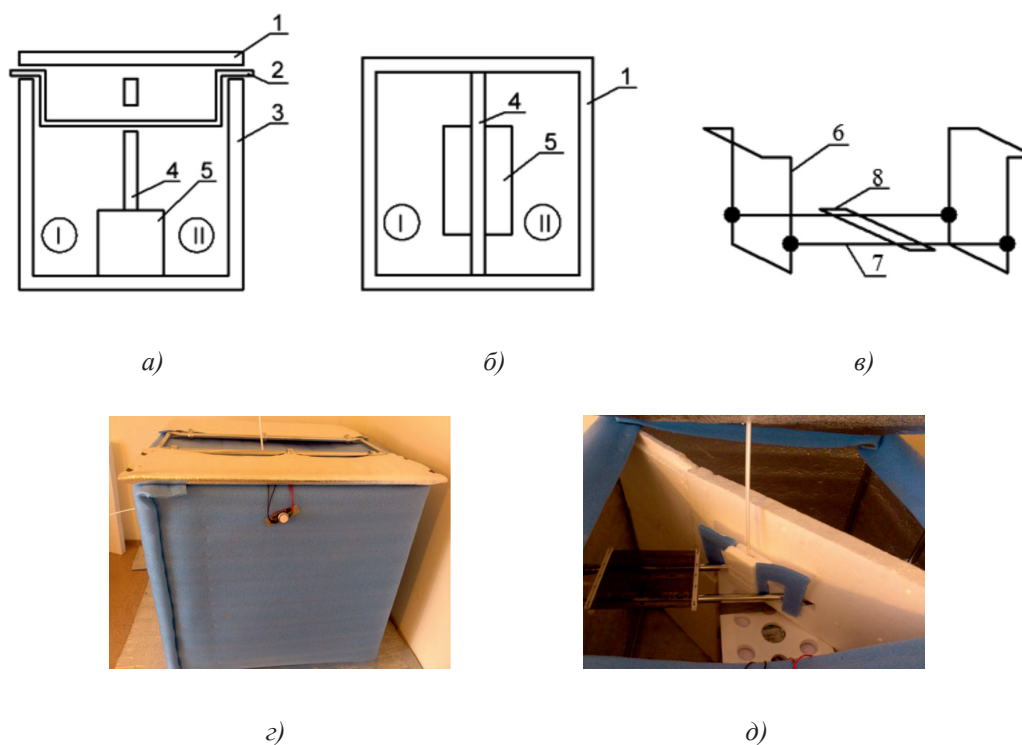


Рис. 4. Лабораторная установка. а – вид спереди; б – вид сверху; в – штатив с подвижным лотком; г – общий вид; д – вид внутри, I – камера охлаждения; II – камера нагрева, 1 – съемная крышка; 2 – штатив с подвижным лотком; 3 – корпус; 4 – перегородка; 5 – теплонасосная установка; 6 – вертикальные ручки штатива; 7 – горизонтальные балки; 8 – лоток подвижный

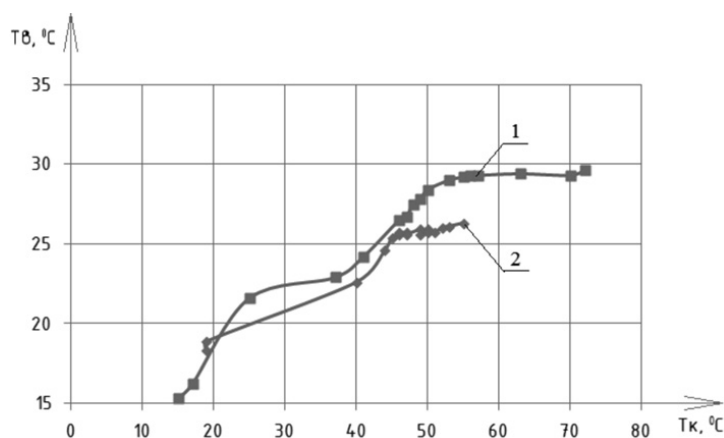


Рис. 5. Зависимость температуры сушильного агента, полученного тепловым насосом, от температуры конденсатора.
1 – начальная температура воздуха + 15,3 °C; 2 – начальная температура воздуха + 19 °C

Для экспериментального подтверждения полученных теоретических данных значения коэффициента теплоотдачи влажного воздуха разработана лабораторная установка на базе теплового насоса (рис. 4).

Установка лабораторная состоит из корпуса 3, выполненного из теплоизоляционного материала. Внутри корпуса расположена теплонасосная установка 5, предназначенная для получения агента

нагрева и агента охлаждения. Внутренняя полость корпуса 3 разделена теплоизоляционной перегородкой 4, которая делит внутреннее пространство на две камеры – охлаждения (I) и нагрева (II). В верхней части корпуса 3 предусмотрена установка штатива 2, эскиз которого представлен на рисунке. Верхняя часть оборудована съемной крышкой 1, выполненной из того же теплоизоляционного материала, что и корпус 3. Съемная крышка предназначена для обеспечения доступа в камеры охлаждения (I) и нагрева (II).

Штатив состоит из ручек 6, опирающихся на верхнюю часть корпуса, горизонтальных балок 7, перемещающихся вертикально по ручкам 6, и лотка 8 из перфорированного материала, обеспечивающего свободное движение агента.

Лабораторная установка обладает следующими техническими характеристиками:

ДхШхВ – 1х1х1 м; объем камеры нагрева $V = 0,5 \text{ м}^3$; объем камеры охлаждения $V_o = 0,5 \text{ м}^3$; теплопроизводительность ТНУ $Q_{\text{тв}} = 2,5 \text{ кВт}$; холодопроизводительность ТНУ $Q_{\text{хв}} = 2,0 \text{ кВт}$; мощность номинальная электрическая потребляемая из сети $P_n = 0,5 \text{ кВт}$

Зависимость изменения температур воздуха камеры нагрева (T_k) и камеры охлаждения (T_b) при различных начальных температурах окружающего воздуха представлена на рис. 5.

Выводы

По результатам проведенной работы получены следующие выводы:

1. Выявлена закономерность влияния температуры на коэффициент теплоотдачи для влажного воздуха, которая описывается выражением (9).

2. Смоделирована зависимость коэффициента теплоотдачи для сухого воздуха в зависимости от температуры (выражение (12)).

3. Смоделирована зависимость коэффициента теплоотдачи для насыщенного пара (выражение (13)).

4. Выполнена оценка влияния влажности воздуха на коэффициент теплоотдачи.

5. На основании полученных результатов была разработана лабораторная установка зерносушилки на базе теплового насоса.

Список литературы

1. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства: Уч. пособие. – СПб.: СПбГАХИТ, 1998. – 146 с. ISBN 5-89565-005-8.
2. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента теплоотдачи. Методические указания к выполнению практических занятий. – Иваново, – 2007. – 39 с.
3. Донченко А.С., Солошенко В.А., Кашеваров Н.И., Гончаров П.Л., Власенко А.Н., Каличкин В.К., Першукевич П.М., Альт В.В., Лихенко И.Е., Мотовилов К.Я., Иванов Н.М., Чепурин Г.Е., Шкиль Н.А., Шелепов В.Г. Новосибирский научный центр – история становления, достижения и планы на будущее. – М.: «Достижения науки и техники АПК», 2008. – С. 2–14.
4. Жидко В.И., Ресчиков В.А., Уколов В.С. Зерносушение и зерносушилки. – М.: Колос, 1982. – 239 с.
5. Замалеев З.Х., Посохин В.Н., Чефанов В.М. Основы гидравлики и теплотехники: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 352 с. ISBN 978-5-8114-1531-1.
6. Кизуров А.С. Дифференцированная сушка семян. – Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, – 2014. – Т. II. – 208 с.
7. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. Учеб. для ВУЗов. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с.
8. ОСТ 70.10.1-74 Сушильные машины и установки сельскохозяйственного назначения. Программа и методы испытаний. – М.: ЦНИИТЭИ В/О «Союзсельхозтехника», 1977. – 171 с.
9. Руководство пользователя Mathcad [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/soft/Mathcad/UsersGuide/0.asp> (дата обращения 30.12.2015).
10. Теория подобия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.physicalsystems.org/index07.09.0.html> (дата обращения 30.12.2015).