

*К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ  
МОКРОГО ТЕРМОМЕТРА ПРИ СУШКЕ БАРДЫ*

**Т.Г. КОРОТКОВА<sup>1</sup>, И.А. ЖДАМАРОВА<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: korotkova1964@mail.ru;*

<sup>2</sup>*Майкопский государственный технологический университет,  
352700, Российская Федерация, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;  
электронная почта: izhdamarova93@mail.ru*

Совершенствование и модернизация существующих технологических решений по технологии сушки барды и конструкции сушилок требуют детального изучения ее физико-химических свойств, а также технологических режимов и продолжительности процесса сушки. Наличие значительного количества влаги, связанной с твердыми частицами барды адсорбционными, осмотическими и химическими связями, определяет особенности материала, который является жидкостью и переходит в твердое состояние только в конце процесса сушки. Рассмотрен вопрос расчета температуры мокрого термометра для установившегося процесса на примере воды, граничащей с одной стороны с воздухом, а с другой стороны со стеклянной пластиной, через которую теплота также передается воде. Приведено уравнение теплового баланса для системы «воздух – вода – стекло – воздух» для установившегося процесса и формулы для расчета параметров, входящих в него величин. Рассмотрена теплоотдача от воздуха к воде и от воздуха к горизонтальной поверхности стеклянной пластины. Приведены графические зависимости влияния относительной влажности воздуха и его температуры на значение температуры мокрого термометра. Установлено, что наличие стеклянной пластины между водой и воздухом повышает температуру мокрого термометра, что следует учитывать при проектировании новых или модернизации существующих сушильных установок.

**Ключевые слова:** температура мокрого термометра, сушка, коэффициент теплоотдачи, тепловой баланс, теплоотдача от воздуха к воде, теплоотдача от воздуха к стеклу.

В настоящее время отечественное животноводство нуждается в высококалорийных кормах для животных и птицы. К таким высокопродуктивным добавкам относится сухая послеспиртовая барда. Работа спиртовых заводов России сдерживается Федеральным законом № 171-ФЗ «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции и об ограничении потребления (распития) алкогольной продукции», согласно которому производство этилового спирта недопустимо без полной переработки барды или ее утилизации на очистных сооружениях. Совершенствование и модернизация существующих

технологических решений по технологии сушки барды и конструкции сушилок требуют более детального изучения ее физико-химических свойств, а также технологических режимов и продолжительности процесса сушки.

Как показано нами в работах [1, 2] тепловой насос от паров выпаривания барды целесообразно использовать в технологическом процессе брагоректификации. Это обеспечивает экономию энергии при стоимостной оценке 27% и эксергетической оценке 43,7%. Обоснована экономическая целесообразность рекуперации теплоты вторичных паров выпаривания барды в схеме брагоректификации и на стадии ферментативного разваривания. Вопрос использования паров выпаривания барды для последующей ее сушки находится на стадии изучения.

Основным отличием от глубоко исследованных процессов сушки твёрдых материалов является высокая влажность барды, составляющая на выходе из бражной колонны 94-96 % мас. и порядка 70 % мас. после предварительного упаривания барды в выпарной станции. Наличие значительного количества влаги, связанной с твердыми частицами барды адсорбционными, осмотическими и химическими связями, определяет особенности материала, который является жидкостью и переходит в твердое состояние только в конце процесса сушки. В этой связи математическая модель сушки барды может быть частично протестирована с использованием воды в качестве исследуемого материала.

В настоящей работе рассмотрен вопрос расчета температуры мокрого термометра для установившегося процесса на примере воды, граничащей с одной стороны с воздухом, а с другой – со стеклянной пластиной, через которую теплота также передается воде (рисунок 1).

Стационарный процесс наступит после прогрева воды и стеклянной пластины до температуры поверхности воды  $t_{п}$ , после чего вся теплота, подводимая с воздухом к поверхности воды, и теплота, подводимая от воздуха к стеклянной пластине, будут затрачиваться на испарение воды. Температура поверхности будет равна при этом температуре мокрого термометра  $t_{м}$ .

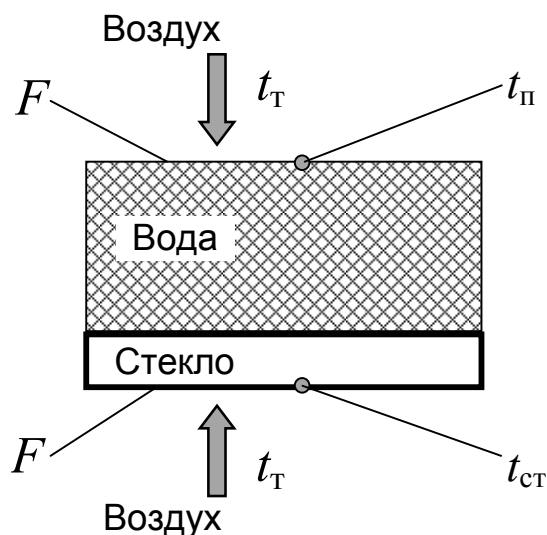


Рисунок 1 – Схема подвода теплоты

Примем температуру сушильного агента (воздуха) постоянной в течение всего процесса сушки и равной  $t_T$ , °С. Относительная влажность воздуха  $\varphi$ , %, поверхность тепло- и массообмена  $F$ , м<sup>2</sup>. Верхняя поверхность воды находится в контакте с воздухом, температура поверхности воды  $t_{II}$ , °С. Нижней поверхностью вода соприкасается со стеклянной пластиной, температура которой со стороны воздуха  $t_{CT}$ , °С. Процесс сушки является установившимся и, следовательно, температуры  $t_{II}$  и  $t_{CT}$  равны между собой и равны температуре мокрого термометра  $t_M$ . Вся теплота, подводимая к воде, затрачивается на ее испарение. Если бы не было границы раздела между водой и воздухом в виде стеклянной пластины, то расчет температуры мокрого термометра осуществлялся по известному уравнению теплового баланса для границы «вода – воздух», приведенному в монографии Кутателадзе [3]. В левой части уравнения (1) – теплота, передаваемая за счет конвекции от воздуха к поверхности воды, правая часть показывает, что вся подводимая теплота затрачивается на испарение воды.

$$\alpha_T F (t_T - t_M) = F \frac{\beta_T (p_H - p_{II}) \cdot r}{\frac{RT_M}{M_B}}, \quad (1)$$

где  $F$  – поверхность теплоотдачи,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности воды,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\beta_T$  – коэффициент массоотдачи от воды к воздуху,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $r$  – удельная теплота парообразования воды при температуре мокрого термометра  $t_M$ ,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $p_H$  – давление насыщения при температуре мокрого термометра  $t_M$ ,  $\text{Па}$ ;  $p_{II}$  – парциальное давление паров воды при температуре воздуха  $t_T$ ,  $\text{Па}$ ;  $M_B$  – молекулярная масса воды,  $M_B = 18 \text{ кг}/\text{кмоль}$ ;  $T_M$  – абсолютная температура мокрого термометра,  $\text{К}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная  $R = 8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Вычисление температуры мокрого термометра  $t_M$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , проводится по уравнению (2) итерационно, например методом последовательных приближений, до достижения совпадения заданного значения температуры мокрого термометра и расчетного с некоторой точностью  $\varepsilon$ .

$$t_M = t_T - \frac{\beta_T (p_H - p_{II}) \cdot r}{\alpha_T \frac{RT_M}{M_B}}. \quad (2)$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи  $\alpha_T$  можно вычислить из теплового критерия Нуссельта  $\text{Nu}_T$  при рассмотрении конвекции в неограниченном объеме. Для сред с  $\text{Pr} \geq 0,5$  рекомендована формула [3]

$$\text{Nu}_T = k(\text{Pr} \cdot \text{Gr})^n, \quad (3)$$

где  $\text{Pr}$  – критерий Прандтля;  $\text{Gr}$  – критерий Грасгофа.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad (4)$$

$$\text{Gr} = \frac{gl^3\beta(t_T - t_M)}{\nu^2}, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $l$  – определяющий линейный размер (характерная длина),  $\text{м}$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения воздуха,  $\text{К}^{-1}$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $k$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от произведения  $\text{Pr} \cdot \text{Gr}$  (таблица 1) [3].

Таблица 1 – Расчетные значения  $k$  и  $n$  в формуле (3)

$\text{Pr} \cdot \text{Gr}$	$k$	$n$
$< 10^{-3}$	0,45	0
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$> 2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

Кинематическая вязкость воздуха связана с динамической вязкостью соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Коэффициент температуропроводности  $a$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , определяется физическими свойствами сушильного агента (воздуха)

$$a = \frac{\lambda}{C\rho},$$

где  $C$  – удельная теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda$  – удельная теплопроводность воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Характерной длиной в критериальном уравнении (3) принято отношение площади поверхности массообмена (поверхности воды) к ее периметру [3]

$$l = \frac{S}{P},$$

где  $S$  – площадь поверхности,  $\text{м}^2$ , и  $P$  – периметр,  $\text{м}$ .

Коэффициент массоотдачи  $\beta_T$ ,  $\text{м}/\text{с}$ , найдем из диффузионного критерия Нуссельта  $\text{Nu}_d$  по аналогии с теплоотдачей

$$\text{Nu}_d = \frac{\beta_T l}{D}, \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Величину  $D$  определим по формуле [4]

$$D = D_0 \left( \frac{T}{273} \right)^{1,8} \cdot \frac{101,3}{p_6}, \quad (7)$$

где  $T$  – абсолютная температура смеси водяного пара и воздуха, К;  $p_6$  – барометрическое давление, кПа, при котором проходит процесс испарения влаги (сушки).

Коэффициент диффузии  $D_0$  при  $t = 0$  °С и барометрическом давлении  $p_6 = 101,3$  кПа для смеси «воздух – водяной пар» составляет  $D_0 = 0,0784$  м<sup>2</sup>/ч или  $D_0 = 2,178 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с [4].

Составим тепловой баланс для случая, приведенного на рисунке 1, когда нижняя граница воды соприкасается с твердым проводящим теплоту материалом. В качестве материала примем стекло.

$$\alpha_T F(t_T - t_{II}) + \alpha_{CT} F(t_T - t_{CT}) = F \frac{\beta_T (p_H - p_{II}) \cdot r}{\frac{RT_{II}}{M_B}}, \quad (8)$$

где  $\alpha_{CT}$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха к стеклу, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_{CT}$  – температура стекла со стороны воздуха, °С;  $T_{II}$  – абсолютная температура поверхности воды, К;  $p_H$  – давление насыщения при температуре поверхности воды  $t_{II}$ , Па.

Слагаемое  $\alpha_{CT}(t_T - t_{CT})$  в уравнении (8) характеризует количество теплоты, подводимое от воздуха к стеклу за счет конвекции. Часть этой теплоты расходуется на нагревание стекла, другая часть передается через стекло воде и затрачивается на нагрев воды и ее испарение. В случае установившегося процесса вся теплота, подводимая от воздуха к стеклу, будет затрачиваться на испарение воды, а температура стекла, воды и поверхности воды выровняются и станут равными температуре мокрого термометра  $t_M$ . В этом случае тепловой

баланс на границе «вода – воздух» с учетом теплоты, приходящей к воде снизу, примет вид

$$\alpha_T F(t_T - t_M) + \alpha_{CT} F(t_T - t_M) = F \frac{\beta_T (p_H - p_{II}) \cdot r}{\frac{RT_M}{M_B}}. \quad (9)$$

Выражение для вычисления температуры мокрого термометра из баланса (9) запишется в виде

$$t_M = t_T - \frac{\beta_T (p_H - p_{II}) \cdot r}{(\alpha_T + \alpha_{CT}) \frac{RT_M}{M_B}}. \quad (10)$$

Анализ уравнения (10) показывает, что значение температуры мокрого термометра  $t_M$  при наличии стеклянной пластины будет больше.

Величину  $\alpha_{CT}$  для случая теплоотдачи от воздуха к твердой горизонтальной поверхности с постоянной температурой стенки определим по выражению (11) [5]

$$Nu = 0,503(Ra\psi(Pr))^{1/4}, \quad (11)$$

где  $Ra$  – критерий Рэлея,  $Ra = Gr \cdot Pr$ ;  $\psi(Pr)$  – функция от критерия Прандтля.

$$\psi(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}. \quad (12)$$

Уравнение (12) рекомендовано для всех случаев естественной конвекции в пограничных слоях [5].

Определим температуру мокрого термометра для обоих случаев, приняв следующие исходные данные. Навеска воды отделена от воздуха стеклянной круглой пластиной диаметром  $d = 94$  мм; температура воздуха  $t_T = 60$  °С; относительная влажность воздуха  $\phi = 10$  %; температурный коэффициент объемного расширения для воздуха в интервале от 0 до 100 °С при давлении 101,3 кПа  $\beta = 3,67 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>; плотность воздуха при температуре 20 °С и давлении 101,3 кПа  $\rho = 1,2047$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость воздуха при

нормальных условиях  $\mu = 17,2 \cdot 10^{-6}$  Па·с; удельная теплопроводность воздуха  $\lambda = 0,025$  Вт/(м·К); удельная теплоемкость воздуха  $C = 1006$  Дж/(кг·К).

При расчете коэффициента диффузии  $D$  по уравнению (7) в качестве температуры  $T$  примем абсолютную температуру мокрого термометра  $T_M$ .

Характерная длина  $l$ , м

$$l = \frac{S}{P} = \frac{\pi d^2 / 4}{\pi d} = \frac{d}{4} = \frac{0,94}{4} = 0,235$$

Парциальное давление вычислим как произведение относительной влажности воздуха  $\phi$ , выраженной в долях, на давление насыщения  $P_H$  при температуре воздуха  $t_T = 60$  °С.

$$P_{II} = \phi P_H. \quad (12)$$

Давление насыщения  $P_H$ , Па, определим по эмпирической формуле, приведенной в [6].

$$P_H = e^{(1500,3+23,5t_T)/(234+t_T)} = e^{(1500,3+23,5 \cdot 60)/(234+60)} = 19910,04. \quad (13)$$

Парциальное давление  $P_{II}$ , Па

$$P_{II} = \phi P_H = 0,1 \cdot 19910,04 = 1991$$

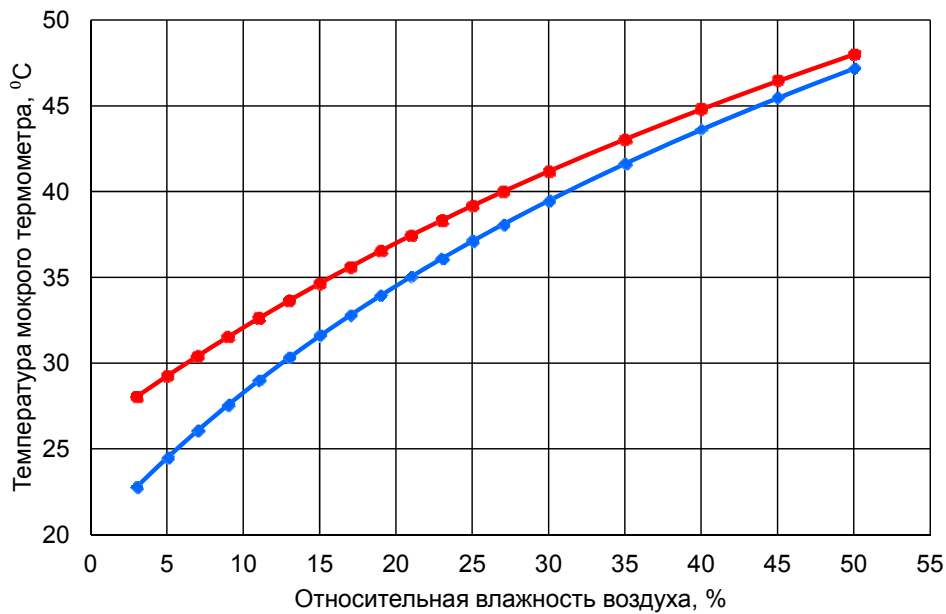
Удельную теплоту парообразования  $r$ , Дж/кг, представим в виде функции от температуры мокрого термометра  $t_M$  [6]

$$r = (-2,5728 \cdot t_M + 2505,3) \cdot 1000.$$

При принятых исходных данных произведение критериев  $Pr \cdot Gr$ , входящих в уравнение (3), находится в диапазоне  $5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$ , тогда  $k = 0,54$  и  $n = 1/4$  (таблица 1).

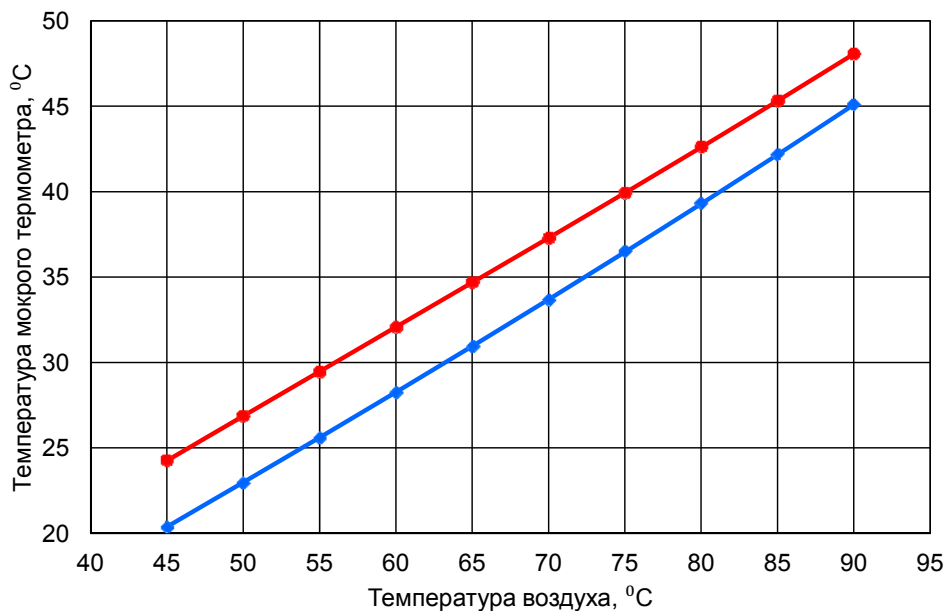
Решая уравнения (2) и (10) методом последовательных приближений, получим, что температура мокрого термометра для случая отсутствия подвода теплоты снизу составила  $t_M = 28,265$  °С, при дополнительном подводе теплоты снизу  $t_M = 32,374$  °С. Влияние относительной влажности воздуха  $\phi$  и температуры воздуха  $t_T$  на  $t_M$  представлено на рисунках 2 и 3.





нижняя линия – без учета влияния стеклянной пластины;  
 верхняя линия – с учетом теплоты через стеклянную пластину

Рисунок 2 – Зависимость температуры мокрого термометра от относительной влажности воздуха при температуре воздуха 60 °C



нижняя линия – без учета влияния стеклянной пластины;  
 верхняя линия – с учетом теплоты через стеклянную пластину

Рисунок 3 – Зависимость температуры мокрого термометра от температуры воздуха при относительной влажности воздуха, равной 10 %

Значение температуры мокрого термометра с учетом подводимой теплоты через стеклянную пластину больше, чем при ее отсутствии. С ростом относительной влажности воздуха значения  $t_m$  сближаются (рисунок 2).

Таким образом, установлено, что наличие стеклянной пластины между водой и воздухом повышает температуру мокрого термометра, что следует учитывать при проектировании новых или модернизации существующих сушильных установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Короткова Т.Г., Левашова Л.М., Мариненко С.С., Константинов Е.Н. Стоимостная и эксергетическая оценка использования тепловых насосов при брагоректификации с выпариванием барды // Известия вузов. Пищевая технология. 2011. № 4 (322). С. 86-88.

2. Левашова Л.М., Устюжанинова Т.А., Короткова Т.Г., Константинов Е.Н. Энергосбережение при производстве этанола // Известия вузов. Пищевая технология. 2011. № 1 (319). С. 68-71.

3. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. - Л.; М.: Государственное энергетическое издательство, 1958. 414 с.

4. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. Учебник для студентов технических вузов. Изд. 2-е, перераб. - М.: Энергия, 1972. 320 с.

5. Мартыненко О.Г. Справочник по теплообменникам. Том 1 / Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.

6. Гаврилкин В.П., Куранов Е.А. Аналитическое определение параметров влажного воздуха // Вестник АГТУ, 2007. № 2 (37). С. 148-151.

#### REFERENCES

1. Korotkova T.G., Levashova L.M., Marinenko S.S., Konstantinov E.N. Stoimostnaja i jeksergetičeskaja ocenka ispol'zovanija teplovyh nasosov pri bragorektifikacii s vyparivaniem bardy // Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija. 2011. № 4 (322). S. 86-88.

2. Levashova L.M., Ustjuzhaninova T.A., Korotkova T.G., Konstantinov E.N. Jenergoberezhenie pri proizvodstve jetanola // Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija. 2011. № 1 (319). S. 68-71.
3. Kutateladze S.S., Borishanskij V.M. Spravochnik po teploperedache. - L.; M.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1958. 414 s.
4. Lebedev P.D. Teploobmennye, sushil'nye i holodil'nye ustanovki. Uchebnik dlja studentov tehniceskikh vuzov. Izd. 2-e, pererab. - M.: Jenergija, 1972. 320 s.
5. Martynenko O.G. Spravochnik po teploobmennikam. Tom 1 / Per. s angl. pod red. B.S. Petuhova, V.K. Shikova. - M.: Jenergoatomizdat, 1987. 560 s.
6. Gavrilkin V.P., Kuranov E.A. Analiticheskoe opredelenie parametrov vlazhnogo vozduha // Vestnik AGTU, 2007. № 2 (37). S. 148-151.

## THE QUESTION OF CALCULATION OF WET BULB TEMPERATURES ON DRYING GRAINS

T.G. KOROTKOVA<sup>1</sup>, I.A. ZHDAMAROVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Kuban State Technological University,  
350072, Russian Federation, Krasnodar, 2, Moskovskaya str.;*  
*e-mail: korotkova1964@mail.ru;*

<sup>2</sup> *Maikop State Technological University,  
352700, Russian Federation, Maikop, 191, Pervomaiskaya str.;*  
*e-mail: izhdamarova93@mail.ru*

The improvement and modernization of existing technological solutions to the grains drying technology and the design of dryers require a detailed study of its physical and chemical properties, as well as technological modes and duration of the drying process. Presence of a significant amount of moisture associated with particles grains adsorption, osmotic and chemical bonds determines the characteristics of the material, which is liquid and passes to a solid state only at the end of the drying process. The problem of calculating the wet bulb temperature for the steady-state process for example water, which borders on the one hand with the air and on the other hand to a glass plate through which heat is also transferred to the water. Powered by the heat balance equation for a system of "air - water - glass - air" for the steady process and the formulas for calculating the parameters of its member values. We consider the heat transfer from air to water and air from the horizontal surface of the glass plate. Shows a graph of the influence of the relative humidity and temperature at the wet bulb temperature. It has been established that the presence of the glass plate between water and air increases the temperature of the wet thermometer, which should be considered when designing a new or upgrading existing dryers.

**Key words:** wet bulb temperature, drying, heat transfer coefficient, heat balance, the heat transfer from air to water heat transfer from air to glass.