

УДК 663.5

UDC 663.5

05.00.00 Технические науки

Technical Sciences

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛО-МАССООБМЕНА ПРИ СУШКЕ
РАСТВОРА БЕЛКА В СЛУЧАЕ
ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT AND MASS
TRANSFER DURING DRYING OF PROTEIN
SOLUTIONS IN THE CASE OF FORCED
CONVECTION**

Короткова Татьяна Германовна
д.т.н., профессор, SPIN-код: 3212-7120

Korotkova Tatyana Germanovna
Doct.Tech.Sci., professor

Константинов Евгений Николаевич
д.т.н., профессор, AuthorID: 144736

Konstantinov Evgeny Nikolaevich
Doct.Tech.Sci., professor

Данильченко Александра Сергеевна
ассистент, SPIN-код: 1470-5800
*Кубанский государственный технологический
университет, г.Краснодар, Россия*

Danilchenko Aleksandra Sergeevna
assistant
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

Артамонова Валентина Викторовна
к.т.н., доцент, SPIN-код: 8742-4044

Artamonova Valentina Viktorovna
Cand.Tech.Sci., assistant professor

Лунина Людмила Викторовна
к.т.н., доцент, SPIN-код: 1445-6793
*Майкопский государственный технологический
университет, г. Майкоп, Россия*

Lunina Ludmila Viktorovna
Cand.Tech.Sci., assistant professor
*Maikop State Technological University, Maikop,
Russia*

Проведено экспериментальное исследование процесса испарения при температуре 105 °С модельного раствора яичного белка в дистиллированной воде с целью оценки величины отношения коэффициента теплоотдачи от воздуха к воде к коэффициенту массотдачи от поверхности воды в воздух при испарении со свободной поверхности при вынужденной конвекции. Испарение раствора проводили в сушильном шкафу Memmert класса Basic (Германия), оснащенный принудительной циркуляцией воздуха, панелью управления с одним дисплеем и устройством контроля температуры. Для определения температуры поверхности, при которой происходит основной процесс испарения воды из раствора, провели эксперимент при тех же условиях путем измерения температуры среднего слоя навески воды, помещенной в чашку Петри в сушильный шкаф с помощью датчика - цифрового мультиметра Mastech серии M838. Установлено, что коэффициент теплоотдачи от воздуха к воде почти в тысячу раз больше коэффициента массотдачи от поверхности воды в воздух

We have performed an experimental study of the evaporation process at a temperature of 105 °C for the egg white model solution in distilled water to evaluate the ratio of the heat transfer coefficient from air to water ratio mass transfer to the water surface into the air by evaporation from the free surface in a forced convection. Evaporation of the solution was carried out in a Memmert oven of class Basic (Germany) equipped with forced air circulation, the control panel with a display and a temperature control device. To determine the surface temperature at which the main evaporation of water from the process solution, the experiment conducted under the same conditions by measuring the average temperature of the layer of water sample, placed in a Petri dish in an oven with a sensor - DMM Mastech M838 series. It is found that the coefficient of heat transfer from air to water almost a thousand times greater than the coefficient mass transfer from the water surface into the air

Ключевые слова: ВЫНУЖДЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ
ТЕПЛОМАССООБМЕН, ЯИЧНЫЙ БЕЛОК
Doi: 10.21515/1990-4665-121-047

Keywords: FORCED CONVECTION, HEAT AND
MASS TRANSFER, EGG WHITE

Куриный яичный белок является эталоном биологической ценности для человека из-за его полной усвояемости и аминокислотного состава.

Такой же биологической ценностью белок является и для животных и птицы. Это связано с тем, что он содержит протеин, углеводы, минеральные вещества и аминокислоты, которые организм синтезировать не может. Одним из источников полноценного кормового белка является зерновая барда – отход спиртового производства. Основная ценность зерновой барды заключается в протеине [1].

В данной работе проведено экспериментальное исследование процесса испарения при температуре 105 °С модельного раствора яичного белка в дистиллированной воде (таблица 1) с целью оценки величины отношения коэффициента теплоотдачи α_T от воздуха к воде к коэффициенту массотдачи β_T от поверхности воды в воздух при испарении со свободной поверхности при вынужденной конвекции.

Таблица 1 – Экспериментальные данные процесса испарения при температуре 105 °С модельного раствора яичного белка с дистиллированной водой

Наименование	Показатель
Время сушки, ч	1
Масса чашки Петри, г	104,435
Масса чашки Петри с водой, г	124,235
Масса воды в чашке Петри, г	19,8 (\approx 20 мл воды)
Масса чашки Петри с водой и белком, г	125,155
Масса сырого белка, г	0,926 (\approx 1 мл)
Масса чашки Петри с сухим белком, г	104,547
Масса высушенного белка, г	0,112

Проведение данных исследований обусловлено целями изучения параметров адсорбционного взаимодействия белка с водой при сушке послеспиртовой барды. Температура в лаборатории по сухому термометру составляла $t_0 = 26,5$ °С, по мокрому – $t_{0,m} = 21,8$ °С в соответствии с показаниями гигрометра психрометрического ВИТ-2 (рисунок 1).

Относительная влажность воздуха при данных показаниях термометров составила $\varphi_0 = 63,9\%$.

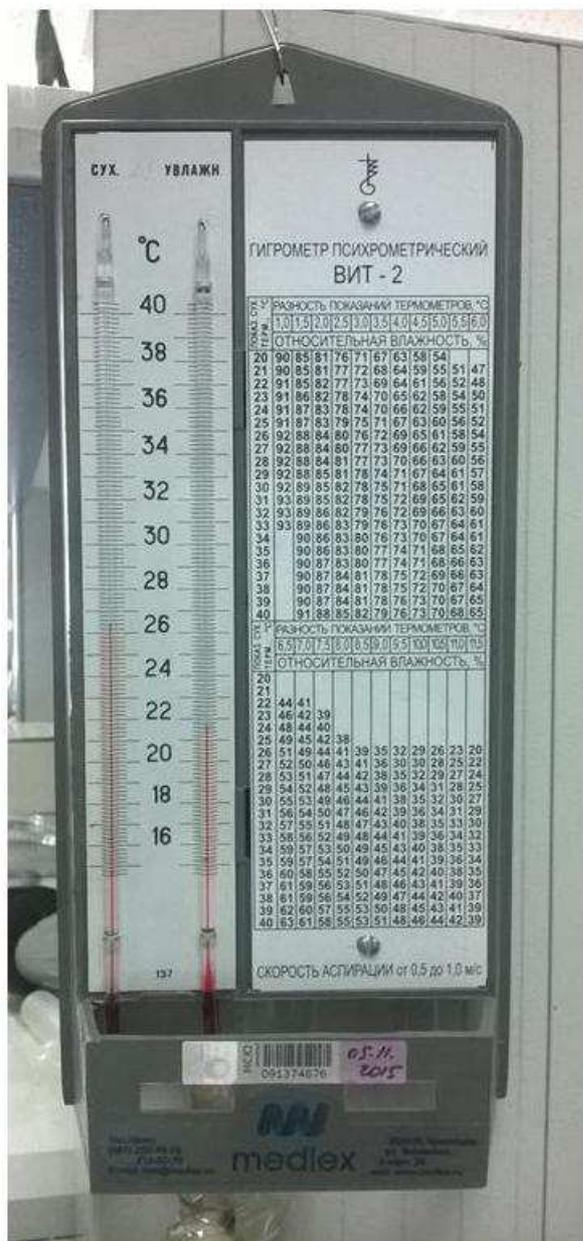
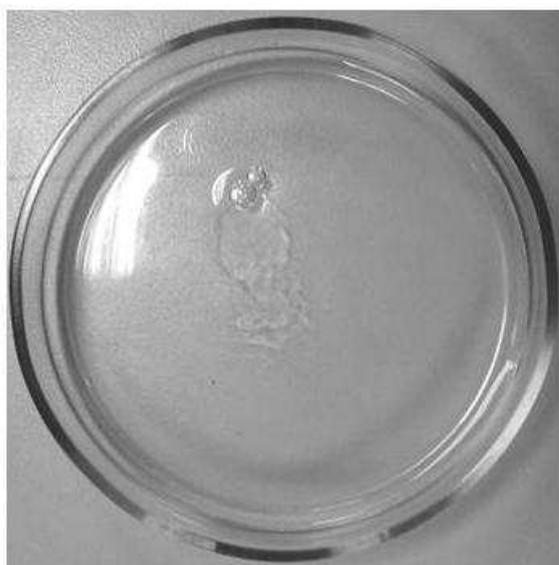


Рисунок 1 – Гигрометр психрометрический ВИТ-2

Рисунок 2 – Сушильный шкаф Metmert (Германия)

Испарение раствора проводили в сушильном шкафу Metmert класса Basic (Германия) (рисунок 2), оснащённом принудительной циркуляцией воздуха, панелью управления с одним дисплеем и устройством контроля температуры (платиновый датчик температуры Pt100 класса А).



а) белок 1 мл + вода 20 мл



б) белок, размешанный в воде



в) после 30 мин испарения



г) пленка белка после испарения воды

Рисунок 3 – Внешний вид белка в процессе испарения воды

По температуре сухого термометра $t_0 = 26,5^\circ\text{C}$ вычислили давление насыщения $p_{\text{н}}(t_0)$, Па, по выражению, приведенному в [2].

$$p_{\text{н}}(t_0) = e^{(1500,3+23,5t_0)/(234+t_0)} = e^{(1500,3+23,5 \cdot 26,5)/(234+26,5)} = 3463,05. \quad (1)$$

По измеренному значению относительной влажности в помещении $\varphi_0 = 63,9 \%$ и найденному давлению насыщения $p_{\text{н}}(t_0) = 3463,05$ Па, определили значение парциального давления в воздухе $p_{\text{п}0}$ Па.

$$p_{п0} = \frac{p_{н(t_0)}\Phi_0}{100} = \frac{3463,05 \cdot 63,9}{100} = 2212,89. \quad (2)$$

Влагосодержание воздуха в лаборатории d_0 , г/кг, составило

$$d_0 = \frac{622 p_{п0}}{p - p_{п0}} = \frac{622 \cdot 2212,89}{101325 - 2212,89} = 13,9. \quad (3)$$

Давление насыщения $p_{н(t_T)}$, Па, в сушильном шкафу (термостате) определено по выражению (1) при температуре в шкафу $t_T = 105$ °С.

$$p_{н(t_T)} = e^{(1500,3+23,5t_T)/(234+t_T)} = e^{(1500,3+23,5 \cdot 105)/(234+105)} = 121106,4. \quad (4)$$

Сушильный шкаф Memmert снабжен принудительной вентиляцией, влияющей на коэффициенты тепло- и массообмена при испарении воды из раствора, изменение которых сказывается на температуре поверхности. Для определения температуры поверхности, при которой происходит основной процесс испарения воды из раствора, провели эксперимент при тех же условиях путем измерения температуры среднего слоя навески воды, помещенной в чашку Петри в сушильный шкаф с помощью датчика - цифрового мультиметра Mastech серии M838. Температура навески воды составила $t_{п} = 56$ °С (рисунок 4).

Известно, что при нагревании до температуры 58-65 °С белок свертывается, превращаясь в твердую массу [3]. Измеренная температура мокрого термометра не превышала температуру свертывания белка, что и было подтверждено нами в экспериментальных исследованиях (рисунок 3). Авторами [4] исследовано влияние теплового воздействия на свойства яичного белка. Установлено, что повышение температуры приводит к необратимой потере растворимости. Анализ электрофоретических профилей нативных белков показал, что белок включает разнообразие белков в яичном белке. Когда яичный белок подвергается воздействию температуры, его глобулярные белки склонны к изменениям в структуре и конформации.



Рисунок 4 – Измерение температуры навески воды в среднем слое

Определим соотношение коэффициентов теплоотдачи α_T от воздуха к воде к коэффициенту массотдачи β_T от поверхности воды в воздух в период испарения воды со свободной поверхности. В первом приближении теплота, поведенная от воздуха к воде, будет затрачиваться на ее испарение. Запишем известное уравнение теплового баланса для поверхности

$$\alpha_T(t_T - t_{II}) = \frac{\beta_T(p_H - p_{II}) \cdot r}{\frac{RT_{II}}{M_B}}, \quad (5)$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности воды, Вт/(м²·К); t_T – температура в сушильном шкафу, °С; t_{II} – температура поверхности испарения, °С; β_T – коэффициент массоотдачи от воды к воздуху, м/с; p_H – давление насыщенных паров воды, Па, при температуре поверхности воды t_{II} ; p_{II} – парциальное давление паров воды, Па, при температуре в сушильном шкафу t_T ; r – удельная теплота парообразования воды, Дж/кг, при температуре поверхности воды t_{II} ; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8314$ Дж/(кмоль·К); T_{II} – абсолютная температура поверхности воды, К; M_B – молекулярная масса воды, $M_B = 18$ кг/кмоль.

Из уравнения (5) следует

$$\frac{\alpha_T}{\beta_T} = \frac{(p_H - p_{II}) \cdot r}{(t_T - t_{II}) \frac{RT_{II}}{M_B}} \quad (6)$$

Давление насыщения p_H , Па, в сушильном шкафу определено по выражению (1) при температуре поверхности $t_{II} = 56$ °С.

$$p_{H(t_T)} = e^{(1500,3+23,5t_{II})/(234+t_{II})} = e^{(1500,3+23,5 \cdot 56)/(234+56)} = 16504,35. \quad (4)$$

Для определения парциального давления паров воды p_{II} , Па, при температуре в сушильном шкафу $t_T = 105$ °С, найдем влагосодержание d , г/кг, путем совместного решения уравнений изотерм сухого и мокрого термометров. Изотерма сухого термометра при температуре $t_T = 105$ °С.

$$I = C_{\text{возд}} t_T + \frac{d}{1000} (r_0 + C_{II} t_T), \quad (5)$$

где I – энтальпия влажного воздуха в сушильном шкафу, Дж/кг; $C_{\text{возд}}$ – удельная теплоемкость сухого воздуха $C_{\text{возд}} = 1006$ Дж/(кг·К); r_0 – теплота парообразования, для воды при 0 °С равна $r_0 = 2501000$ Дж/кг; C_{II} – удельная теплоемкость сухого пара $C_{II} = 1860$ Дж/(кг·К).

Изотерма мокрого термометра

$$I = I_0 + \frac{d}{1000} C_B t_M, \quad (6)$$

где C_B – удельная теплоемкость воды при температуре мокрого термометра t_M , $C_B = 4180$ Дж/(кг·К) при $t_M = t_{\Pi} = 56$ °С.

На рисунке 5 приведено графическое определение влагосодержания d на пересечении изотерм $t_M = 56$ °С и $t_T = 105$ °С.

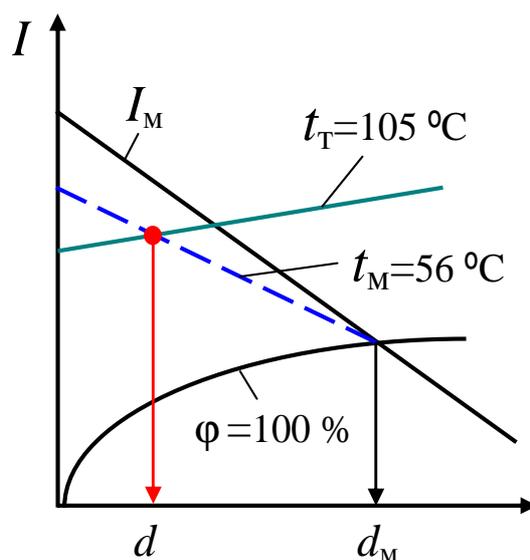


Рисунок 5 – Графическое определение влагосодержания

При $d = d_M$ уравнение (6) принимает вид

$$I_M = I_0 + \frac{d_M}{1000} C_B t_M. \quad (7)$$

Вычислим влагосодержание d_M , г/кг, и энтальпию I_M , Дж/кг

$$d_M = \frac{622 p_{\Pi}}{P - p_{\Pi}} = \frac{622 p_H}{P - p_H} = \frac{622 \cdot 16504,35}{101325 - 16504,35} = 121, \quad (8)$$

где давления $p_{\Pi} = p_H$ в точке пересечения изотермы мокрого термометра $t_M = 56$ °С и линии относительной влажности воздуха $\phi = 100$ %. Давление насыщения p_H определено по выражению (4) при температуре поверхности $t_{\Pi} = 56$ °С.

$$I_M = C_{\text{возд}} t_{\text{п}} + \frac{d_M}{1000} (r_0 + C_{\text{п}} t_{\text{п}}) = 1006 \cdot 56 + \frac{121}{1000} (2501000 + 1860 \cdot 56) = 3715604. \quad (9)$$

Определим из выражения (7) I_0 , Дж/кг

$$I_0 = I_M - \frac{d_M}{1000} C_{\text{в}} t_{\text{м}} = 3715604 - \frac{121}{1000} \cdot 4180 \cdot 56 = 3432367. \quad (10)$$

В точке пересечения изотерм сухого $t_{\text{т}} = 105$ °С и мокрого термометров $t_{\text{м}} = 56$ °С энтальпии равны. Приравнивая правые части уравнений (5) и (6), получим

$$C_{\text{возд}} t_{\text{т}} + \frac{d}{1000} (r_0 + C_{\text{п}} t_{\text{т}}) = I_0 + \frac{d}{1000} C_{\text{в}} t_{\text{м}}. \quad (11)$$

Откуда d , г/кг

$$d = \frac{1000 \cdot (I_0 - C_{\text{возд}} t_{\text{т}})}{r_0 + C_{\text{п}} t_{\text{т}} - C_{\text{в}} t_{\text{м}}} = \frac{1000 \cdot (3432367 - 1006 \cdot 105)}{2501000 + 1860 \cdot 105 - 4180 \cdot 56} = 96,5. \quad (12)$$

Вычислим парциальное давление воздуха в сушильном шкафу $p_{\text{п}}$, Па

$$p_{\text{п}} = \frac{Pd}{622 + d} = \frac{101325 \cdot 96,5}{622 + 96,5} = 13608,7. \quad (13)$$

Теплоту парообразования r , Дж/кг, входящую в уравнение (6), определим по выражению, приведенному в [2]

$$r = 2501000 - 2362 \cdot t_{\text{п}} = 2501000 - 2362 \cdot 56 = 2368728. \quad (14)$$

Подставляя найденные значения в выражение (6), получим

$$\frac{\alpha_{\text{т}}}{\beta_{\text{т}}} = \frac{(p_{\text{н}} - p_{\text{п}}) \cdot r}{(t_{\text{т}} - t_{\text{п}}) \frac{RT_{\text{п}}}{M_{\text{в}}}} = \frac{(16504,35 - 13608,7) \cdot 2368728}{(105 - 56) \cdot \frac{8314 \cdot (273 + 56)}{18}} = 921,15. \quad (15)$$

Таким образом, коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{т}}$ от воздуха к воде почти в тысячу раз больше коэффициента массотдачи $\beta_{\text{т}}$ от поверхности воды в воздух в период испарения воды со свободной поверхности для сушильного шкафа Memmert, снабженного принудительной вентиляцией, что следует учесть при идентификации экспериментальных данных. Такое же соотношение получено нами при исследовании испарения воды со

свободной поверхности в условиях естественной конвекции [5, 6].

Список литературы

1. Егоров И., Послеспиртовая барда и пивная дробина в кормлении птицы / И. Егоров, Ш. Имангулов, Г. Игнатова, П. Паньков, Б. Розанов, С. Кислюк // Комбикорма, 2006. – № 2.
2. Гаврилкин В.П., Куранов Е.А. Аналитическое определение параметров влажного воздуха // Вестник АГТУ, 2007. № 2 (37). С. 148-151.
3. Яйца и яичные продукты <http://www.hlebopechka.net/h61.php>
4. Effect of Heat on Egg White Proteins / Zoubida Akkouche, Lyes Aissat, Khodir Madani // International Conference on Applied Life Sciences (ICALS2012) Turkey, September 10-12, 2012. p. 407-413.
5. Константинов Е.Н., Ксандопуло С.Ю., Короткова Т.Г., Данильченко А.С. Математическая модель нестационарного процесса испарения жидких растворов // Известия вузов. Пищевая технология, 2015. № 5-6. С. 82-86.
6. Короткова Т.Г., Данильченко А.С., Сиюхов Х.Р., Константинов Е.Н. Идентификация математической модели нестационарного процесса испарения жидкости // Известия вузов. Пищевая технология, 2016. № 1. С. 71-74.

References

1. Egorov I., Poslespirtovaja barda i pivnaja drobina v kormlenii pticy / I. Egorov, Sh. Imangulov, G. Ignatova, P. Pan'kov, B. Rozanov, S. Kisljuk // Kombikorma, 2006. – № 2.
2. Gavrilkin V.P., Kuranov E.A. Analiticheskoe opredelenie parametrov vlazhnogo vozduha // Vestnik AGTU, 2007. № 2 (37). S. 148-151.
3. Jajca i jaichnye produkty <http://www.hlebopechka.net/h61.php>
4. Effect of Heat on Egg White Proteins / Zoubida Akkouche, Lyes Aissat, Khodir Madani // International Conference on Applied Life Sciences (ICALS2012) Turkey, September 10-12, 2012. p. 407-413.
5. Konstantinov E.N., Ksandopulo S.Ju., Korotkova T.G., Danil'chenko A.C. Matematicheskaja model' nestacionarnogo processa isparenija zhidkih rastvorov // Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija, 2015. № 5-6. S. 82-86.
6. Korotkova T.G., Danil'chenko A.S., Sijuhov H.R., Konstantinov E.N. Identifikacija matematicheskij modeli nestacionarnogo processa isparenija zhidkosti // Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija, 2016. № 1. S. 71-74.