

*ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МАССООБМЕНА СИСТЕМЫ «ВОДА – ВОЗДУХ»
НА ТЕМПЕРАТУРУ МОКРОГО ТЕРМОМЕТРА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ
КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ*

А.С. ДАНИЛЬЧЕНКО, Т.Г. КОРОТКОВА

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: bagira.ask@rambler.ru; korotkova1964@mail.ru*

Приведены экспериментальные и расчетные данные по кинетике прогрева воды объемом 50 мл при вынужденной конвекции в замкнутом объеме с целью определения влияния поверхности массообмена на температуру мокрого термометра в процессе испарения свободной влаги. Изменение температуры в период прогрева изучали с помощью датчика цифрового мультиметра Mastech серии M838, помещая в сушильный шкаф Memmert класса Basic (Германия) чашку Петри с водой в количестве 50 мл. Сушильный шкаф оснащен принудительной циркуляцией воздуха. Фиксировали время и изменение температуры прогрева воды. Экспериментально установлено, что увеличение поверхности массообмена приводит к увеличению температуры мокрого термометра, что следует учитывать при сушке термолабильных материалов. Обработка экспериментальных данных проведена по разработанной математической модели.

Ключевые слова: массообмен, вынужденная конвекция, система «вода – воздух», замкнутый объем.

В процессе сушки термолабильных жидкостей, содержащих компоненты, склонных к разложению при повышенных температурах, в основном учитывают значение температуры сушильного агента, не принимая во внимание количество свободной влаги и поверхность массообмена между влагой и сушильным агентом. Известно, что удаление свободной влаги происходит при температуре мокрого термометра, а период прогрева характеризуется малым отрезком времени и незначительной скоростью удаления влаги из материала. Спиртовая барда относится к жидким и вязким растворам, содержащим белки, жиры, углеводы и другие ценные компоненты. Поэтому ее используют в качестве добавки в корм животным. Температуру сушки барды поддерживают не выше 60 °С для исключения денатурации белков. Так как сушка является энергоемким процессом, то важным показателем является продолжительность сушки и конечная влажность высушиваемого материала. В процессе сушки используется воздух заданных

параметров. От температуры воздуха, скорости его движения, поверхности массообмена между воздухом и материалом зависит продолжительность процесса сушки, составной частью которой является период прогрева материала. В литературе отсутствуют данные по изучению влияния поверхности массообмена на температуру мокрого термометра в процессе испарения свободной влаги, а зависимости изменения влагосодержания материала во времени представлены для первого и второго периодов сушки.

В данной работе приведены экспериментальные и расчетные данные по кинетике прогрева воды объемом 50 мл при вынужденной конвекции воздуха в замкнутом объеме с целью определения влияния поверхности массообмена на температуру мокрого термометра в процессе испарения свободной влаги.

Эксперимент проходил в следующей последовательности. В чашку Петри заливали дистиллированную воду в количестве 50 мл и ставили в сушильный шкаф Memmert класса Basic (Германия), оснащенный принудительной циркуляцией воздуха, панелью управления с одним дисплеем и устройством контроля температуры (платиновый датчик температуры Pt100 класса А). Предварительно шкаф прогревали до 60 °С. Пустые чашки Петри и чашки Петри с водой взвешивали на весах (рисунок 1). В воду опускали датчик цифрового мультиметра Mastech серии M838 и определяли начальную температуру воды. Датчик закрепляли таким образом, чтобы измерение температуры соответствовало среднему слою. Чашку Петри помещали в сушильный шкаф и закрывали его, а мультиметр помещали около шкафа (рисунок 2). Наблюдали за показаниями температуры на мультиметре и записывали время и значение температуры. После прекращения изменения температуры продолжали наблюдение еще в течение 15 минут. Аналогично провели опыт для двух чашек Петри, в каждую из которых была залита дистиллированная вода в количестве 50 мл. Опыты проводились в разные дни, поэтому начальная температура воды в эксперименте 1 с одной чашкой Петри составила 26 °С, а в эксперименте 2 с двумя чашками Петри, как показано на рисунке 2 г), – 28 °С.



а) вес пустой чашки Петри № 1



б) вес чашки Петри № 1 с водой



в) вес пустой чашки Петри № 2



г) вес чашки Петри № 2 с водой

Рисунок 1 – Определение веса чашки Петри и чашки Петри с водой



конечная температура прогрева: а) одна чашка Петри; б) и в) две чашки Петри;
г) начальное показание температуры цифрового мультиметра Mastech (две чашки Петри)
Рисунок 2 – Наглядное исполнение экспериментов и показания приборов

Экспериментальные данные по кинетике прогрева воды обоих экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные по кинетике прогрева воды

Эксперимент 1 – одна чашка Петри			
Температура в сушильном шкафу, °С			60
Объем воды, мл			50
Продолжительность испарения			Температура, °С
час:мин:сек	сек	мин	
11:45:54	0	0	26
11:46:07	13	0,217	27
11:46:48	54	0,900	28
11:47:26	92	1,533	29
11:47:42	108	1,800	30
11:48:35	161	2,683	31
11:49:14	200	3,333	32
11:49:51	237	3,950	33
11:50:41	287	4,783	34
11:51:26	332	5,533	35
11:52:36	402	6,700	36
11:53:37	463	7,717	37
11:54:44	530	8,833	38
11:56:42	648	10,800	39
12:01:46	952	15,867	40
12:04:42	1128	18,800	41
Эксперимент 2 – две чашки Петри			
Масса чашки Петри 1, г			104,4398
Масса чашки Петри 1 с водой (≈ 50 мл), г			153,2433
Масса чашки Петри 2, г			103,3408
Масса чашки Петри 2 с водой (≈ 50 мл), г			151,9570
Температура в сушильном шкафу, °С			60
Продолжительность испарения			Температура, °С
час:мин:сек	сек	мин	
10:28:59	0	0	28
10:29:21	22	0,367	29
10:29:35	36	0,600	30
10:30:29	90	1,500	31
10:30:44	105	1,750	32
10:31:26	147	2,450	33
10:32:03	184	3,067	34
10:32:57	238	3,967	35
10:33:20	261	4,350	36
10:34:06	307	5,117	37
10:35:22	383	6,383	38
10:36:06	427	7,117	39
10:37:19	500	8,333	40
10:39:03	604	10,067	41
10:42:28	809	13,483	42
10:55:07	1568	26,133	43

Обработка экспериментальных данных проведена по разработанной математической модели, приведенной в работе [1]. Приход теплоты включает теплоту, передаваемую за счет конвекции к поверхности воды; теплоту, передаваемую за счет конвекции от воздуха к стеклянной пластине и теплоту за счет неэквимолярного переноса вещества [2, 3]. Подводимая теплота расходуется на испарение влаги из воды; нагревание стеклянной пластины и нагревание воды. В работе [4] показано, что наличие стеклянной пластины между водой и воздухом повышает температуру мокрого термометра.

В [1] записаны уравнения для расчёта температур поверхности воды и стеклянной пластины со стороны воздуха и со стороны воды.

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$F\alpha_T(t_T - t_{\Pi})d\tau + F\alpha_{CT}(t_T - t_{CT})d\tau = \\ = \frac{F\beta_T(p_H - p_{\Pi}) \cdot r}{\frac{RT_{\Pi}}{M_B}}d\tau + GC_g dt_g + G_{CT}C_{CT}dt_{CT}, \quad (1)$$

где F - поверхность теплообмена, м²; α_T - коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности воды, Вт/(м²·К); α_{CT} - коэффициент теплоотдачи от воздуха к пластине (стеклу), Вт/(м²·К); β_T - коэффициент массоотдачи от воды к воздуху, м/с; t_T - температура сушильного агента (воздуха) в сушильном шкафу, °С; t_{Π} - температура поверхности воды, °С; t_{CT} - температура пластины (стекла) со стороны воздуха, °С; t_g - температура воды в ядре, °С; τ - время сушки материала, с; p_H - давление насыщенных паров воды, Па, при температуре поверхности воды t_{Π} ; p_{Π} - парциальное давление паров воды, Па, в сушильном шкафу; M_B - молекулярная масса воды, кг/кмоль; R - универсальная газовая постоянная, $R = 8314$ Дж/(кмоль·К); T_{Π} - абсолютная температура поверхности воды, К; r - удельная теплота парообразования воды, Дж/кг, при температуре поверхности воды t_{Π} ; dt_g - приращение температуры воды за время $d\tau$; dt_{CT} - приращение температуры стеклянной пластины за время $d\tau$.

Уравнение теплового баланса (1) является справедливым для обоих экспериментов, несмотря на то, что в эксперименте с двумя чашками Петри поверхность массообмена в два раза больше. В этом случае в два раза увеличивается и количество теплоты, затраченное на нагрев стекла $G_{ст} C_{ст} dt_{ст}$ и на нагрев воды $GC_g dt_g$. Поэтому коэффициент 2 в левой и правой частях уравнения (1) сокращается.

Для учета вынужденной конвекции вычисление коэффициентов теплоотдачи от воздуха к поверхности воды α_T и от воздуха к стеклу $\alpha_{ст}$ проводили по следующим критериальным уравнениям.

Коэффициент теплоотдачи для испарения воды со свободной поверхности определяли из критериального уравнения, предложенного А.В. Нестеренко, которое учитывает влияние массообмена на коэффициент теплообмена при конвективной сушке с помощью критерия Гухмана Gu [5]

$$Nu_f = Nu_0 + A Re_f^n Pr_f^{0,33} Gu^{0,135}, \quad (2)$$

где Nu_0 – величина критерия Nu при $Re=0$ $Nu_0 = 2$.

Re – критерий Рейнольдса; $Re_f = \frac{vl}{\nu}$;

Pr – критерий Прандтля $Pr_f = \frac{\nu c \rho}{\lambda} = \frac{\mu c}{\lambda}$;

Gu – критерий Гухмана $Gu = \frac{T_c - T_{п}}{T_c}$,

где ν - кинематическая вязкость воздуха, м/с; c - теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); ρ - плотность воздуха, кг/м³; μ - динамическая вязкость воздуха, Па·с; λ - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); v – скорость движения воздуха, м/с; T_c и $T_{п}$ – температура среды и поверхности испаряющейся воды, К; l - определяющий линейный размер

$$l = \frac{S}{\Pi} = \frac{\frac{\pi d_{п}^2}{4}}{\pi d_{п}} = \frac{d_{п}}{4},$$

где S и Π – площадь и периметр увлажненной поверхности, соответственно; d_{Π} – эквивалентный диаметр поверхности испарения, м.

Скорость движения воздуха определена в соответствии с маркой центробежного вентилятора фирмы EBM (производительностью до $V = 180$ м³/ч) AC axial fans Series 4000 N 119 x 119 x 38 мм, где $D = 0,119$ м – диаметр вентилятора. Скорость сушильного агента составила $v = 4,5$ м/с.

Индекс f у критериев, входящих в формулу (2), показывает, что их значения следует брать при средней температуре газового потока. Постоянные A и n зависят от критерия Re [5]. Приняты для $200 < Re < 25000$ и составляют в результате идентификации модели $A = 0,53$ и $n = 0,57$.

Для $\alpha_{ст}$ использовано критериальное уравнение, учитывающее температурную коррекцию [6]

$$Nu = B Re^{0,648} Pr^{0,4} \left(\frac{T_w}{T_b} \right)^{6,028}, \quad (3)$$

где T_w – температура поверхности стенки, К; T_b – средняя объемная температура воздуха, К; B – коэффициент.

В критериях, входящих в уравнение (3), определяющим линейным размером принята величина L , м

$$L = \frac{4S}{\Pi},$$

где S и Π – площадь и периметр увлажненной поверхности, соответственно.

Принято $T_w = t_{ст} + 273$, $T_b = t_t + 273$. При идентификации определено $B = 0,03$.

Коэффициенты теплоотдачи при свободной конвекции к воде определены выражениями [7]

$$\alpha_{g1} = 128 \cdot \left(\frac{t_d - t_g}{l} \right)^{1/4}; \quad \alpha_{g2} = 128 \cdot \left(\frac{t_{\Pi} - t_g}{l} \right)^{1/4}. \quad (4)$$

Парциальное давление паров воды в сушильном шкафу определено по экспериментальным значениям температуры воздуха в сушильном шкафу

$t_T = 60$ °С и температуры мокрого термометра $t_M = 41$ °С и $t_M = 43$ °С. Последняя принята равной конечной температуре воды, когда закончился период прогрева и наступил период удаления свободной влаги. Парциальное давление составило для эксперимента с одной чашкой Петри $P_n = 6572,3$ Па и для эксперимента с двумя чашками Петри $P_n = 7567,8$ Па.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных представлено на рисунке 3.

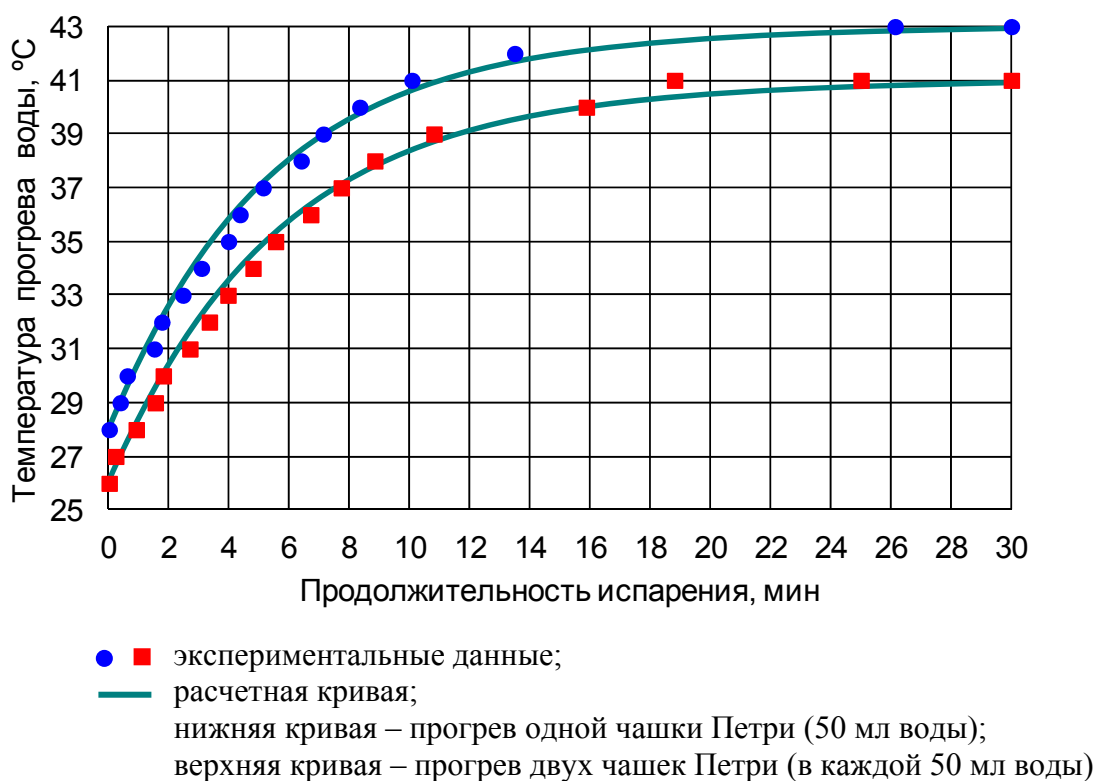


Рисунок 3 – Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

Таким образом, поверхность массообмена между водой и воздухом оказывает влияние на температуру мокрого термометра при вынужденной конвекции воздуха в замкнутом объеме. Экспериментально установлено, что увеличение поверхности массообмена приводит к увеличению температуры мокрого термометра при той же температуре сушильного агента (воздуха), что следует учитывать при сушке термолабильных материалов и проектировании сушильных установок для жидких и вязких растворов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Константинов Е.Н. Исследование диффузии и тепломассообмена в многокомпонентных смесях в приложении к математическому моделированию процессов химической технологии: Дис. ... д-ра техн. наук, 05.17.08. - Москва, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 1975. 374 с.

3. Константинов Е.Н., Петин В.Ф., Теляков Э.Ш., Кузнециков В.А. Массообмен в газовой фазе при неэквимолярном переносе вещества в пленочной колонне // Инженерно-физический журнал, 1971. № 2. Т. 21.

4. Короткова Т.Г., Ждамарова И.А. К вопросу расчета температуры мокрого термометра при сушке барды [Электронный ресурс] // Научные труды КубГТУ: электрон. сетевой политематич. журн. 2015. № 9. С. 112-122. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/516> (дата обращения: 09.08.2016).

5. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок.-М.-Л., Госэнергоиздат, 1962. 320 с.

6. Shobhana Singh, Subodh Kumar. Development of convective heat transfer correlations for common designs of solar dryer // Energy Conversion and Management 64 (2012) 403–414.

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

REFERENCES

1. Konstantinov E.N., Ksandopulo S.Yu., Korotkova T.G., Danilchenko A.C. Matematicheskaya model nestatsionarnogo protsessa ispareniya zhidkikh rastvorov // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya, 2015. № 5-6. S. 82-86.

2. Konstantinov E.N. Issledovanie diffuzii i teplomassoobmena v mnogokomponentnykh smesyakh v prilozhenii k matematicheskomu modelirovaniyu protsessov khimicheskoy tekhnologii: Dis. ... d-ra tekhn. nauk, 05.17.08. - Moskva, <http://ntk.kubstu.ru/file/1147>

Rossiyskiy khimiko-tehnologicheskiiy universitet im. D.I. Mendeleeva, 1975. 374 s.

3. Konstantinov E.N., Petin V.F., Telyakov E.Sh., Kuznechikov V.A. Massoobmen v gazovoy faze pri neekvimolyarnom perenose veshchestva v plenochnoy kolonne // Inzhenerno-fizicheskiiy zhurnal, 1971. № 2. T. 21.

4. Korotkova T.G., Zhdamarova I.A. K voprosu rascheta temperatury mokrogo termometra pri sushke bardy [Elektronnyy resurs] // Nauchnye trudy KubGTU: elektron. setevoy politematich. zhurn. 2015. № 9. S. 112-122. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/516> (data obrashcheniya: 09.08.2016).

5. Lebedev P.D. Raschet i proektirovanie sushilnykh ustanovok.-M.-L., Gosenergoizdat, 1962. 320 s.

6. Shobhana Singh, Subodh Kumar. Development of convective heat transfer correlations for common designs of solar dryer // Energy Conversion and Management 64 (2012) 403–414.

7. Kutateladze S.S., Borishanskiy V.M. Spravochnik po teploperedache. - L.; M.: Gosudarstvennoe energeticheskoe izdatelstvo, 1958. 414 s.

INFLUENCE OF SURFACE MASS OF "WATER - AIR" FOR TEMPERATURE WET BULB AT THE FORCED AIR CONVECTION IN A CONFINED SPACE

A.S. DANILCHENKO, T.G. KOROTKOVA

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;
e-mail: bagira.ask@rambler.ru, korotkova1964@mail.ru*

The experimental and calculated data on the kinetics of warm water of 50 ml in a forced convection in a confined space in order to determine the effect of mass transfer on the surface of the wet bulb temperature in the free moisture evaporation. Changes in temperature during the warm-up was studied using a digital multimeter sensor Mastech M838 series by placing in an oven Memmert class Basic (Germany) Petri dish with water in an amount of 50 ml. Drying oven equipped with forced air circulation. Fixed time and change the water heating temperature. It was established experimentally that the increase in mass transfer surface increases the wet bulb temperature, which should be considered when drying heat-sensitive materials. Processing of experimental data carried out by the developed mathematical model.

Key words: mass transfer, forced convection, the system "water - air", a closed volume.