

*КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ
ПОЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В СУШИЛЬНОМ ШКАФУ*

А.С. ДАНИЛЬЧЕНКО, Т.Г. КОРОТКОВА, С.Ю. КСАНДОПУЛО

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

Приведены экспериментальные данные по кинетике прогрева воды объемом 50 мл и кинетике испарения 10 мл воды при вынужденной конвекции в замкнутом объеме при установленной температуре в шкафу 60 °С на нижнем, среднем и верхнем уровнях расположения решеток в сушильном шкафу Memmert класса Basic (Германия), на задней панели которого встроен вентилятор, обеспечивающий принудительную циркуляцию воздуха. Установлено, что процесс испарения воды интенсивно протекает при расположении чашки Петри с водой на нижнем уровне, что объясняется свободным доступом конвективных потоков к поверхности воды. Меньшее время занимает прогрев воды до достижения температуры мокрого термометра при расположении чашки Петри с водой на среднем уровне. Это можно объяснить более равномерной скоростью воздуха в верхней и нижней зонах сушильной камеры.

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

Сушка является сложным диффузионным процессом, который сопровождается подводом теплоты. Продолжительность сушки зависит от взаимного расположения высушиваемого материала и направленного потока сушильного агента.

В данной работе проведены экспериментальные исследования скорости испарения влаги в зависимости от места положения чашки Петри с водой в сушильном шкафу Memmert класса Basic (Германия), на задней панели которого встроен вентилятор, обеспечивающий принудительную циркуляцию воздуха. Шкаф Memmert оснащен панелью управления с одним дисплеем и платиновым датчиком температуры Pt100 класса А.

В первой серии экспериментов исследована кинетика прогрева воды при установленной температуре в шкафу 60 °С на нижнем, среднем и верхнем уровнях расположения решеток (рисунок 1), высотой: нижний уровень – 9 см; средний уровень – 17 см; верхний уровень – 33 см, считая снизу. Эксперимент проходил в следующей последовательности. В чашку Петри заливали

дистиллированную воду в количестве 50 мл и ставили в сушильный шкаф. Предварительно шкаф прогревали до 60 °С. Пустые чашки Петри и чашки Петри с водой взвешивали на весах. В воду опускали измерительный элемент датчика цифрового мультиметра Mastech серии M838 и определяли начальную температуру воды (рисунок 2). Датчик закрепляли таким образом, чтобы измерение температуры соответствовало среднему слою жидкости. Чашку Петри помещали в сушильный шкаф и закрывали его. Мультиметр Mastech располагали около шкафа Memmert (рисунки 3-5).

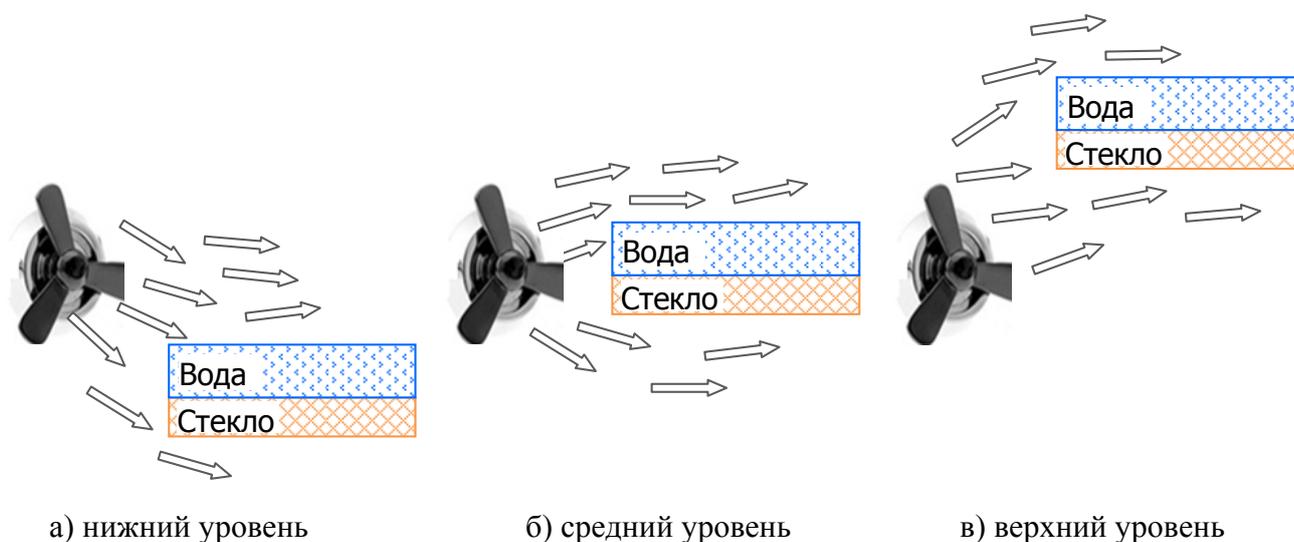


Рисунок 1 – Схематическое расположение вентилятора и чашки Петри



а) измерение температуры воды в начальный момент времени для среднего и верхнего уровней



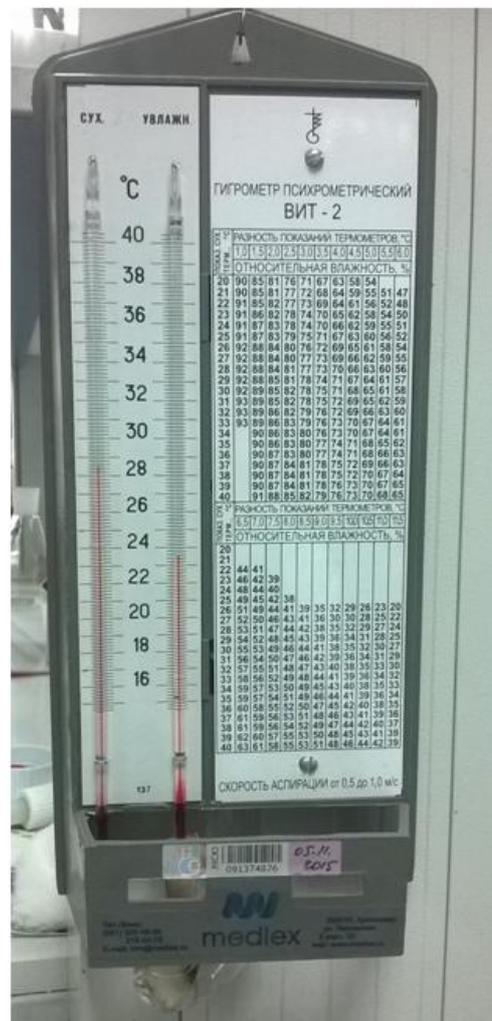
б) расположение центробежного вентилятора фирмы EBM в шкафу

Рисунок 2 – Измерение температуры воды в начальный момент времени и расположение вентилятора на задней панели сушильного шкафа Memmert

Наблюдали за показаниями температуры на мультиметре, записывая время и значение температуры. После прекращения роста температуры в среднем слое воды продолжали наблюдение еще в течение 15 минут, приняв эту конечную температуру за температуру мокрого термометра.



а) показание конечной температуры прогрева воды при температуре в шкафу 60 °С



б) показание гигрометра

Рисунок 3 – Показания мультиметра, сушильного шкафа и гигрометра

Во второй серии экспериментов исследовали кинетику испарения 10 мл воды при той же температуре в шкафу 60 °С на нижнем, среднем и верхнем уровнях расположения решеток. В течение эксперимента периодически взвешивали на весах чашку Петри с водой, записывая время и массу до полного испарения воды.



а) положение чашки Петри



б) начальная масса чашки Петри с водой

Рисунок 4 – Нижний уровень



а) показание мультиметра



б) положение чашки Петри

Рисунок 5 – Средний уровень



а) положение чашки Петри



б) начальная масса чашки Петри с водой

Рисунок 6 – Верхний уровень

Экспериментальные данные по кинетике прогрева и испарения воды для различных уровней положения чашки Петри приведены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Экспериментальные данные (нижний уровень)

Опыт 1 (нижний уровень)			
<i>прогрев</i>			
Температура в сушильном шкафу, °С			60
Объем воды, мл			50
Масса пустой чашки Петри, г.			104,4416
Масса чашки Петри с водой (≈ 50 мл), г.			153,7756
Масса воды (≈ 50 мл), г.			49,3596
мин:сек	сек	мин	Температура, °С
0	0	0	29
2:37	157	2,617	32
4:00	240	4	33
4:54	294	4,9	34
6:00	360	6	35
7:11	431	7,183	36
8:30	510	8,5	37
9:36	576	9,6	38
11:21	681	11,35	39

Окончание таблицы 1

14:01	841	14,017	40
18:51	1131	18,85	41
<i>кинетика испарения</i>			
Температура в сушильном шкафу, °С			60
Объем воды, мл			10
Масса пустой чашки Петри, г.			104,4416
Масса чашки Петри с водой (≈ 10 мл), г.			114,4319
Масса воды (≈ 10 мл), г.			9,9903
Продолжительность испарения			Масса чашки Петри
мин:сек	сек	мин	с водой, г
0	0	0	114,4319
5:43	343	5,717	113,5819
10:16	616	10,267	112,6568
15:02	902	15,033	111,6624
20:27	1227	20,450	110,7148
25:48	1548	25,800	109,7837
30:12	1812	30,200	108,8949
35:20	2120	35,333	108,0691
40:25	2425	40,417	107,2733
45:16	2716	45,267	106,5132
50:03	3003	50,050	105,8562
55:24	3324	55,400	105,2450
60:38	3638	60,633	104,6864
65:51	3951	65,850	104,4694
70:38	4238	70,633	104,4416
			0

Таблица 2 – Экспериментальные данные (средний уровень)

Опыт 2 (средний уровень)			
<i>прогрев</i>			
Температура в сушильном шкафу, °С			60
Объем воды, мл			50
Масса пустой чашки Петри, г.			104,4411
Масса чашки Петри с водой (≈ 50 мл), г.			153,7149
Масса воды (≈ 50 мл), г.			49,2738
час:мин:сек	сек	мин	Температура, °С
0	0	0	29
0:55	55	0,917	30
1:39	99	1,650	31
2:24	144	2,400	32
3:06	186	3,100	33
3:47	227	3,783	34
5:01	301	5,017	35
5:51	351	5,850	36
7:01	421	7,017	37
8:43	523	8,717	38
6:23	623	10,383	39
13:08	788	13,133	40
14:38	878	14,633	41

Окончание таблицы 2

<i>кинетика испарения</i>				
Эксперимент 1				
Температура в сушильном шкафу, °С			60	
Объем воды, мл			10	
Масса пустой чашки Петри, г.			104,4411	
Масса чашки Петри с водой (≈ 10 мл), г.			114,3900	
Масса воды (≈ 10 мл), г.			9,9489	
Продолжительность испарения			Масса чашки Петри с водой, г	Масса воды, г
мин:сек	сек	мин		
0	0	0	114,3900	9,9489
5:14	314	5,233	113,5657	9,1246
10:14	614	10,233	112,6667	8,2256
15:20	920	15,333	111,8210	7,3799
20:24	1224	20,400	111,0018	6,5607
25:26	1526	25,433	110,2482	5,8071
30:31	1831	30,517	109,5479	5,1068
35:24	2124	35,400	108,8889	4,4478
40:27	2427	40,450	108,2367	3,7956
45:20	2720	45,333	107,6801	3,2390
50:15	3015	50,250	107,1125	2,6714
55:17	3317	55,283	106,5981	2,1570
60:31	3631	60,517	106,1318	1,6907
65:36	3936	65,600	105,7240	1,2829
70:33	4233	70,550	105,3642	0,9231
75:34	4534	75,567	104,9885	0,5474
80:37	4837	80,617	104,7007	0,2596
85:03	5103	85,050	104,4681	0,0270
90:15	5415	90,250	104,4411	0
Эксперимент 2				
Продолжительность испарения			Масса чашки Петри с водой, г	Масса воды, г
мин:сек	сек	мин		
0	0	0	114,3271	9,8861
5:14	314	5,233	113,5227	9,0817
10:59	659	10,983	112,5689	8,1279
15:13	913	15,217	111,6971	7,2561
20:22	1222	20,367	110,8546	6,4136
25:27	1527	25,450	110,0408	5,5998
30:29	1829	30,483	109,2517	4,8107
35:37	2137	35,617	108,5647	4,1237
40:35	2435	40,583	107,9321	3,4911
45:31	2731	45,517	107,3230	2,8820
50:55	3055	50,917	106,7633	2,3223
55:00	3300	55,000	106,2736	1,8326
60:58	3658	60,967	105,8146	1,3736
65:56	3956	65,933	105,4052	0,9642
70:50	4250	70,833	105,0274	0,5864
75:45	4545	75,750	104,7710	0,3300
80:46	4846	80,767	104,5385	0,0975
85:58	5158	85,967	104,4410	0

Таблица 3 – Экспериментальные данные (верхний уровень)

Опыт 3 (верхний уровень)				
<i>прогрев</i>				
Температура в сушильном шкафу, °С			60	
Объем воды, мл			10	
Масса пустой чашки Петри, г.			104,4409	
Масса чашки Петри с водой (≈ 50 мл), г.			153,0109	
Масса воды (≈ 50 мл), г.			48,5700	
час:мин:сек	сек	мин	Температура, °С	
0	0	0	29	
0:40	40	0,667	30	
1:17	77	1,283	31	
2:08	128	2,133	32	
2:50	170	2,833	33	
3:56	236	3,933	34	
4:52	292	4,867	35	
6:07	367	6,117	36	
7:13	433	7,217	37	
8:54	534	8,900	38	
11:07	667	11,117	39	
15:26	926	15,433	40	
29:16	1756	29,267	41	
<i>кинетика испарения</i>				
Температура в сушильном шкафу, °С			60	
Объем воды, мл			10	
Масса пустой чашки Петри, г.			104,4409	
Масса чашки Петри с водой (≈ 10 мл), г.			114,1861	
Масса воды (≈ 10 мл), г.			9,7452	
Продолжительность испарения			Масса чашки Петри с водой, г	Масса воды, г
мин:сек	сек	мин		
0	0	0	114,1861	9,7452
5:17	317	5,283	113,3300	8,8891
10:40	640	10,667	112,3957	7,9548
15:54	954	15,900	111,4940	7,0531
20:57	1257	20,950	110,6073	6,1664
25:11	1511	25,183	109,8237	5,3828
30:22	1822	30,367	109,0310	4,5901
35:43	2143	35,717	108,2984	3,8575
40:47	2447	40,783	107,6419	3,2010
45:46	2746	45,767	106,9473	2,5064
50:49	3049	50,817	106,3326	1,8917
55:54	3354	55,900	105,6992	1,2583
60:11	3611	60,183	105,2437	0,8028
65:09	3909	65,150	104,8455	0,4046
70:09	4209	70,150	104,5634	0,1225
75:10	4510	75,167	104,4409	0

На рисунках 7 и 8 приведены экспериментальные данные для разных уровней в сушильном шкафу. Дольше всего происходит прогрев при расположении чашки Петри на верхнем уровне (рисунок 7). Полученные данные являются дальнейшим исследованием вопроса нестационарного испарения жидкости, проведенного нами в работах [1-3].

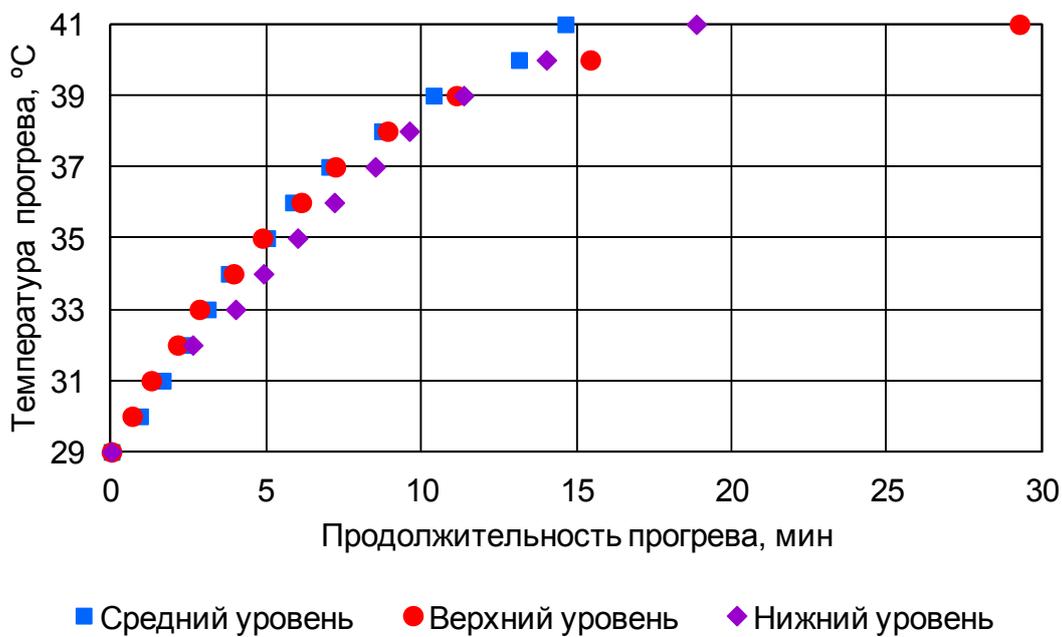


Рисунок 7 – Кинетика прогрева воды на разных уровнях в сушильном шкафу

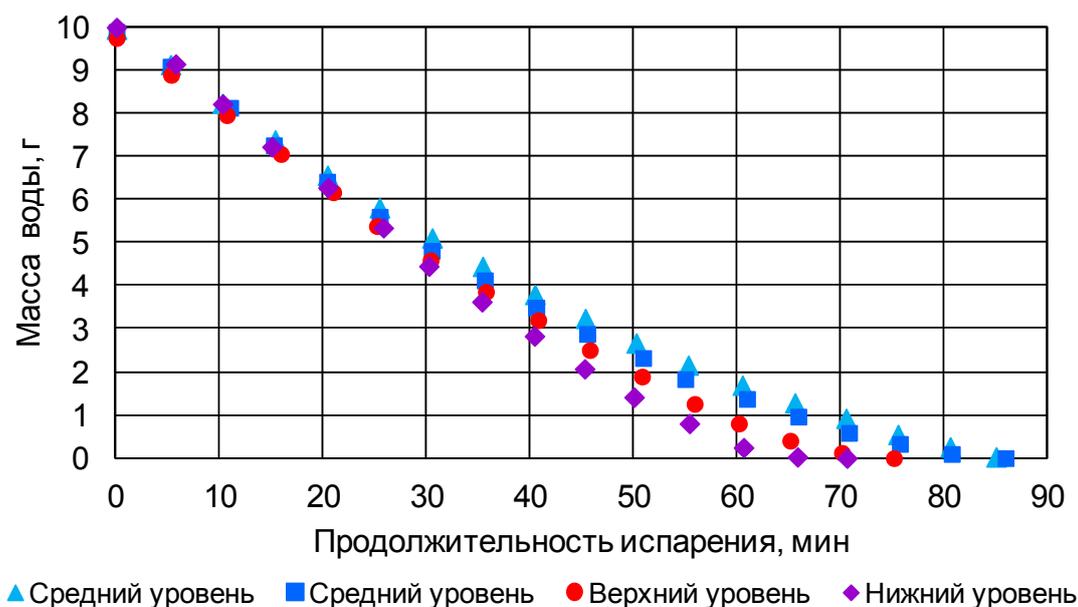


Рисунок 8 – Кинетика испарения воды на разных уровнях положения чашки Петри в сушильном шкафу

Выводы: 1) Экспериментально установлено, что процесс испарения воды интенсивно протекает при расположении чашки Петри с водой на нижнем уровне, что объясняется свободным доступом конвективных потоков к поверхности воды при расположении вентилятора в центральной части задней стенки сушильного шкафа. Меньшее время занимает прогрев воды до достижения температуры мокрого термометра при расположении чашки Петри с водой на среднем уровне. Это можно объяснить более равномерной скоростью воздуха в верхней и нижней зонах сушильной камеры. 2) При испарении воды в количестве менее 1 г положение точек во всех экспериментах отклоняется от прямолинейной зависимости, что свидетельствует о наличии адсорбционных сил между водой и дном стеклянной чашки Петри.

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. Данильченко А.С., Короткова Т.Г. Влияние поверхности массообмена системы «вода – воздух» на температуру мокрого термометра при вынужденной конвекции воздуха в замкнутом объеме [Электронный ресурс] // Научные труды КубГТУ: электрон. сетевой политематич. журн. 2016. № 10. С.1-11. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1147> (дата обращения: 4.09.2016).

3. 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).

REFERENCES

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

2. Danilchenko A.S., Korotkova T.G. Vliyanie poverkhnosti massoobmena sistemy «voda – vozdukh» na temperaturu mokrogo termometra pri vynuzhdennoy <http://ntk.kubstu.ru/file/1183>

konveksii vozdukhа v zamknutom obeme [Elektronnyy resurs] // Nauchnye trudy KubGTU: elektron. setevoy politematich. zhurn. 2016. № 10. S.1-11. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1147> (data obrashcheniya: 4.09.2016).

3. 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).

*KINETICS OF PROCESSES OF EVAPORATION DEPENDING
ON POSITION MATERIAL DRYING CUPBOARD*

A.S. DANILCHENKO, T.G. KOROTKOVA, S.YU. KSANDOPULO

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

Experimental data on the kinetics of warm water of 50 ml, and the kinetics of the evaporation 10 ml of water under forced convection in a closed volume at a set temperature in the cupboard 60 °C at the lower, intermediate and upper arrays floor level in an oven Memmert class Basic (Germany) at the rear panel which is integrated fan provides forced air circulation. It is found that the water evaporation process proceeds rapidly at the location of the Petri dish with water in the lower layer, due to free convection flow connection to the water surface. It takes less time to achieve warm water wet bulb temperature at a location in the Petri dish with water at an average level. This can be explained by a more uniform air velocity in the upper and lower zones of the drying chamber.

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