

## **База данных с экспериментальными критическими условиями и характеристиками процессов нагрева, распыления, вторичного дробления очищаемой воды с содержанием твердых растворимых примесей**

### *Определение скоростей прогрева и испарения капель водных растворов с твердыми растворимыми примесями*

На рисунке 1 показан внешний вид стенда. Для создания потока разогретого воздуха (300–800 К) использовали тепловой нагнетатель 1 HOTWIND PREMIUM LEISTER мощностью 2,3 кВт. Скорость газового потока при проведении экспериментов составляла 3 м/с. При помощи специального дозатора «THERMO SCIENTIFIC E1-CLIP TIP» генерировалась капля раствора с начальным размером  $R_{d0}$  и с начальной температурой  $T_{d0}$ . Капля подвешивалась на спай термодпары 3. Для перемещения капли в область нагрева применялся координатный механизм 4, который управлялся микроконтроллером 5 «DC 7.5-24». Шаговый двигатель координатного механизма был подключён к блоку питания 6. Подвешенная капля раствора помещалась в цилиндр из кварцевого жаропрочного стекла, внутри которого создавался поток разогретого воздуха. Капля подсвечивалась прожектором 8 Multiled PT-V9 GS Vitec (работает в непрерывном режиме, оснащён 24 светодиодами, общая яркость — 7700 Лм, мощность — 84 Вт, угол рассеяния — 30°). Процесс испарения капли регистрировался при помощи высокоскоростной видеокамеры 2 Phantom Miro M310 (разрешение 648×648 пикселей, частота съёмки 50 кадров в секунду). Информация с видеокамеры 2 передавалась на персональный компьютер с предустановленными ПО Phantom Camera Control для анализа полученных результатов. Статистические погрешности измерений времен прогрева и испарения оценивались по частоте видеосъёмки, которая составляла 50 кадров в секунду (систематическая погрешность определения характерных времен не превышала 0.05%).

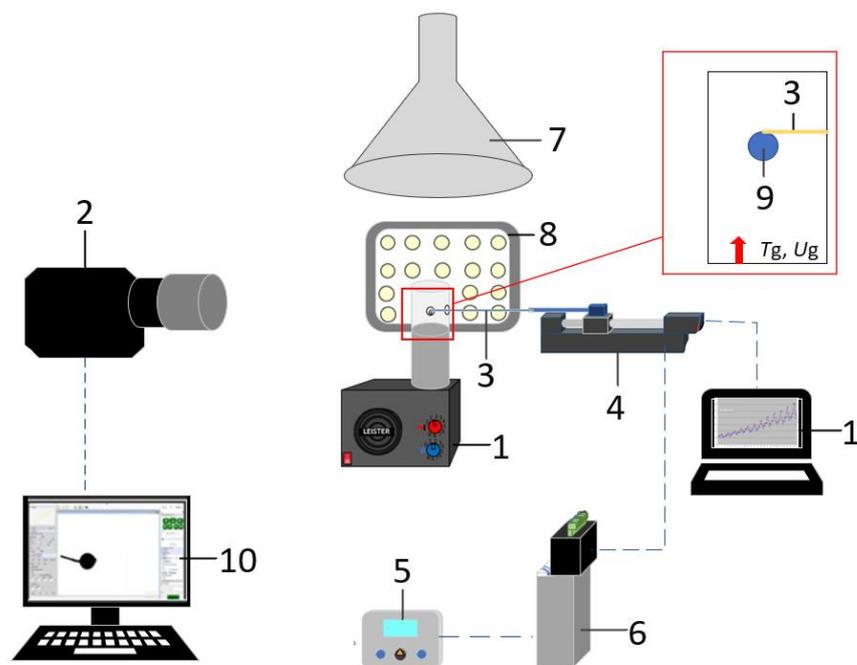


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда: 1 – тепловой нагнетатель, 2 – кросскорреляционная камера, 3 – платина-родиевая термопара, 4 – шаговый двигатель, 5 – микроконтроллер «DC 7.5-24», 6 – блок питания, 7 - система воздухообмена, 8 – прожектор, 9 – капля; 10 – персональный компьютер; 11 – персональный компьютер

Для контроля температуры в центре капли  $T_d$  и внешней газовой среды  $T_g$  использовался измерительный комплекс, состоящий из высокоскоростной платы аналогового ввода «National Instruments» типа NI 9219 и хромель-алюмелевых термопар (температурный диапазон 273–1473 К, систематическая погрешность  $\pm 3$  К, время теплового запаздывания менее 0,1 с). Случайные погрешности измерения  $T_d$  и  $T_g$  не превышали 2%. Эксперименты при фиксированных значениях основных факторов проводились не менее 5 раз.

На рисунке 2 представлены типичные тренды температуры в центре капли ( $T_d$ ) во времени. Выделены три участка. На первом подвешенная на термопаре капля находится при температуре окружающего воздуха, после чего вводится в поток высокотемпературных газов. На следующем участке капля интенсивно прогревается до условий достижения температуры насыщения и испаряется. На последнем участке температура капли практически не изменяется до момента

полного ее испарения. На рис. 2 показана точка 1 – момент ввода капли в высокотемпературную газовую среду. С этого момента времени начинается процесс прогрева капли до температуры насыщения ( $T_s$ ). Точка 2 характеризует момент достижения температуры насыщения. Точка 3 характеризует момент окончания процесса испарения. После полного испарения капли, показания термопары стремятся к температуре газового потока.

На базе этих данных определялась скорость прогрева капли  $W_h$  (К/с) по формуле:

$$W_h = \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (2.1.1)$$

где  $\Delta T$  – разность температур насыщения при данной температуре газового потока  $T_g$  и начальной температуры капли  $T_{d0}$  (К);  $\Delta t$  – время достижения температуры насыщения (с). Т.е. скорость прогрева определялась исходя из разности температур между моментами 1 и 2 (рис. 2.1.2.2).

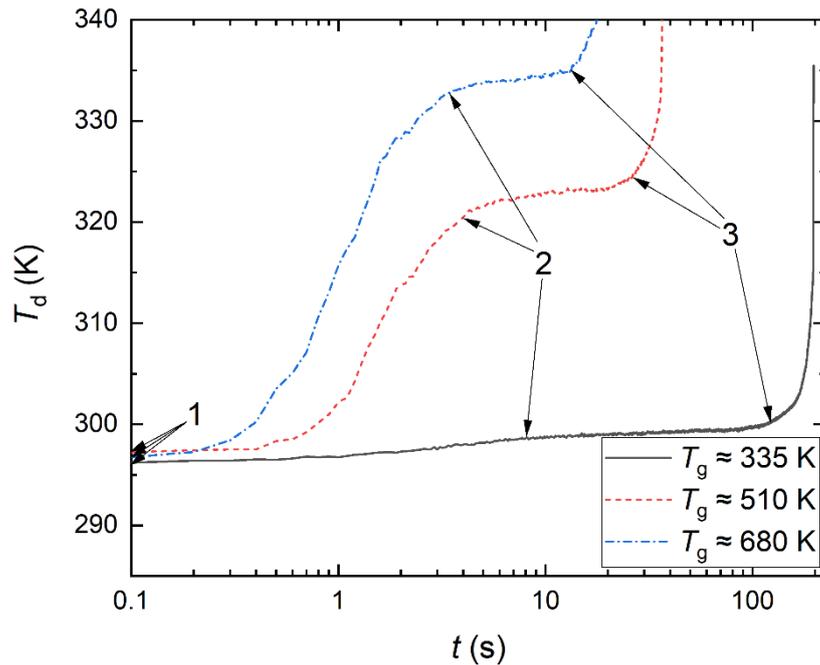


Рисунок 2 – Типичные тренды температуры в центре капли воды ( $R_{d0} \approx 1,3$  мм) на этапах прогрева и испарения при различных температурах газового потока: 1 – момент ввода капли в высокотемпературный газовый поток, 2 – момент достижения температуры насыщения, 3 – момент полного испарения капли

Измерение размеров капель в процессе испарения проводилось с использованием ПО Phantom Camera Control. Радиус капли на видеокадре рассчитывался как радиус области, занимаемой каплей на изображении и отличающейся от фона по интенсивности. Разница между размером капли в продольном и поперечном сечениях не превышала 15%. С учетом разрешения камеры и масштабного коэффициента систематическая погрешность вычисления  $R_d$  не превышала 0,01 мм.

Также для каждой серии экспериментов фиксировалось время полного испарения капли  $t_d$ . Погрешность определения  $t_d$  не превышала 0,03 с. Значение скорости испарения в каждом эксперименте и для каждого состава вычислялось по формуле:

$$W_e = \frac{\rho_d(R_d - R_d^*)}{t_d}, \quad (2.1.2)$$

где  $\rho_d$  — плотность раствора (кг/м<sup>3</sup>),  $R_d$ ,  $R_d^*$  — начальное и конечное значения радиуса капли (м),  $t_d$  — время, за которое капля уменьшилась с  $R_d$  до  $R_d^*$  (с). Погрешность определения массовой скорости испарения капель не превышала 2.5%.

Таблица 1 – Скорости прогрева и испарения капель водных растворов при варьировании температуры газового потока

		$W_h, \text{K/c}$				
$R_{d0} = 1.3$	$T_g, \text{K}$	337	433	513	603	683
мм	Вода	0.95555	3.4776	5.55691	7.9515	10.10736
	NaCl	1.02355	3.7179	6.0619	8.7422	11.18199
$n = 1 \%$ , $U_g = 3.1$ м/с	CuSO4	0.96787	4.01058	6.30568	9.2405	11.75395
	K2SO4	1.02038	4.30515	7.08222	9.95715	12.87847
	KH2PO4	1.05997	4.1273	6.70098	9.62976	12.29502
	NaHCO3	1.13713	4.55058	7.28707	10.44015	13.28418

Продолжение таблицы 1

$W_h, \text{K/c}$						
$R_{d0} = 1.3$	$T_g, \text{K}$	337	433	513	603	683
мм	Вода	0.95555	3.4776	5.55691	7.9515	10.10736
$n = 5 \%$ ,	NaCl	1.10438	4.2012	6.69101	9.9005	12.76741
$U_g = 3.1$	CuSO4	1.01621	4.2828	7.12262	10.67745	13.99338
м/с	K2SO4	1.13266	4.8003	7.72199	12.1338	15.80018
	KH2PO4	1.01007	4.5408	7.32173	11.4765	15.21995
	NaHCO3	1.12438	5.0401	8.30504	12.601	16.3869
$W_e, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$						
$R_{d0} = 1.3$	$T_g, \text{K}$	337	433	513	603	683
мм	Вода	0.00649	0.021	0.0358	0.0534	0.07114
$n = 1 \%$ ,	NaCl	0.0067	0.02165	0.03671	0.05515	0.07371
$U_g = 3.1$	CuSO4	0.01041	0.02331	0.03812	0.05871	0.0794
м/с	K2SO4	0.0103	0.02558	0.04303	0.06585	0.08989
	KH2PO4	0.00881	0.02469	0.04058	0.06278	0.08508
	NaHCO3	0.01035	0.02659	0.04679	0.06972	0.0986
$W_e, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$						
$R_{d0} = 1.3$	$T_g, \text{K}$	337	433	513	603	683
мм	Вода	0.00649	0.021	0.0358	0.0534	0.07114
$n = 5 \%$ ,	NaCl	0.00676	0.02313	0.0395	0.06057	0.08166
$U_g = 3.1$	CuSO4	0.01092	0.02735	0.04471	0.06405	0.08886
м/с	K2SO4	0.01098	0.02816	0.04825	0.07178	0.09897
	KH2PO4	0.01115	0.0283	0.04803	0.06818	0.0939
	NaHCO3	0.00991	0.02917	0.05299	0.0752	0.10859

Таблица 2 – Скорости прогрева и испарения капель водных растворов NaCl при варьировании начальных размеров капель

$n, \%$	$R_{d0}, \text{мм}$	$W_h, \text{К/с}$	$U_g, \text{м/с}$	$T_g, \text{К}$
0	0.8	12.85555	3.1	513
	0.9	10.33657		
	1	8.2939		
	1.1	7.11269		
	1.3	5.55691		
1	0.8	14.02379		
	0.9	11.12135		
	1	9.04761		
	1.1	7.70642		
	1.3	6.0619		
5	0.8	16.5546		
	0.9	13.26381		
	1	11.02415		
	1.1	9.51493		
	1.3	7.38618		
$n, \%$	$R_{d0}, \text{мм}$	$W_e, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$U_g, \text{м/с}$	$T_g, \text{К}$
0	0.8	0.04396	3.1	513
	0.9	0.03905		
	1	0.03686		
	1.1	0.03621		
	1.3	0.0358		
1	0.8	0.0456		
	0.9	0.0407		
	1	0.03826		
	1.1	0.03738		
	1.3	0.03671		
5	0.8	0.04677		
	0.9	0.04373		
	1	0.04151		
	1.1	0.04007		
	1.3	0.0395		

Таблица 3 – Скорости прогрева и испарения капель водных растворов при варьировании концентрации примеси

$W_h, \text{K/c}$						
$R_{d0} = 1.3$	$n, \%$	1	2	3	4	5
мм	NaCl	6.0619	6.4501	6.7492	7.06957	7.38618
$T_g = 513$	CuSO4	6.30568	6.7002	7.0016	7.21954	7.40012
К	K2SO4	7.07222	7.5115	7.7513	7.98056	8.23679
$U_g = 3.1$	KH2PO4	6.70098	7.2125	7.4499	7.65013	7.80984
м/с	NaHCO3	7.28707	7.7985	8.0029	8.14962	8.30504
$W_e, \text{кг/ (м}^2 \cdot \text{с)}$						
$R_{d0} = 1.3$	$n, \%$	1	2	3	4	5
мм	NaCl	0.03671	0.0376	0.0383	0.039	0.0395
$T_g = 513$	CuSO4	0.03812	0.04	0.0415	0.043	0.04471
К	K2SO4	0.04303	0.045	0.046	0.047	0.04825
$U_g = 3.1$	KH2PO4	0.04058	0.043	0.045	0.0465	0.04803
м/с	NaHCO3	0.04679	0.0497	0.0507	0.0518	0.05299

Таблица 4 – Скорости прогрева и испарения капель водных растворов в пламенной зоне при варьировании концентрации примеси

$W_h, \text{K/c}$					
$R_{d0} = 1.3$ мм	$T_g, \text{K}$	825	915	1065	1205
	Вода	11.0249	12.4091	16.1984	21.7839
	NaCl ( $n = 0,1 \%$ )	11.1502	14.2445	17.9596	22.5105
	NaCl ( $n = 3 \%$ )	15.1139	18.6938	23.7336	28.7466
	NaCl ( $n = 5 \%$ )	18.9229	22.1249	27.1384	32.1062

Продолжение таблицы 4

		$W_e, \text{ кг/ (м}^2 \cdot \text{с)}$			
$R_{d0} = 1.3 \text{ мм}$	$T_g, \text{ К}$	825	915	1065	1205
	Вода	0.07494	0.08418	0.09832	0.11761
	NaCl ( $n = 0,1 \%$ )	0.07377	0.08417	0.09965	0.11417
	NaCl ( $n = 3 \%$ )	0.07794	0.08822	0.10481	0.12319
	NaCl ( $n = 5 \%$ )	0.08041	0.09161	0.11017	0.12772