

1.1 База данных со свойствами и характеристиками физико-химических процессов при термической очистке воды от твердых нерастворимых примесей

1. Номенклатура

R_d – радиус капли суспензии (мм);

T_d – начальная температура капли (К);

v_{sd} – скоростей осаждения или всплытия частиц (мм/с);

v – скорость перемещения частиц (м/с);

n – относительная концентрация частиц (%);

W_h – скорость роста температуры объекта защиты (К/с);

W_e – скорость роста температуры объекта защиты (К/с).

U_g – скорость движения капель в завесе (м/с).

1. Определение скоростей перемещения частиц в водной суспензии

Этапы определения скорости перемещения твердых частиц примеси (характеристики в таблице 1) в водной суспензии:

1. Подготовить емкости с водой и добавить взвешенные частицы примесей с применением дозирующих устройств.
2. Поместить емкости на подставку и начать отсчет времени.
3. Запустить секундомер и следить за движением частиц.
4. Измерять расстояние, на которое частицы переместились за определенное время.
5. Повторить эксперимент для получения базы данных с рассчитанными неопределенностями.
6. Рассчитать скорость движения частиц примеси двумя способами: при допущении о равномерном перемещении частиц и по формуле Стокса:

$$v_{sd} = \frac{x_1 - x_0}{t_{sd}}, \quad (1.1.1)$$

$$v_{sd} = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \left(\frac{d}{2}\right)^2 |\rho_l - \rho_w| \cdot 10^{-6}}{\eta n}. \quad (1.1.2)$$

где $\eta_{20} = 1.002 \cdot 10^{-3}$ Па · с, $\eta_{55} = 0.504 \cdot 10^{-3}$ Па · с.

Методика позволяет определить скорость осаждения частиц примеси в сточной воде путем измерения расстояния, пройденного ими, в течение фиксированного времени. Аналогичным способом определялась скорость всплытия частиц примеси в воде.

Значения скоростей осаждения или всплытия частиц v_{sd} рассчитывались как средние в течение всего времени контроля после их равномерного перемешивания. Размерность v_{sd} составляла мм/с. Также контролировалась скорость разделения фаз при расслоении водной суспензии после перемешивания частиц в воде v_s , которая рассчитывалась по скорости восстановления первоначального расположения частиц в емкости после их перемешивания. Этот процесс протекал в течение длительного периода времени. Поэтому размерность v_s составляла мм/мин.

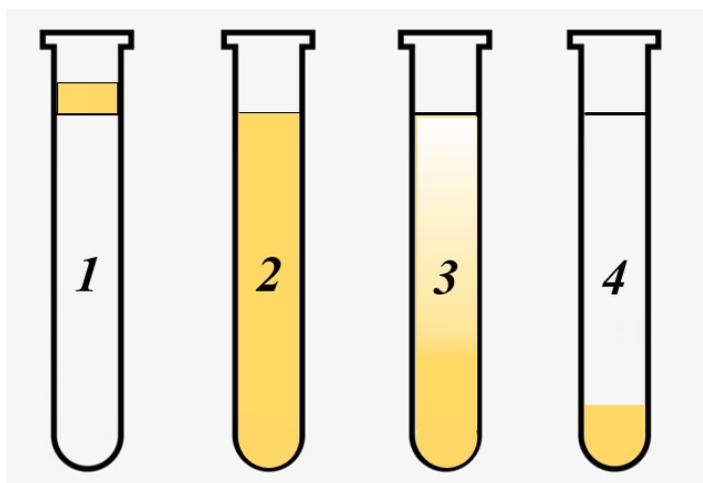


Рисунок 1 – Схема расчета скорости разделения фаз в водной суспензии в режиме осаждения частиц примеси (на примере глины) в сточной воде: 1 – первоначальное состояние воды и примеси, 2 – состояние воды и примеси после перемешивания, 3 – осаждение частиц примеси, 4 – конечное состояние воды и примеси (представляет слой в нижней зоне емкости)

Таблица 1 - Характеристики исследуемых примесей

№ емкости	Название примеси	d, мкм	ρ , кг/м ³	КУС, °	Смачиваемость примеси
1	Диспергированная древесина	72	2700	103,52	гидрофобная
2	Fe	60	2000	120,45	гидрофобная
3	Al	65	1120	104,71	гидрофобная
4	Al ₂ O ₃	65	3500	22,81	гидрофильная
5	Глина	66	1500	25,08	гидрофильная
6	Шлам	64	1250	67,93	гидрофильная
7	Твердый остаток от сжигания натурального топлива	64	1360	20,11	гидрофильная
8	Полиамид (типичный полимер)	5	1020	89,85	гидрофильная
9		20	1020	114,31	гидрофобная
10		50	1020	118,35	гидрофобная

Таблица 2 – Результаты экспериментов по контролю скоростей осаждения и всплытия твердых нерастворимых примесей (с учетом специфики их поведения) в воде, а также разделению фаз

№ емкости	Поведение примеси	Результаты экспериментов					
		n = 0,5%		n = 2%		n = 5%	
		v_{SD} , мм/с	v_S , мм/мин	v_{SD} , мм/с	v_S , мм/мин	v_{SD} , мм/с	v_S , мм/мин
1	Осаждение	2,2	14	0,8	6,4	0,4	1,2
2	Осаждение	3,5	11	1,4	8,2	0,6	2,8
3	Осаждение	2,2	6	1,4	3,3	1,0	0,5
4	Осаждение	9,2	8	3,4	5,5	1,4	1,2
5	Осаждение	5,5	28	1,6	15,1	0,9	2,4
6	Осаждение	0,8	1	0,2	0,6	0,1	0,1
7	Осаждение	3,2	16	0,8	12,8	0,4	2,2
8	Всплытие	8,5	220	8,0	110,0	7,3	110,0

9	Всплытие	3,1	110	3,2	79,2	4,4	44,0
10	Всплытие	2,6	73	2,7	58,7	3,1	36,7

Погрешность измерения скорости движения твердых нерастворимых примесей составила 4%.

Таблица 3 - Результаты регистрации скоростей осаждения и всплытия частиц твердых нерастворимых примесей в водной суспензии при разных концентрациях

№ про-бир-ки	Поведение примеси	Результаты экспериментов					
		0,5 % + 0,5% = 1 %		1 % + 1 % = 2 %		2 % + 2% = 4 %	
		v_{SD} , мм/с	v_S , мм/мин	v_{SD} , мм/с	v_S , мм/мин	v_{SD} , мм/с	v_S , мм/мин
1	Глина	5,2	22	3,3	13	2,3	6,3
	Полиамид 20 мкм	3,2	73	2,9	51	2,4	43
2	Шлам	1,0	0,8	0,9	0,5	0,6	0,2
	Полиамид 20 мкм	3,3	73	3,3	56	3,2	51
3	Шлам	1,2	1,1	0,7	1,2	0,5	1,3
	Глина	5,5	28	5,2	30	5,4	34
4	Al	2,0	5	1,9	4,1	1,5	3,0
	Глина	5,3	20	3,8	12	2,9	6,1
5	Al	2,1	5	1,8	3,9	1,5	2,9
	Шлам	1,2	0,9	1,1	0,4	1,0	0,2
6	Al	2,5	6	2,0	4,2	1,2	3,5
	Полиамид 20 мкм	3,3	73	3,2	53	3,2	49

Погрешность измерения скорости движения гидрофильных примесей составила 6%.

Таблица 4 - Математические выражения для прогнозирования скорости перемещения частиц примесей с учетом их основных свойств.

Примеси	Гидрофобные примеси	Гидрофильные примеси
Монокомпонент	$v_{sd} = \frac{x_1 - x_0}{t_{sd}}$ $v_{sd} = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \left(\frac{d}{2}\right)^2 \rho_l - \rho_w \cdot 10^{-6}}{\eta n}$	$v_{sd} = \frac{x_1 - x_0}{t_{sd}}$
Комбинация примесей	$v_{sd} = \frac{x_1 - x_0}{t_{sd}}$ <p><i>Поведение совокупности частиц из различных материалов через формулу Стокса сложно контролируемое.</i></p>	

2. Определение скоростей прогрева и испарения капель водной суспензии с твердыми нерастворимыми примесями

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1. Одиночные капли (начальный размер R_d и начальная температура T_d) приготовленных водных суспензий генерировались с помощью специального дозирующего устройства и подвешивались на спай платина-родиевой термопары 1. Перемещение подвешенной капли на спае термопары осуществлялось с использованием шагового двигателя 2, управляемого микроконтроллером «DC 7,5-24» 3 и подключенного к блоку питания 4. Подвешенная капля суспензии вводилась в цилиндр из кварцевого жаропрочного стекла 5 с высокотемпературным газовым потоком (300-700 К), генерируемый тепловым вентилятором 6 мощностью 2,3 кВт. Тепловой нагнетатель расположен под системой воздухообмена 7, осуществляющей очистку помещения от вредных выбросов. Для регистрации процесса испарения одиночных капель использовалась кросскорреляционная камера 8 CCD camera ImperX IGV-B2020 M (frame resolution 2048×2048 пикс, frame rate 20 fps, digit capacity 16 бит). Данные с кросскорреляционной камеры 8 передаются на персональный компьютер 9 с предустановленными программами Phantom Camera Control для

управления параметрами эксперимента и Actual Flow для последующей обработки результатов.

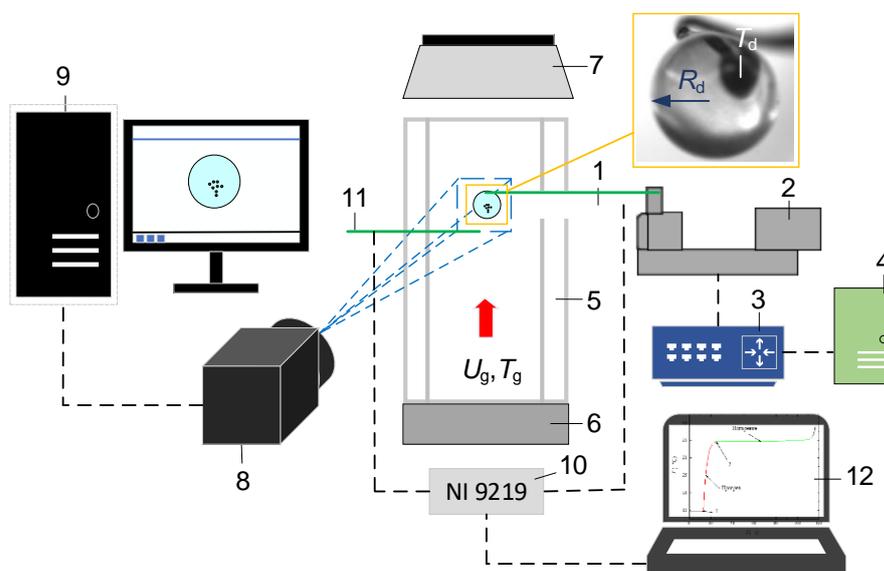


Рисунок 1 - Схема стенда: 1, 11 - платина-родиевые термопары, 2 – шаговый двигатель, 3 - микроконтроллер «DC 7,5-24», 4 - блок питания, 5 – кварцевый цилиндр, 6 - тепловой нагнетатель, 7 - система воздухообмена, 8 - кросскорреляционная камера, 9 - персональный компьютер, 10 - высокоскоростная плата аналогового ввода, 12 – ноутбук.

Контроль значений температуры капли (T_d) и внешней по отношению к капле газовой среды (T_g) осуществлялся с помощью измерительного комплекса, состоящего из высокоскоростной платы аналогового ввода 10 «National Instruments» типа NI 9219, платина-родиевых термопар 1, 11 (диапазон измеряемых температур 273–1473 К, систематическая погрешность ± 3 К, время теплового запаздывания менее 0,1 с) и ноутбука 12 с предустановленной программой «National Instruments LabVIEW». Максимальные случайные погрешности измерения T_d и T_g не превышали ± 15 К.

На рисунке 1.1.4.1.2 представлен типичный тренд температуры в капле (T_d) во времени, полученный экспериментально. 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 и постоянной

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

$$W_h = \frac{\Delta T}{\Delta t},$$

где ΔT – разность температуры насыщения при данной температуре газов (T_s) и начальной температуры капли (T_d), Δt – время достижения температуры насыщения, с.

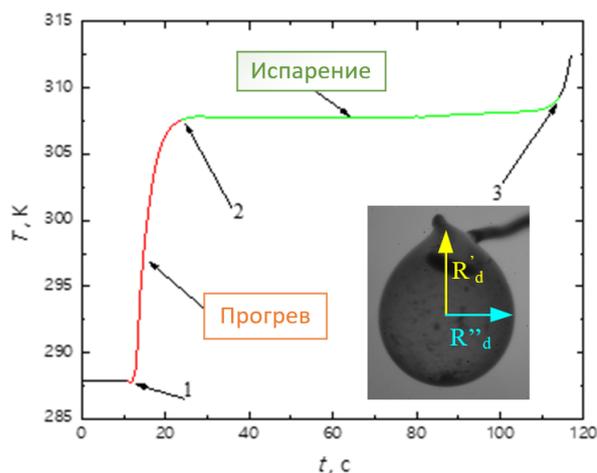


Рисунок 1.1.4.1.2 - Тренд температуры капли воды ($R_d \approx 1$ мм) с твердой нерастворимой примесью в процессе ее нагрева до 378 К: 1 – момент ввода капли в высокотемпературную газовую среду, 2 – процесс испарения с постоянной скоростью, 3 – момент полного испарения капли.

Скорость испарения определялась при обработке полученных экспериментально изображений изменения радиуса капель в пакете Actual Flow. С применением специализированных программных фильтров выделялись границы капель, нейтрализовались шумы и определялись радиусы капель (R_d). Погрешность определения R_d не превышала 1,5 %. Стоит отметить, что для неоднородных капель жидкости в ходе проведения экспериментов при подвешивании на спай термопары наблюдалось изменение формы – вытягивание (рисунок 1.1.4.1.2). При обработке экспериментальных данных радиус капель, форма которых отлична от сферы, определялся как:

$$R_d = (R'_d + R''_d)/2 \quad (1.1.4.1.1)$$

где R'_d, R''_d - радиус капли в вытянутой и суженной части, соответственно.

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 [16]:

$$W_e = \rho_d(R_d - R_d^*)/t_d, \quad (1.1.4.1.2)$$

где ρ_d — плотность воды [кг/м³], R_d, R_d^* - начальное и конечное значения радиуса капли [м], t_d — время, за которое радиус капель уменьшился с R_d^* до R_d [с]. Погрешность определения массовой скорости испарения капель не превышала 2,5 %.

Таблица 5 - Скорости прогрева и испарения капель водной суспензии с твердыми примесями

		$W_h, \text{K/c}$				
$R_d = 1 \text{ мм}$ $n = 0,5 \%$ $U_g = 3,12$ м/с	T_g, K	333	373	473	563	663
	Вода	0,51068	1,19403	2,9454	4,27599	6,05641
	TiO_2	0,9615	2,10896	4,5704	6,33584	9,09227
	Al	0,96439	1,9981	4,35579	6,0823	8,85635
	Глина	0,81541	1,72643	3,78412	5,17709	7,58
	Шлам	1,19642	2,30788	4,90844	7,20215	11,03929
	Полиамид	0,87218	1,81965	4,04139	5,49075	7,82367
		$W_h, \text{K/c}$				
$R_d = 1 \text{ мм}$ $n = 1\%$ $U_g = 3,12$ м/с	T_g, K	333	373	473	563	663
	Вода	0,51068	1,19403	2,9454	4,27599	6,05641
	TiO_2	1,09716	1,94799	4,75447	6,40489	9,17908
	Al	0,94751	1,7641	4,43214	6,03823	9,07557
	Глина	0,7885	1,6526	3,68277	5,0444	7,59
	Шлам	1,22921	2,16584	5,10605	7,31087	11,0912
	Полиамид	0,87599	1,66958	3,83169	5,39505	7,82587
		$W_h, \text{K/c}$				
$R_d = 1 \text{ мм}$ $n = 2,5 \%$ $U_g = 3,12$ м/с	T_g, K	333	373	473	563	663
	Вода	0,51068	1,19403	2,9454	4,27599	6,0564
	TiO_2	1,0716	1,94799	4,85447	7,10489	10,4790
	Al	0,84751	1,7641	4,23214	6,63823	9,47557
	Глина	0,7885	1,70526	3,68277	6,0444	8,05
	Шлам	1,2921	2,16584	5,10605	7,4082	11,2391
	Полиамид	1,07599	1,66958	4,08169	6,19505	8,2587

$W_e, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$						
$R_d = 1 \text{ мм}$ $n = 0,5 \%$ $U_g = 3,12$ м/с	$T_g, \text{К}$	333	373	473	563	663
	Вода	0,00388	0,0074	0,01976	0,031	0,0443
	TiO_2	0,0044	0,008	0,0212	0,036	0,050
	Al	0,00403	0,0078	0,0208	0,0332	0,048
	Глина	0,00434	0,0088	0,0222	0,0406	0,0561
	Шлам	0,00458	0,0088	0,024	0,044	0,0615
	Полиамид	0,00493	0,0100	0,026	0,0456	0,06388
$W_e, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$						
$R_d = 1 \text{ мм}$ $n = 1 \%$ $U_g = 3,12$ м/	$T_g, \text{К}$	333	373	473	563	663
	Вода	0,0032	0,0074	0,0197	0,031	0,0448
	TiO_2	0,0062	0,0105	0,0256	0,042	0,0658
	Al	0,0048	0,0088	0,0232	0,038	0,06
	Глина	0,0080	0,0120	0,0268	0,044	0,068
	Шлам	0,008	0,0130	0,0284	0,048	0,069
	Полиамид	0,0088	0,0148	0,03	0,051	0,072
$W_e, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$						
$R_d = 1 \text{ мм}$ $n = 2,5 \%$ $U_g = 3,12$ м/с	$T_g, \text{К}$	333	373	473	563	663
	Вода	0,003288	0,00744	0,0197	0,0311	0,0448
	TiO_2	0,0052	0,0092	0,022	0,0359	0,05497
	Al	0,004	0,008	0,0208	0,034	0,050
	Глина	0,006	0,01	0,02301	0,03821	0,05905
	Шлам	0,0076	0,0112	0,0256	0,04269	0,06197
	Полиамид	0,0084	0,0128	0,0268	0,044	0,06671

Таблица 6 - Скорости прогрева и испарения капель водной суспензии с твердыми примесями в виде TiO_2 при варьировании их массовой концентрации и размера

$W_h, \text{К/с}, (U_g = 3,12 \text{ м/с})$						
$n, \%$	$R_d, \text{мм}$	$T_g, \text{К}$				
		333	373	473	563	663
0,5	0,8	1,95	2,61	6,32	8,91	14,51
	1,0	0,96	2,11	4,57	6,34	9,09
	1,3	0,81	1,73	4,27	5,77	8,39
1	0,8	1,78	3,31	5,62	9,48	14,06
	1,0	1,09	1,95	4,75	6,41	9,18
	1,3	0,81	1,74	3,91	5,23	8,45
2,5	0,8	1,59	2,61	5,89	8,76	15,03
	1,0	1,07	1,97	4,85	7,10	10,48
	1,3	0,81	1,64	3,37	5,36	8,52

$W_e, \text{ кг/ (м}^2 \cdot \text{с)}, (U_g = 3,12 \text{ м/с)}$						
<i>n, %</i>	<i>R_d, мм</i>	<i>T_g, К</i>				
		333	373	473	563	663
0,5	0,8	0,0056	0,0102	0,0283	0,0411	0,0548
	1,0	0,0105	0,0188	0,0441	0,079	0,1049
	1,3	0,0149	0,0274	0,059	0,1197	0,1550
1	0,8	0,0067	0,0131	0,0262	0,0382	0,0682
	1,0	0,0120	0,0221	0,0410	0,0749	0,1306
	1,3	0,0173	0,0311	0,0557	0,1115	0,2131
2,5	0,8	0,0022	0,0140	0,0318	0,0439	0,0779
	1,0	0,0079	0,0239	0,0467	0,0817	0,1469
	1,3	0,0097	0,033	0,0616	0,1279	0,228

Таблица 7 - Скорости прогрева и испарения капель водной суспензии с твердыми примесями в виде TiO_2 при варьировании ее массовой концентрации и скорости движения газов

$W_h, \text{ К/с } (R_d=1 \text{ мм})$						
<i>n, %</i>	<i>U_g, м/с</i>	<i>T_g, К</i>				
		333	373	473	563	663
0,5	2,81	1,06	2,1	4,18	6,04	8,75
	3,12	0,96	2,11	4,57	6,34	9,09
	3,47	1,42	2,68	4,94	7,53	11,13
1	2,81	1,05	2,07	4,36	6,43	10,27
	3,12	1,09	1,95	4,75	6,41	9,18
	3,47	1,62	2,87	5,71	7,87	11,82
2,5	2,81	1,24	2,08	4,67	6,74	10,36
	3,12	1,07	1,97	4,85	7,10	10,48
	3,47	1,68	2,72	5,48	7,87	12,56
$W_e, \text{ кг/ (м}^2 \cdot \text{с)}, (U_g = 3,12 \text{ м/с)}$						
<i>n, %</i>	<i>U_g, м/с</i>	<i>T_g, К</i>				
		333	373	473	563	663
0,5	2,81	0,0038	0,0074	0,0197	0,0311	0,0443
	3,12	0,0044	0,008	0,0212	0,0360	0,050
	3,47	0,0040	0,0078	0,0208	0,0332	0,048
1	2,81	0,0043	0,0088	0,0222	0,0406	0,0561
	3,12	0,0045	0,0088	0,0240	0,0440	0,0615
	3,47	0,0049	0,0100	0,0260	0,04562	0,0638
2,5	2,81	0,0049	0,0110	0,0264	0,04880	0,0680
	3,12	0,0051	0,0121	0,0276	0,05176	0,0720
	3,47	0,0053	0,0151	0,0287	0,05472	0,0760

Таблица 8 - Скорости прогрева и испарения капель водной суспензии с различной комбинацией твердых примесей

$W_h, \text{K/s}$ ($U_g = 3,12 \text{ м/с}$, $R_d = 1 \text{ мм}$)						
<i>n, %</i>	Комбинация примесей	<i>T_g, K</i>				
		333	373	473	563	663
0,5+0,5	Al + полиамидные частицы	0,78	1,53	5,22	7,21	9,85
0,5+0,5	Угольный шлам + глина	0,86	2,66	5,31	7,55	9,45
0,5+0,5+0,5 +0,5+0,5	TiO ₂ + глина + полиамидные частицы + угольный шлам + Al	0,78	2,29	5,12	6,39	9,51
$W_e, \text{кг/ (м}^2 \cdot \text{с)}$, ($U_g = 3,12 \text{ м/с}$, $R_d = 1 \text{ мм}$)						
<i>n, %</i>	Комбинация примесей	<i>T_g, K</i>				
		333	373	473	563	663
0,5+0,5	Al + полиамидные частицы	0,0075	0,0136	0,0356	0,0589	0,0801
0,5+0,5	Угольный шлам + глина	0,0091	0,0142	0,0382	0,0635	0,0825
0,5+0,5+0,5 +0,5+0,5	TiO ₂ + глина + полиамидные частицы + угольный шлам + Al	0,0079	0,0113	0,0308	0,0514	0,0757