

**База данных с размерными и безразмерными функциональными зависимостями выходных параметров от входных, позволяющая прогнозировать эффективные условия интенсивной термической очистки воды от твердых растворимых примесей**

Предполагая осесимметричную форму капли и ее однородные свойства (на этапах прогрева и испарения), а также пренебрегая внешними силами (например, силой тяжести), действующими на каплю, уравнение энергии для сферической капли имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2.3.1.1)$$

Для первого и второго этапов применяются следующие граничные условия:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad (2.3.1.2)$$

$$h(T_g - T) = k_d \frac{\partial T}{\partial r} + H_{ev} \frac{\dot{m}_v}{A_d}, \quad r = R_d. \quad (2.3.1.3)$$

Для расчета коэффициентов тепло- и массопереноса на границе раздела газ–жидкость при вынужденной конвекции при обтекании капли потоком газа используются корреляции Ранца и Маршалла.

$$Nu = 2 + 0.6 Re_d^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (2.3.1.4)$$

$$Sh = 2 + 0.6 Re_d^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}. \quad (2.3.1.5)$$

Третий этап характеризуется формированием твердого каркаса в приповерхностном слое капли. Твердый кристаллический каркас моделируется как пористая среда, что не блокирует дальнейшее испарение воды после его формирования. На четвертом этапе происходит сушка капли с повышением температуры воды внутри пористого кристаллического каркаса.

Уравнение энергии для пористого кристаллического каркаса определяется как:

$$\frac{T_{cr}}{\partial t} = \frac{a_{cr}}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T_{cr}}{\partial r} \right), \quad R_i(t) < r < R_p, \quad (2.3.1.6)$$

где  $a$  – температуропроводность,  $R_p$  – радиус пористого каркаса.

Уравнение (1.2.4.2.1) решается с учетом следующих граничных условий:

$$k_{cr} \frac{\partial T_{cr}}{\partial r} = k_{wc} \frac{\partial T_{wc}}{\partial r} + H_{evap} \frac{\dot{m}_v}{A_d}, \quad (2.3.1.7)$$

$$r = R_i(t)$$

$$T_{wc} = T_{cr}, \quad r = R_i(t) \quad (2.3.1.8)$$

$$h(T_g - T_{cr}) = k_{cr} \frac{\partial T_{cr}}{\partial r}, \quad r = R_{cr} \quad (2.3.1.9)$$

Если  $\varepsilon$  обозначить как пористость твердого кристаллического каркаса, то теплопроводность этого каркаса можно рассчитать, как:

$$k_{cr} = k_s(1 - \varepsilon) + \varepsilon k_v. \quad (2.3.1.10)$$

Уравнение энергии для ядра капли соленой воды:

$$\frac{\partial(\rho_{wc} T_{wc} c_p)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_{wc} r^2 \frac{\partial T_{wc}}{\partial r} \right), \quad 0 < r < R_i(t) \quad (2.3.1.11)$$

со следующими граничными условиями:

$$k_{cr} \frac{\partial T_{cr}}{\partial r} = k_{wc} \frac{\partial T_{wc}}{\partial r} + H_{evap} \frac{\dot{m}_v}{A_d}, \quad r = R_i(t) \quad (2.3.1.12)$$

$$T_{wc} = T_{cr}, \quad r = R_i(t) \quad (2.3.1.13)$$

$$\frac{\partial T_{wc}}{\partial r} = 0, \quad r = 0 \quad (2.3.1.14)$$

Скорость испарения воды после формирования пористого кристаллического каркаса описывалось как:

$$\frac{dr_{wc}}{dt} = - \frac{\dot{m}_v}{\varepsilon \rho_{wc, w} 4\pi r_{wc}^2}. \quad (2.3.1.15)$$

Предполагается, что диаметры пор намного больше среднего свободного пробега молекул пара. Максимальное число Кнудсена в этом случае равно  $R_p = \lambda_v / d_p < 0.1$  ( $d_p$  – диаметр пор). Таким образом учитывается, что диффузия водяного пара через пористый кристаллический каркас не зависит от размера пор, а зависит только от градиента концентрации. Поэтому принято, что каждая пора представляет собой трубку Стефана, для которой справедливо соотношение для массового расхода пара:

$$\dot{m}_v = -\frac{p_g M_w D_{v,cr}}{R(T_{cr,s} + T_{wc,s})} \frac{8\pi \varepsilon^\beta (R_p r_{wc})}{(R_p - r_{wc})} \ln \left[ \frac{p_g - p_v}{p_g + \left( \frac{R}{4\pi M_w h_D R_p^2} \dot{m}_v + \frac{p_{v,\infty}}{T_g} \right) T_{cr,s}} \right], \quad (2.3.1.16)$$

где  $p_v$ ,  $p_{v,\infty}$  и  $p_g$  – парциальное давление водяного пара внутри пор, парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе и общее давление водяного пара у поверхности капли,  $\beta$ ,  $M_w$  и  $R$  – свободный параметр, молекулярная масса и универсальная газовая постоянная соответственно. Значение влажности ( $\varphi$ ) принято постоянным и равнялось 30%.

При распылении в спрей-системе рассмотренная модель неоднородной капли инжектируется в область высоких температур. Предполагается, что поток газа находится в установившемся состоянии. Газовая фаза рассматривается в эйлеровой системе координат и описывается стационарными усредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье – Стокса:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (2.3.1.17)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho l + \kappa] + F, \quad (2.3.1.18)$$

Уравнение баланса сил для соленой капли в газе имеет вид:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F, \quad (2.3.1.19)$$

где  $\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$ .

Число Рейнольдса  $Re$  определяется как:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (2.3.1.20)$$

Процесс прогрева и движения капель при спрейном распылении описывались уравнениями:

$$m_p \frac{\partial v}{\partial t} = F_t \quad (2.3.1.21)$$

$$m_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = Q_t \quad (2.3.1.22)$$

$$\frac{\partial d_p}{\partial t} = \frac{2\dot{m}_d}{\pi \rho_p d_p^2} \quad (2.3.1.23)$$

Основная задача при апробации разработанных моделей состояла в определении границ их применимости, учете группы основных процессов, факторов и эффектов, обеспечении удовлетворительного согласия прогнозируемых характеристик с экспериментальными данными, а также последующем переходе на существенно большие диапазоны варьирования параметров по сравнению с экспериментами с целью приближения условий протекания процессов в нагревательных камерах термической и огневой очистки жидкостей.

Рассматриваемая система уравнений решается аналитически, а результаты аналитического решения внедряются в численный код на каждом коротком шаге по времени. Использовался постоянный шаг по времени 0.000001 с. Характеристики ЭВМ: процессор Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v3 @ 2.60GHz 2.60GHz (количество процессоров – 2), установленная ОЗУ 128 Гб. Время вычислений от 1 до 5 минут.

Процесс отделения воды от примесей в распылительной башне осуществляется следующим образом. Водный раствор с примесью подается на распылительную форсунку, где при постоянном давлении и влажности теплоноситель подогревается с  $T_0$  до  $T_g$ . Отработавший воздух с удаленной из раствора влагой выходит из распылительной башни. Сделаем следующие допущения: 1 – распылительную башню будем рассматривать как объект с сосредоточенными параметрами, 2 – изменение температуры воздуха от  $T_0$  на входе в спрей-систему до  $T_g$  на выходе из нее происходит по линейному закону, 3 – время отделения воды от примесей в системе составило 5 с.

Добавление примеси в чистый водный раствор приводит к снижению дисперсности, выражающееся в увеличении размера капель (рис. 1). Средний радиус ( $R_d$ ) капель при добавлении примеси  $Y_{av} = 10$  масс.% увеличивается на

25% относительно чистого водного раствора. Данный эффект может быть скомпенсирован путем оптимизации технологических параметров, конструкции нагревательной камеры и форсунок. Увеличение температуры газа ( $T_g$ ) и угла распыла ( $\gamma$ ) в нагревательной камере на 7% и 5% соответственно увеличит скорость испарения капель. Важно отметить, что оптимальное сочетание этих параметров зависит от конкретной установки и условий распыления.

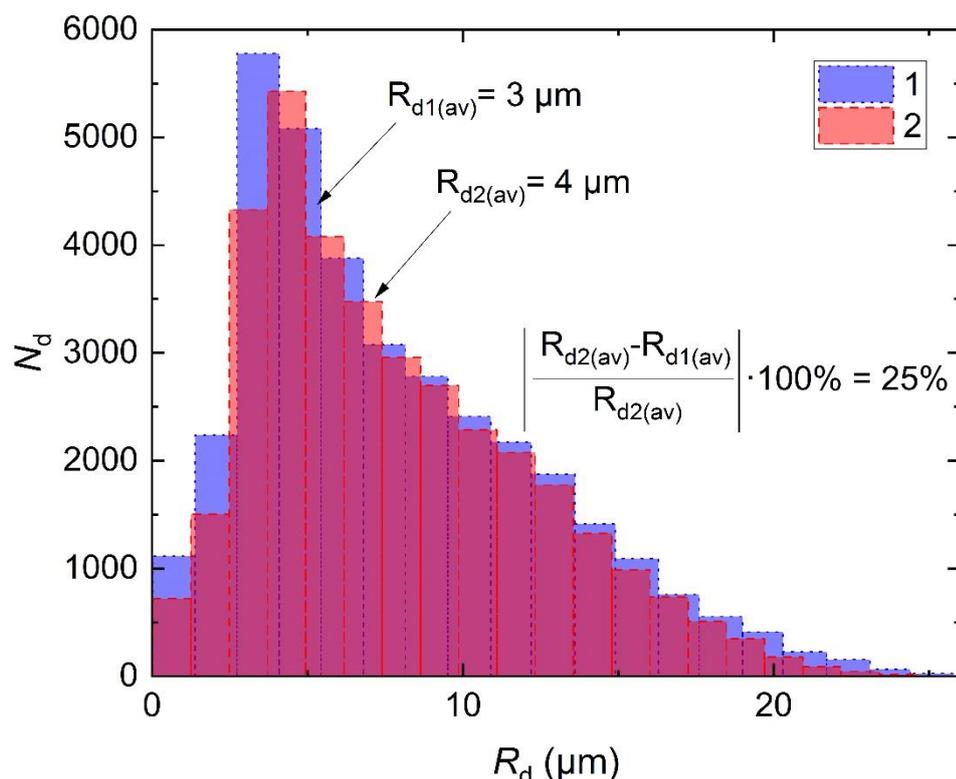


Рисунок 1 – Распределение количества ( $N_d$ ) неоднородных капель водного раствора с твердой растворимой примесью в качестве хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ) от их радиуса ( $R_d$ ) для: 1 –  $Y_{av} = 0$  масс.%, 2 –  $Y_{av} = 10$  масс.%. Входные параметры моделирования:  $T_0 = 333.15$  К,  $T_g = 700.0$  К,  $\gamma = 30^\circ$ ,  $S \times B = 3.0 \times 2.0$  м<sup>2</sup>,  $P_g = 101325$  Па

### Варьируемые параметры и регулируемые характеристики

Для исследования поведения капель с примесями при испарении необходимо учитывать множество параметров, так как каждый из них может существенно влиять на динамику процесса. Важное значение имеет тип

примесей, поскольку разные вещества обладают уникальными физико-химическими свойствами (теплопроводность, теплоемкость, плотность, молярная масса), которые могут изменять скорость испарения капли и её тепловые характеристики. Размер капель также играет критическую роль; мелкие капли испаряются быстрее, тогда как крупные капли могут демонстрировать иную динамику.

Температура подаваемого газа и скорость его движения влияют на теплопередачу и конвективные процессы, которые усиливают или замедляют испарение. Концентрация примесей в каплях определяет, как они взаимодействуют с окружающей средой, а начальная температура капель служит отправной точкой для всех термодинамических процессов, происходящих во время испарения. Все эти факторы, действуя в совокупности, создают сложную динамическую систему, требующую тщательной настройки и изучения для оптимизации процессов, связанных с испарением капель с примесями и их применением в различных технологических областях.

Таким образом, в качестве варьируемых параметров выбраны:

1. Концентрация примесей (0; 5 масс.%; 10 масс.%; 20 масс.%)
2. Начальная температура (300 К, 320 К, 330 К, 333 К, 350 К)
3. Температура газа (700 К, 1400 К, 2200 К)
4. Угол распыла (25°, 30°, 35°)
5. Габаритные размеры нагревательной камеры (3 × 2 м<sup>2</sup>, 4 × 2 м<sup>2</sup>, 3 × 1 м<sup>2</sup>).

### Номенклатура

$a$  – температуропроводность капли, м<sup>2</sup>/с;

$B$  – высота нагревательной камеры, м;

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -ой капле, м<sup>2</sup>/с;

$d$  – диаметр, м;

$ER$  – массовая скорость испарения, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$F$  – внешние силы, Н;

$g$  – ускорение свободного падения, (9.8 м/с<sup>2</sup>);

$h$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$H_{ev}$  – теплота парообразования, Дж/кг;

$k$  – теплопроводность, Вт/(м·К);

$L_i$  – расстояние между  $i$ -ой каплей в группе, м;

$M_w$  – молекулярная масса, кг/моль;

$\dot{m}_v$  – линейная скорость испарения, м/с;

$N$  – количество элементов пространственной сетки, -;

$n$  – количество капель в пределах группы, шт.;

$p_g$  – общее давление паров воды в окружающем воздухе, Па;

$p_v$  – давление насыщенных паров воды за счет испарения, Па;

$p_{v,\infty}$  – давление насыщенных паров воды в окружающем воздухе, Па;

$Q$  – интенсивность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$R$  – универсальная газовая постоянная, (8.31 Дж/(моль·К));

$r$  – радиальная координата, м;

$R_d$  – радиус капли, м;

$R_p$  – радиус пористого каркаса, м;

$S$  – длина нагревательной камеры, м;

$T$  – температура, К;

$t$  – время, с;

$u$  – скорость, м/с;

$T_g$  – температура газа, К;

$T_s$  – температура в приповерхностном слое капли, К;

$Y_{av}$  – массовая доля примеси в капле, масс.%.

$\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – угол распыла, °;

$\varphi$  – относительная влажность, %.

Таблица 1 – Результаты моделирования процесса тепломассопереноса капель раствора аэрозольного потока с твердой растворимой примесью в качестве хлорида натрия (NaCl) при различных варьируемых параметрах

№	$t_{er}$ , с	$Y_{av}$ , масс.%	$T_0$ , К	$T_g$ , К	$\gamma$ , °	$S \times B$ , м <sup>2</sup>
1	4,9	0	333	700	30°	3 × 2
2	5,0	5				
3	5,05	10				
4	5,12	20				
5	5,1	5	300	700	30°	3 × 2
6	5,17					
7	5,05					
8	4,98					
9	4,92					
12	3,34		1400	2200	700	25°
13	1,89					
14	5,16		700	700	35°	4 × 2
15	4,73					
16	4,97					
17	5,05	30°	700	700	3 × 1	