

База данных раздела 1.3. Математическая обработка и обобщение результатов экспериментов и моделирования процессов гидрогазодинамики и тепломассопереноса для спрея очищаемой воды с твердыми нерастворимыми примесями

Для наполнения базы данных с характеристиками процессов прогрева, испарения и распыления очищаемой воды с содержанием твердых нерастворимых примесей использовалась разработанная математическая модель, приведенная ниже.

Схема области решения задачи обоснования эффективных условий удаления твердых нерастворимых примесей из воды представлена на рис. 1. Область решения представляла собой испарительную камеру размерами $D \times H$. Сверху в область решения поступал аэрозольный поток, который нагревался разогретым газом (воздухом). Температура боковых стенок испарительной камеры задавалась постоянной. Нижняя стенка представляла собой стенку с постоянной температурой, при соударении твердых частиц с нижней стенкой они исчезали, т.е. моделировались условия удаления твердых частиц из испарительной камеры.

В процессе движения через поток разогретых газов капли интенсивно испарялись с образованием водяного пара. Последний отводился через выходные отверстия в верхней части камеры.

Процесс термической очистки жидкости от твердых нерастворимых примесей включает взаимодействие окружающего нагретого воздуха и капель жидкости. Для учета этих взаимодействий в настоящем исследовании применен подход Эйлера–Лагранжа.

Для решения задачи использовался программный комплекс ANSYS Fluent. Для расчетов в газовой фазе применялся подход Эйлера, который основывался на использовании неподвижной равномерной расчетной сетки. Для моделирования процессов конвекции и диффузии паров испаряющихся капель применена модель Species transport. В качестве компонентов газовой

фазы учитывается воздух и водяной пар (H₂O). Уравнения непрерывности, импульса, энергии и переноса веществ в газовой фазе записываются следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g U_g) = S_m \quad (1.3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho_g U_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g U_g U_g) = -\nabla p_g + \nabla \cdot (\mu_g \nabla U_g) + S_{U,g} \quad (1.3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho_g e_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g e_g U_g) - \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot (a_{eff} \nabla h_g) + \rho_g U_g + S_{h,g} \quad (1.3.3)$$

$$\frac{\partial \rho_k Y_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k Y_k U_g) = \nabla \cdot (\rho_k D_k \nabla Y_k) + S_{Y,k} \quad (1.3.4)$$

где ρ_g , U_g и e_g – плотность, скорость и внутренняя энергия газа, соответственно, p – давление окружающего газа, $S_{U,g}$, $S_{h,g}$ – источниковые члены импульса и энергии. Y_k — массовая доля компонента k , а $S_{Y,k}$ обозначает источниковый член доли водяного пара.

Представленная модель отслеживает движение капель дисперсной фазы в рамках подхода Лагранжа. Дифференциальные уравнения движения, скорости и энергии для капель жидкости:

$$\frac{d(x_d)}{dt} = U_d \quad (1.3.5)$$

$$\frac{d(m_d U_d)}{dt} = F_d \quad (1.3.6)$$

$$\frac{d(m_d C_{p,d} T_d)}{dt} = h_d A_d (T_g - T_d) - \frac{dm_d}{dt} \quad (1.3.7)$$

где m_d – масса капли, x_d , U_d и T_d – вектор положения, скорость и температура капли соответственно. F_d — силы, действующие на каплю (сила тяжести и сила сопротивления), h_d – коэффициент теплопередачи между каплей и газом, в котором Nu_d рассчитывается по формуле Ранца-Маршалла:

$$Nu_d = \frac{h_d d}{\lambda_d} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr_d^{1/3} \quad (1.3.8)$$

При движении капель через разогретые газы учитывался коэффициент сопротивления воздуха. Коэффициент сопротивления, C_D :

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (1.3.9)$$

где a_1 , a_2 , a_3 – константы, которые принимаются в зависимости от числа Рейнольдса.

Учет доли твердой фазы в исследуемых каплях осуществлялся через долю неиспаряемого компонента и учет эффективных термодинамических свойств жидкости.

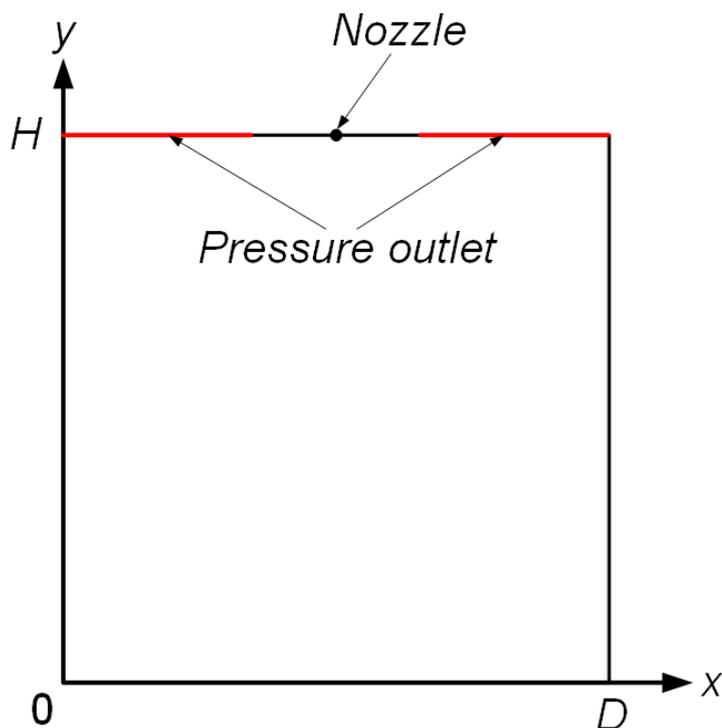
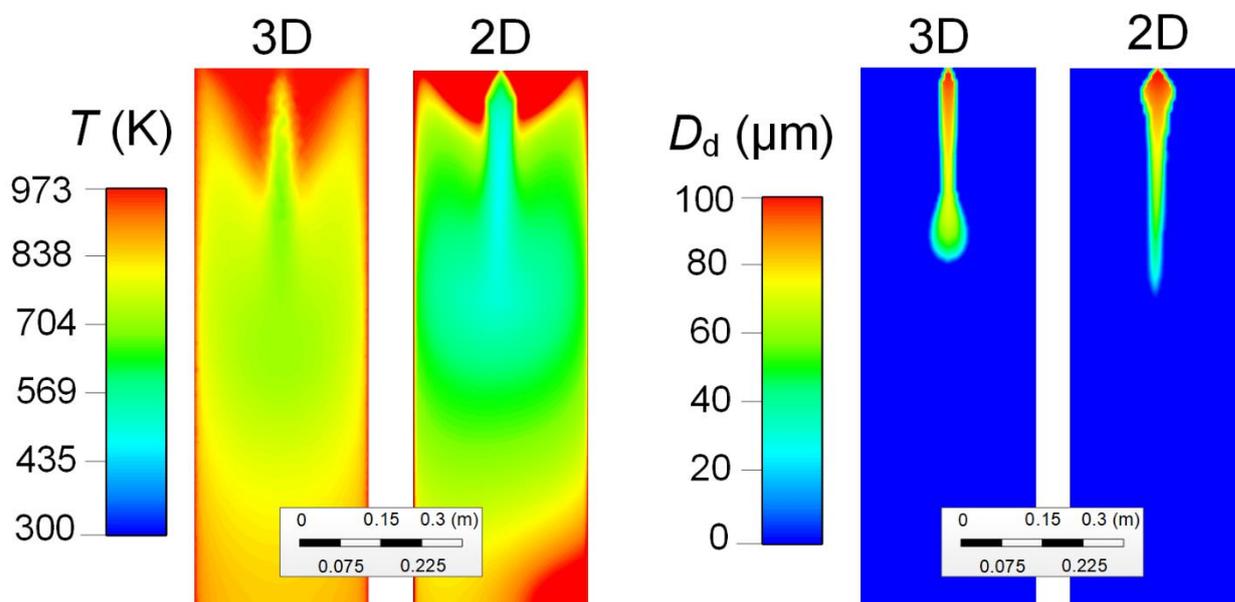


Рисунок 1 – Схема области решения задачи

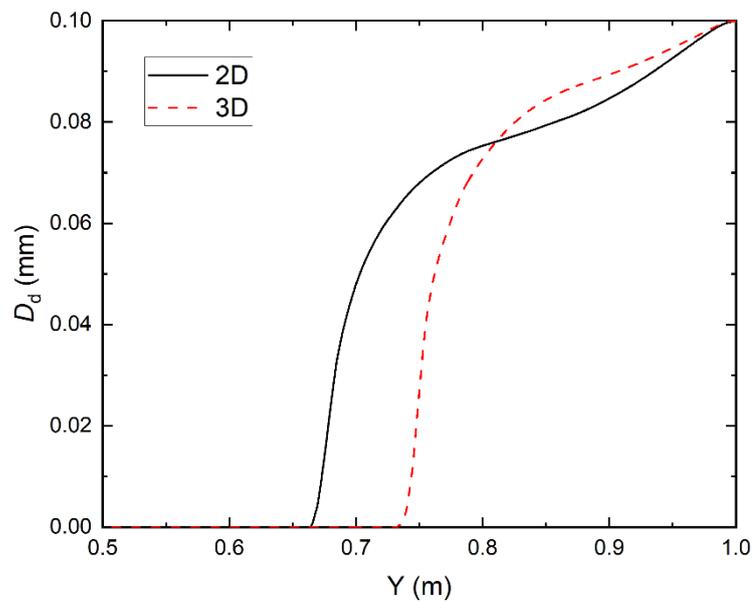
Рассматриваемая система уравнений решается численно с использованием метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent. Использовался постоянный шаг по времени 0.001 с. Характеристики ЭВМ: процессор Intel(R) Core(TM) i7-8700K CPU @ 3.70GHz, установленная ОЗУ 32 Гб. Время вычислений от 30 до 40 минут.

Верификация модели выполнена путем сравнения результатов в двумерной и трехмерной постановках. На рис. 2 сравниваются результаты расчетов, полученные в двумерной и трехмерной постановках при одинаковых начальных условиях. Для определения влияния пространственных эффектов

были проведены дополнительные тестовые расчеты с использованием трехмерной постановки. Как видно из рис. 2б, результаты, полученные в трехмерной постановке, могут отличаться от полученных в двумерной постановке на 10-15%. Можно отметить значительное влияние пространственных эффектов на распределение температуры в испарительной камере, вследствие чего увеличиваются температуры в вертикальном и горизонтальных сечениях и снижается глубина проникновения спрея, однако такой подход требует больших затрат вычислительных мощностей, что ограничивает потенциал для проведения параметрического исследования.



a



б

Рисунок 2 – Сравнение полей температуры и концентрации капель жидкости (а) и их распределения размеров капель жидкости по высоте испарительной камеры (б) для двумерной и трехмерной постановок. Параметры расчета: $T_g = 973$ К, $U_{d0} = 3$ м/с, $T_{d0} = 300$ К, $G = 6$ г/с.

Разработанная модель была валидирована с сопоставлением результатов экспериментов и численного моделирования при экранировании спреем теплового излучения. При проведении экспериментов для определения влияния характеристик экранирования спреем теплового излучения применен экспериментальный комплекс, который включал средства для создания теплового излучения (очаг возгорания, ИК нагреватель), спрея (форсуночные устройства, генерирующие различные по дисперсности потоки), а также определения теплового потока (термопары типа К для регистрации температуры поверхности объекта защиты). Объект защиты представлял поглощающий экран размерами $0,3 \times 0,2$ м, выполненный из листа картона толщиной 1 мм, окрашенного черной матовой краской (плотность картона около 350 кг/м³, степень черноты окрашенной поверхности $\varepsilon \approx 0,9$). Для подключения и опроса термопар использовался модуль аналогового ввода

National Instruments NI 9219, для записи показаний – ПК. На расстоянии L от объекта защиты устанавливался источник лучистого теплового потока. Вокруг источника лучистого теплового потока находился металлический экран (открытый со стороны спрея), который направлял тепловое излучение (q) в сторону объекта защиты. Между источником лучистого теплового потока и объектом защиты создавался спрей, генерируемый форсункой. Поперечный размер спрея H регулировался посредством изменения расстояния между стальными листами. Распылительная форсунка и стальные листы устанавливались и закреплялись на специализированных профилях. Результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (рис. 3). Максимальные отклонения достигают 32% при концентрациях $\theta_d \sim 0,3$ л/м³ (рис. 3а). В рамках диапазонов варьирования входных параметров эти отклонения соответствуют доверительным интервалам получения экспериментальных данных. Проведенные теоретические исследования показали, что с ростом концентрации капель в потоке коэффициент эффективности поглощения увеличивается. Это связано с увеличением площади поверхности испарения жидкости. На рис. 3б показано, что с увеличением ширины завесы коэффициент эффективности поглощения K_{ef} увеличивается как в модели, так и в эксперименте. Отклонение между результатами экспериментов и численного моделирования возрастает с увеличением ширины аэрозольной завесы. Это обусловлено усилением коллективных эффектов взаимного влияния группы капель в завесе, которые возникают вследствие сил термофореза, турбофореза, конвективных колонок и другие, которые совместно сложно учесть при моделировании. Они усиливают нелинейность физико-химических процессов и эффектов и существенно увеличивают времена расчетов на ПК.

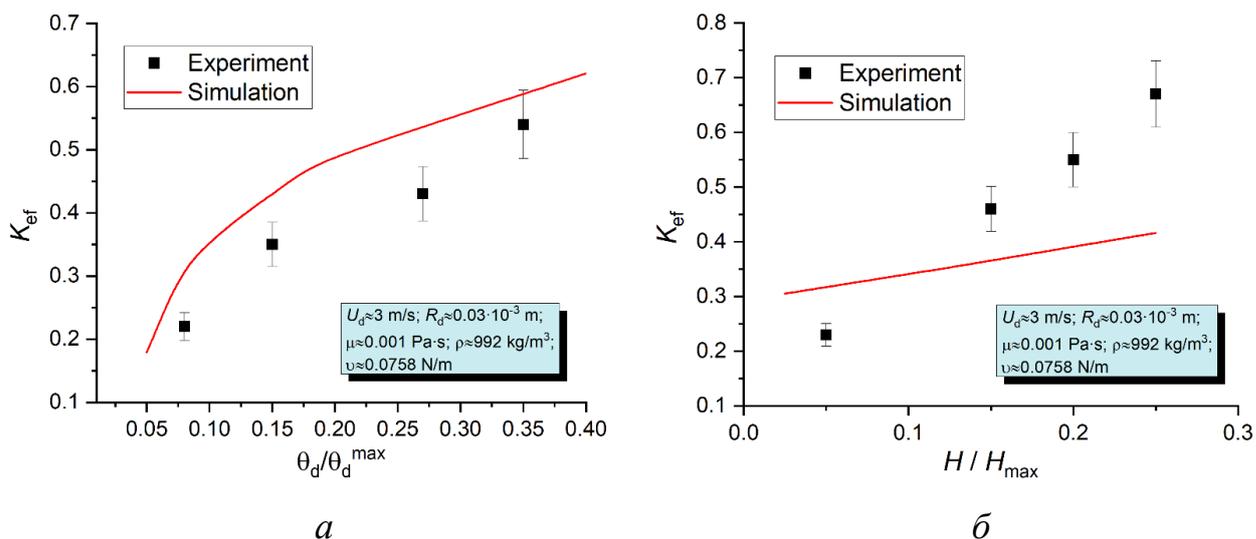


Рисунок 3 – Сопоставление результатов экспериментов и численного моделирования: *а* – $K_{ef}=f(\theta_d/\theta_d^{\max})$ (при $\theta_d^{\max}=0,2 \text{ л/м}^3$ и $H=0,1 \text{ м}$, $L=0,75 \text{ м}$); *б* – $K_{ef}=f(H/H^{\max})$ (при $\theta_d=0,016 \text{ л/м}^3$ и $H^{\max}=2 \text{ м}$).

Варьируемые параметры и регулируемые характеристики

Основной задачей при удалении твердых нерастворимых примесей из воды при применении термических методов на основе выпаривания и выжигания является испарение жидкости с последующим ее конденсацией в виде очищенной воды, а также сбор или утилизация твердого нерастворимого остатка. Основной задачей исследований являлось изучение и обоснование эффективных условий удаления твердых нерастворимых примесей из воды при применении термических методов очистки на основе результатов математического моделирования.

С использованием разработанной модели выпаривания твердых нерастворимых примесей в составе спрея выполнены оценки влияния ключевых параметров на глубину проникновения спрея в испарительной камере. Выполнены оценки влияния геометрических размеров камеры (высоты и диаметра), температуры газовой среды, расхода жидкости на глубину проникновения спрея. При проведении соответствующих оценок высота испарительной камеры ограничивалась 10 м, так как размеры таких камер не превышают данного значения. Начальная температура жидкости

составляла 300 К, средний начальный размер капель жидкости 0,1 мм, начальная скорость движения капель 3 м/с, в качестве базовой жидкости использовалась вода без примесей, также выполнено варьирование типа и концентрации примесей. При выполнении параметрического исследования варьировались следующие параметры: высота камеры (H) от 1 до 10 м, диаметр камеры (D) от 0,325 до 2,5 м, расход жидкости (G) от 0,006 до 0,3 кг/с, температура газовой среды (T_g) от 673 до 1273 К, концентрация и тип твердой примеси, которые учитывались с использованием числа Онезорге (Oh). Целью работы являлось оптимизация размеров испарительной камеры в зависимости от характеристик жидкостного потока. Результаты исследования представлены в таблице 2.

Номенклатура

D – диаметр испарительной камеры, м;

G – расход жидкости, кг/с;

H – высота испарительной камеры, м;

L – глубина проникновения спрея, м;

Oh – число Онезорге, -;

T_g – температура газовой среды, К.

Таблица 1 – Свойства и характеристики исследуемых примесей.

Название примеси	M , г/моль	λ , Вт/(м·К)	c , Дж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
Диспергированная древесина	229.8	0.08	2512	2700
Fe	55.85	71	444	2000
Al	26.98	20	920	1120
Al ₂ O ₃	101.96	40	750	3500
Глина	280	0.7	920	1500
Шлам	208.26	1	1478	1250
Твердый остаток от сжигания натурального топлива	31.8	0.15	800	1360

Таблица 1 – Результаты моделирования процесса испарения потока жидкостного спрея

№	H , м	D , м	G , кг/с	T_g , К	L , м	Oh
Варьирование высоты испарительной камеры (H)						
1	1	0.325	0.006	973	0.556	0.01318
2	2.5	0.325	0.006	973	0.562	0.01318
3	5	0.325	0.006	973	0.571	0.01318
4	7.5	0.325	0.006	973	0.554	0.01318
5	10	0.325	0.006	973	0.551	0.01318
Варьирование температуры газовой среды (T_g)						
6	10	0.325	0.006	673	0.788	0.01318
7	10	0.325	0.006	823	0.644	0.01318
8	10	0.325	0.006	973	0.556	0.01318
9	10	0.325	0.006	1123	0.351	0.01318
10	10	0.325	0.006	1273	0.259	0.01318
Варьирование расхода очищаемой жидкости (G)						
11	10	0.325	0.006	673	0.788	0.01318
12	10	0.325	0.05	673	3.945	0.01318
13	10	0.325	0.1	673	6.132	0.01318
14	10	0.325	0.15	673	8.557	0.01318
15	10	0.325	0.006	973	0.551	0.01318
16	10	0.325	0.05	973	2.691	0.01318
17	10	0.325	0.1	973	4.560	0.01318
18	10	0.325	0.15	973	6.030	0.01318
19	10	0.325	0.2	973	7.463	0.01318
20	10	0.325	0.25	973	8.716	0.01318
21	10	0.325	0.006	1273	0.259	0.01318
22	10	0.325	0.05	1273	1.351	0.01318
23	10	0.325	0.1	1273	2.309	0.01318
24	10	0.325	0.15	1273	3.226	0.01318
25	10	0.325	0.2	1273	3.992	0.01318
26	10	0.325	0.25	1273	4.893	0.01318
27	10	0.325	0.3	1273	5.886	0.01318

Варьирование диаметра испарительной камеры (D)						
28	1	0.325	0.006	973	0.556	0.01318
29	1	0.5	0.006	973	0.242	0.01318
30	1	1	0.006	973	0.121	0.01318
31	1	2	0.006	973	0.101	0.01318
32	1	2.5	0.006	973	0.099	0.01318
Варьирование концентрации и типа примесей (Oh)						
33	1	0.325	0.006	973	0.551	0.01318
34	1	0.325	0.006	973	0.550	0.01313
35	1	0.325	0.006	973	0.540	0.01275
36	1	0.325	0.006	973	0.525	0.01138
37	1	0.325	0.006	973	0.543	0.01306
38	1	0.325	0.006	973	0.550	0.01315
39	1	0.325	0.006	973	0.546	0.01316
40	1	0.325	0.006	973	0.545	0.01298