

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КИСЛОТНЫХ ОСАДКОВ В АТМОСФЕРЕ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ТЭС

Гвоздяков Д.В., Губин В.Е.

Научный руководитель: Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., профессор
Томский политехнический университет, 634050, г. томск, пр. Ленина, 30
E-mail: dim2003@tpu.ru; gubin@tpu.ru

Одним из факторов негативного воздействия тепловых электрических станций (ТЭС) на окружающую среду является возможное образование кислотных осадков [1] в районах, непосредственно прилегающих к ТЭС [2]. Наличие в воздушном пространстве Земли таких загрязняющих веществ как SO_2 , SO_3 , NO_x , при их взаимодействии с компонентами атмосферного воздуха, может приводить к образованию соответствующих кислот [1]. Взаимодействие кислотных дождей с биосферой, сооружениями, техникой, как правило, заканчиваются для них губительными последствиями [1].

В данной работе рассматриваются процессы конденсации серного ангидрида SO_3 и водяного пара H_2O . Несмотря на высокую опасность антропогенной эмиссии кислотообразующих веществ в воздушный бассейн и достаточно большое внимание, уделяемое проблеме кислотных дождей [1, 2], до настоящего времени не изучены процессы образования капель кислот в атмосфере Земли.

При достижении размеров $0,5 \cdot 10^{-3} \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, возможно выпадение кислотных осадков на поверхность Земли в процессе седиментации [1, 2], как на территориях, прилегающих к ТЭС, так и на отдаленных.

Ранее [2–3] исследовался процесс формирования кислотных осадков в воздушном пространстве, прилегающем к ТЭС, под действием природных факторов (температура и скорость ветра). При этом предполагалось, что образование капель серной кислоты происходит только за счет конденсации серного ангидрида на поверхности ядер конденсации.

Целью настоящей работы является численный анализ влияния влажности воздуха на процесс формирования капель серной кислоты в атмосфере Земли, прилегающей к ТЭС.

Процесс переноса энергии, количества движения и массы в рассматриваемых условиях описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных [4].

Сформулированная система дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями решена методом конечных разностей [4]. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений и краевых условий проведено методом переменных направлений и локально-одномерным методом [5].

Для решения сформулированной краевой

задачи использовался алгоритм [6], разработанный для решения задач сопряженного теплопереноса в областях с локальным источником энергии. Оценка достоверности полученных результатов проводилась проверкой консервативности разностной схемы аналогично [7].

На границах ввода серного ангидрида и водяного пара задавались краевые условия:

$$X = L_1, 0 \leq Y \leq H_1: \begin{cases} \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} + \frac{Q_3 \cdot W_3^K \cdot l_1^2}{\Delta T \cdot \lambda_1} + \frac{Q_4 \cdot W_4^K \cdot l_1^2}{\Delta T \cdot \lambda_1}, \\ \Theta_1 = \Theta_2, \frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_3^K \cdot l_1^2}{D \cdot \rho} + \frac{W_4^K \cdot l_1^2}{D \cdot \rho}, \psi = \Omega = 0; \end{cases}$$

$$Y = H_1, 0 \leq X \leq L_1: \begin{cases} \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} + \frac{Q_3 \cdot W_3^K \cdot l_1^2}{\Delta T \cdot \lambda_1} + \frac{Q_4 \cdot W_4^K \cdot l_1^2}{\Delta T \cdot \lambda_1}, \\ \Theta_1 = \Theta_2, \frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_3^K \cdot l_1^2}{D \cdot \rho} + \frac{W_4^K \cdot l_1^2}{D \cdot \rho}, \psi = \Omega = 0. \end{cases}$$

Где X, Y – координаты декартовой системы координат; $\Theta_{1,2}$ – температура; C_3 – концентрация серного ангидрида; Ψ – функция тока; Ω – вихрь скорости; L_1 и H_1 – размер области исследования; Q_3 и Q_4 – тепловой эффект реакции, Дж/кг; W_3^K и W_4^K – массовая скорость конденсации серного ангидрида и водяного пара, кг/(м³·с); l_1 – геометрический размер частицы (ядра конденсации), м; ρ – плотность, кг/м³; D – коэффициент диффузии, с/м²; $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Расчет скорости конденсации проводился с использованием выражения [8]:

$$W_i^K = \beta \cdot \frac{P_A - P_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right)}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}{M}}}$$

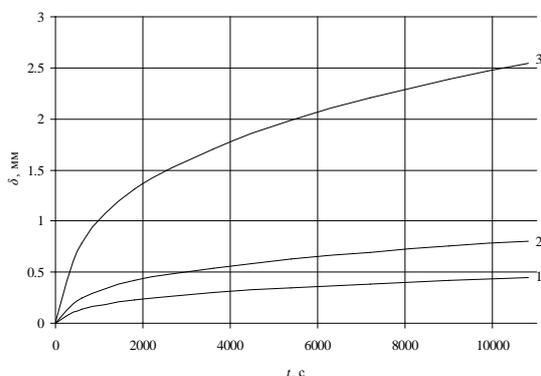
где P_A – давление паров SO_3 у поверхности капли, Па; $P_0 = 10^5$ – предэкспонент, Па; E – энергия активации процесса конденсации, Дж/кг; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); M – молярная масса, кг/моль; β – коэффициент конденсации; T – температура газовой среды, К.

На рис. 1 представлено изменение размера капли серной кислоты (δ) в зависимости от времени (t) при различных начальных размерах ядер конденсации.

Результаты (рис. 1) численных исследований показывают, что при коэффициенте конденсации 0,05 возможно формирование седиментационных кислотных осадков уже через 1800 с с момента начала процесса на поверхности ядер конденсации $\delta_0 = 5,0 \cdot 10^{-6}$ м. Дальнейшее протекание процесса одновременной конденсации серного ангидрида и водяного пара способствует образованию капли

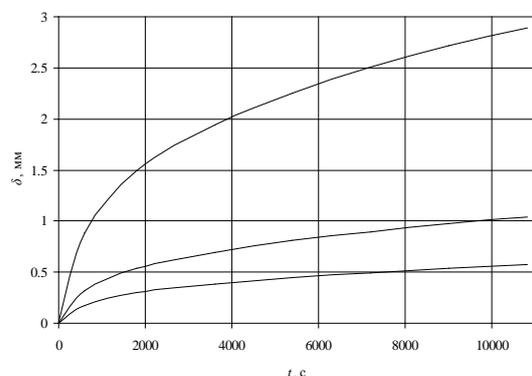
серной кислоты размером до $2,5 \cdot 10^{-3}$ м за рассматриваемый временной интервал.

Наиболее интенсивно, как показали исследования, формирование капли серной кислоты в атмосфере Земли происходит на поверхности ядер конденсации с начальными размерами от $1,0 \cdot 10^{-6}$ м до $5,0 \cdot 10^{-6}$ м при параметре конденсации $\beta=0,4$.



а)

Представленные в таблице 1 значения изменения размеров капель кислотных осадков позволяют сделать вывод о том, что совместная конденсация паров серного ангидрида и водяного пара существенно ускоряет процесс формирования седиментационных осадков.



б)

Рис. 1. Изменение размера капли серной кислоты: а) $\beta=0,05$; б) $\beta=0,1$;
1 – $\delta_0=0,8 \cdot 10^{-6}$ м; 2 – $\delta_0=1,0 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}$ м;
(β – коэффициент конденсации, δ_0 – начальный размер капли)

Таблица 1. Размеры капель при различных механизмах образования кислотных осадков.

$\delta_0 \cdot 10^6$, м	Конденсация SO ₃		Конденсация SO ₃ и H ₂ O	
	t, с			
0	0,001	0,005	0,001	0,005
600	0,340	0,432	0,372	0,960
1800	0,533	0,633	0,626	1,616
3600	0,634	0,754	0,812	2,096
5400	0,720	0,855	0,944	2,436
7200	0,814	0,967	1,048	2,706
9000	0,880	1,045	1,139	2,940
10800	0,937	1,113	1,212	3,127

Рост границы капли серной кислоты на поверхности зародыша размером $5,0 \cdot 10^{-6}$ м также существенно ускоряет процесс образования кислотных дождевых осадков. Уже через 600 с, с момента начала процесса конденсации формируются частицы с характерным размером до 1 мм. На протяжении рассматриваемого интервала времени образуются капли серной кислоты диаметром в 2,8 раза больше, чем при конденсации только серного ангидрида.

Список литературы

1. Израэль Ю.А. Кислотные дожди. / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Прессман [и др.] – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 270 с.
2. Гвоздяков Д.В. Математическое моделирование процесса конденсации серного ангидрида в атмосфере, прилегающей к тепловой электрической станции [Текст] / Д.В. Гвоздяков,

В.Е. Губин // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 323 – №2. – С. 195–200.

3. Гвоздяков Д.В. Влияние времени года на процесс образования седиментационных кислотных осадков в районе расположения тепловой электрической станции [Текст] / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // Бутлеровские сообщения. – 2013. – Т. 37. – №10. – С. 95–99.

4. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена [Текст] / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов – М.: Наука, 1984.–288 с.

5. Kuznetsov G.V. Conjugate natural convection an enclosure with local heat sources [Text] / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet // Computational Thermal Sciences. – 2009. – Т. 1. – №3. – P. 341–360.

6. Кузнецов Г.В. Об одном походе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – №2. – С 150–158.

7. Kuznetsov G.V. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics [Text] / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – Т. 18. – №2. – С. 162–167.

8. Лабунцов А.Д. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. / А.Д. Лабунцов – М.: Издательство МЭИ, 2000. –388 с.