

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КИСЛОТНЫХ
ОСАДКОВ В АТМОСФЕРЕ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К РАЙОНУ РАСПОЛОЖЕНИЯ
ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Г.В. Кузнецов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: dim2003@tpu.ru, gubin@tpu.ru

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMATION OF ACID RAIN IN THE
ATMOSPHERE, ADJACENT TO THE LOCATION THERMAL POWER STATION**

D.V. Gvozdyaikov, V.E. Gubin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. G.V. Kuznetsov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

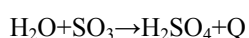
E-mail: dim2003@tpu.ru, gubin@tpu.ru

Presents the results of mathematical simulation of the condensation process sulfuric anhydride on the surface condensation nuclei in the framework of the formulated tasks. Calculation results are presented for the spring and summer. It is established that at different wind speeds and with typical parameters of operating thermal power station, a formation of drops of sulfuric acid occurs with a minor change. Approbation of the obtained results of the carried out checking conservative difference scheme and solution of test problems.

Установлена возможность образования (в процессе поглощения серного ангидрида водой) капель серной кислоты с характерными размерами до $1 \cdot 10^{-3}$ м в атмосфере, прилегающей к району расположения тепловой электрической станции (ТЭС) [1]. В данной работе рассматривается серный ангидрид SO_3 , который образуется в газоходах котлов ТЭС путем частичного окисления SO_2 (до 5% от общей доли SO_2) при сжигании высокосернистых топлив [2].

Целью настоящей работы является численный анализ процесса тепломассопереноса в атмосфере районов, прилегающих к тепловым электрическим станциям, и влияния скорости ветра на размеры содержащих серную кислоту капель.

При постановке задачи рассматривалась область, соответствующая воздушному пространству вблизи источника выброса в атмосферу серного ангидрида – антропогенного компонента продуктов сгорания углей. В соответствии с общими положениями [3] принято, что образование капель серной кислоты (так же, как и других кислот) происходит в результате конденсации паров SO_3 на поверхности «ядер конденсации» – микроскопических капель воды. Механизм образования серной кислоты [2, 3] основан на взаимодействии, при котором серный ангидрид SO_3 поглощается водяным паром.



Безразмерные уравнения движения, энергии, неразрывности и диффузии в переменных «вихрь скорости – функция тока – температура – концентрация» по аналогии с [4, 5] записаны в виде:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Y^2} \right) + \frac{Q \cdot W_K \cdot L_1}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot U_0}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial C_3}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial C_3}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Sc}} \cdot \left(\frac{\partial^2 C_3}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_3}{\partial Y^2} \right) - \frac{W_K \cdot L_1}{\rho \cdot U_0}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{\text{Fo}} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Y^2}. \quad (5)$$

Краевые условия для системы уравнений (1)–(5) аналогичны [1].

Система (1)–(5) решена методом конечных разностей [6]. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями проведено методом переменных направлений и локально-одномерным методом аналогично [7].

Сравнение результатов математического моделирования (табл.) процесса конденсации серного ангидрида на поверхности ядер конденсации при различных скоростях ветра позволяет сделать следующие выводы: во-первых, изменение (увеличение) скорости перемещения воздушных масс незначительно (1–3%) влияет на процесс роста капли серной кислоты; во-вторых, формирование капель, способных выводиться из атмосферы за счет процесса седиментации, происходит на поверхности ядер конденсации размером от $5,00 \cdot 10^{-6}$ м и более.

Таблица. Размеры капель серной кислоты $\delta_q \cdot 10^3$

t, c	Лето		Весна	Лето	Лето	Лето
	$U_0=5 \text{ м/с}$		$U_0=5 \text{ м/с}$	$U_0=5 \text{ м/с}$	$U_0=5 \text{ м/с}$	$U_0=5 \text{ м/с}$
	$\delta_0=1,0 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$	$\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$	$\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}, \text{ м}$			
7200	0,814	0,967	0,793	0,911	0,881	0,852
9000	0,880	1,045	0,857	0,984	0,952	0,921
10800	0,937	1,113	0,913	1,048	1,013	0,981

где δ_0 – размер ядра конденсации в начальный момент времени, м; δ_q – размер сформировавшейся частицы в момент времени t , с.

Установлено, что при начальном размере ядра конденсации $1,0 \cdot 10^{-6}$ м и скорости ветра 5 м/с, уже через 10800 с образуется частица способная достигнуть поверхности Земли. В весенне-летний период года, при скоростях ветра от 10 м/с до 20 м/с, образование капли серной кислоты, способной достигнуть Земли, на поверхности «ядер конденсации» размером $5,0 \cdot 10^{-6}$ м происходит уже через 7200 с с момента начала процесса. Дальнейшее увеличение скорости перемещения воздушных масс приводит к снижению скорости процесса формирования капли. На рис. 1 представлена зависимость процесса рассеивания (по оси факела продуктов сгорания) образовавшихся частиц, в рассматриваемом диапазоне размеров, в зависимости от скорости ветра.

Из рис. 1 видно, что капли размером $0,1 \cdot 10^{-3} \dots 0,5 \cdot 10^{-3}$ м распространяются на расстояние от 8000 м до 22000 м и более за рассматриваемый промежуток времени. Более крупные (от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $1,0 \cdot 10^{-3}$ м)

сформировавшиеся частицы способны рассеиваться в атмосфере на расстояния от 5500 м до 19500 м.

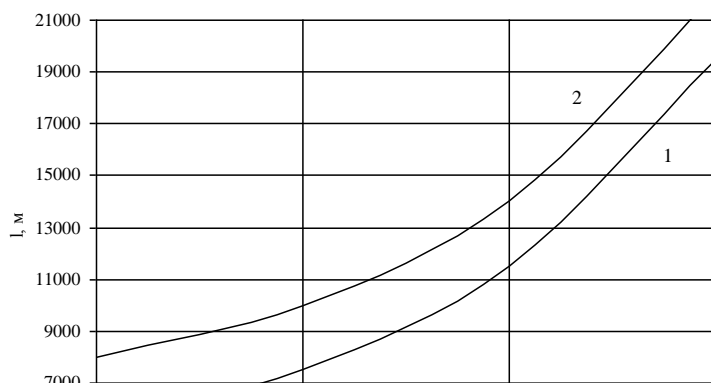


Рис.1. Расстояние перемещения в зависимости от скорости ветра капель серной кислоты: 1 – $\delta_q = 0,1 \cdot 10^{-6} \dots 0,5 \cdot 10^{-6}$ м; 2 – $\delta_q = 0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,0 \cdot 10^{-6}$ м

На основании результатов выполненных теоретических исследований можно сделать вывод о том, что конвекция оказывает влияние на интенсивность процесса образования капель кислот в атмосфере. В то же время установлено, что масштабы этого влияния относительно невелики, и при оценке размеров таких капель этот фактор можно не учитывать. Но скорость ветра, как показали

результаты выполненного математического моделирования, существенно влияет на распространения кислотных образований, а также их первичных соединений, в прилегающих к ТЭС районах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздяков Д.В., Губин В.Е. Математическое моделирование процесса конденсации серного ангидрида в атмосфере, прилегающей к тепловой электрической станции // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323 – №2. – С. 185–189.
2. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапка А.Г.. Кислотные дожди. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 270 с.
3. Хорватов Л. Кислотный дождь. М.: Стройиздат. 1986. – 83 с.
4. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Conjugate natural convection an enclosure with local heat sources // Computational Thermal Sciences. – 2009. – Т. 1. – №3. – С. 123–360.
5. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Mathematical modelling of complex heat transfer in a rectangular enclosure // Thermophysics and Aeromechanics. – 2009. – №1. – С. 123–133.
6. Kuznetsov g.v., sheremet m.a. new approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment // Russian microelectronics. – 2008. – V. 37. – №2. – С. 150–159.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. 616 с.