

REFERENCES

1. Energy Strategy of Russia for the period until 2030 was approved by the RF Government on November 13, 2009. *Institute of Energy Strategy*, 2009. 144 p. Available at: <http://www.energystrategy.ru/> (accessed 26 march, 2013).
2. Olkhovskiy G.G. *Teploenergetika*, 2013. 2, pp. 3–12.
3. Greenman M.I., Fomin V.A. *Novosti teplosnabzheniya*, 2010. 7, pp. 45–48.
4. Olkhovskiy G.G. *Energeticheskie gazoturbinnye ustanovki* (Gas turbine power plant). Moscow, Energoizdat, 1985. 304 p.
5. Cherkez A.E. *Inzhenernye raschety gasoturbinnyykh dvigateley metodom malykh otkloneniy* (Engineering calculations of gas turbine engines by small deviations). Moscow, Mashinostroenie, 1975. 355 p.

УДК 536.253

О ВЛИЯНИИ КОНВЕКЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ КАПЕЛЬ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ В АТМОСФЕРЕ, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К РАЙОНУ РАСПОЛОЖЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин

Томский политехнический университет
E-mail: dim2003@tpu.ru; gubin@tpu.ru

Представлены результаты математического моделирования процесса конденсации серного ангидрида на поверхности ядер конденсации в рамках сформулированной задачи. Результаты расчета представлены для весеннего и летнего времени года. Установлено, что при различных скоростях ветра и при типичных параметрах работы тепловой электрической станции формирование капель серной кислоты происходит с незначительным изменением. Проведена оценка размеров ядер конденсации, на поверхности которых образуются капли, способные в процессе седиментации выпадать на поверхность Земли. Установлено, что скорость перемещения воздушных масс влияет на процесс рассеивания кислотной антропогенной примеси в атмосфере. Проведено сравнение полученных значений концентрации серного ангидрида с результатами расчета по одной из известных методик. Апробация полученных результатов проведена проверкой консервативности разностной схемы и решением тестовых задач.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, тепловая электрическая станция, дымовые газы, загрязнение, серный ангидрид, конденсация, частица, серная кислота.

Введение

В настоящей работе установлена возможность образования капель серной кислоты (в процессе поглощения серного ангидрида каплями воды) с характерными размерами до $1 \cdot 10^{-3}$ м в атмосфере, прилегающей к району расположения тепловой электрической станции (ТЭС) [1, 2]. Результаты [1, 2] не только хорошо соответствуют известным данным о выпадении кислотных осадков на территориях вблизи крупных промышленных объектов [3–7], но и иллюстрируют физико-химический механизм процессов формирования и движения капель кислоты в атмосфере. Оценка их размеров, скоростей движения и анализ условий конденсации на поверхности таких капель создают определенные предпосылки для выводов о возможных кислотных образованиях в атмосфере вблизи работающих ТЭС. Но на интенсивность образования рассматриваемых примесей оказывают влияние ряд не учитывавшихся в [1, 2] факторов (например, скорость ветра в районе выброса в атмосферу серного ангидрида).

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 [4]. Интенсивность конвективных процессов

оказывает влияние не только на скорость перемещения «ядер конденсации» [1, 2] и образовавшихся капель кислоты. Изменение скорости ветра приводит к изменению условий теплопереноса вблизи поверхностей конденсации. Соответственно изменяется с увеличением (или уменьшением) скорости движения воздушных масс (и содержащихся в нем антропогенных примесей – серный ангидрид) и массовая скорость конденсации SO_3 на поверхности капель кислоты. Интенсивность этого процесса экспоненциально зависит от текущей температуры газовой среды. Поэтому изменения численных значений температуры поверхности капель кислоты на несколько градусов может в определенных условиях приводить к существенным изменениям скоростей конденсации рассматриваемых газов. Последнее, как было установлено ранее [1, 2], влечет за собой изменение характерных скоростей движения капель кислоты к поверхности Земли и расстояний распространения кислотных образований от источников выбросов антропогенных веществ в атмосферу. По этим причинам представляет интерес исследование влияния наиболее значимых факторов на условия и интенсивность формирования кислотных образований. Целью настоящей работы является численный анализ результатов процесса теплопереноса

$$\frac{1}{Fo} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Y^2}. \quad (6)$$

Уравнения движения частицы в направлении оси OX и OY соответственно:

$$\frac{dV_x}{d\tau} = -\frac{3C_D \rho_1 g (V_x - U)^2}{8\delta\rho_2}, \quad (7)$$

$$\frac{dV_y}{d\tau} = 1 - \frac{3C_D \rho_1 g V_y^2}{8\delta\rho_2}. \quad (8)$$

Принятые обозначения в системе уравнений (2)–(8): X, Y – координаты декартовой системы координат; τ – время; Θ – температура; C_3 – концентрация серного ангидрида; Ψ – функция тока; Ω – вихрь скорости; $Q=174,26$ – тепловой эффект реакции, кДж/кг; W_K – массовая скорость конденсации серного ангидрида, кг/(м³·с); L_1 – геометрический размер частицы (ядра конденсации), м; ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); U_0 – скорость внешней среды, м/с; C_D – коэффициент сопротивления; g – ускорение свободного падения, м/с²; U, V – скорости движения газовой среды в направлении оси X и Y , соответственно; V_x, V_y – скорости частицы в направлении оси X и Y ; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; Sc – число Шмидта; Fo – число Фурье; 1 – воздух плюс пары серного ангидрида; 2 – ядро конденсации; 3 – серный ангидрид.

Переход к безразмерным величинам осуществлялся в соответствии с подходом, изложенным в [1].

Расчет скорости конденсации проводился с использованием формулы [8]:

$$W_K = \beta \frac{P_A - P_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}},$$

где P_A – атмосферное давление, Па; $P_0=10^5$ – предэкспонента, Па; E – энергия активации процесса конденсации, Дж/кг; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); M – молярная масса, кг/моль; β – коэффициент конденсации; текущая температура газовой среды, К.

В соответствии с теорией [8] предполагалось, что скорость конденсации пропорциональна разности двух односторонних максвеловских скоростей конденсации. Такой подход предполагает два допущения: 1) конденсирующаяся среда у поверхности ядра конденсации макроскопически неподвижна; 2) состояние этой среды может быть описано локальной максвеловской функцией [8]. Допускается, что перемещение ядер конденсации в пространстве происходит со скоростью ветра.

Начальные условия для системы уравнений (2)–(8) приняты в виде:

$$\begin{aligned} \Omega(X, Y, 0) &= 0, V_x(X, Y, 0) = 0, \\ \Psi(X, Y, 0) &= 0, V_y(X, Y, 0) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Theta(X, Y, 0) &= 0, U(X, Y, 0) = 0, \\ C(X, Y, 0) &= 0, V(X, Y, 0) = 0. \end{aligned}$$

Граничные условия для (2)–(8) уравнений:

$$\frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_K L_1}{D\rho}, \psi = \Omega = 0;$$

$$X = L, 0 \leq Y \leq H:$$

$$\Theta = \Theta_1, \frac{\partial C_3}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial X} = 0;$$

$$Y = 0, 0 \leq X \leq L_1:$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0, C_3 = 0, \Psi = 0, \Omega = 0;$$

$$Y = 0, L_1 \leq X \leq L:$$

$$\Theta = \Theta_1, C_3 = C_0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = U, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = -V;$$

$$Y = H_1, 0 \leq X \leq L_1:$$

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} - \frac{QW_K L_1}{\Delta T \lambda_1}, \Theta_1 = \Theta_2,$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_K L_1}{D\rho}, \psi = \Omega = 0;$$

$$Y = H, 0 \leq X \leq L:$$

$$\Theta = \Theta_1, \frac{\partial C_3}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = 0.$$

где C_0 – безразмерная концентрация серного ангидрида на границе области.

Система (2)–(8) решена методом конечных разностей [12, 13]. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений и краевых условий проведено методом переменных направлений и локально-одномерным методом [14].

Для решения сформулированной краевой задачи использовался алгоритм [17, 18], разработанный для решения задач сопряженного теплопереноса в областях с локальным источником энергии. Оценка достоверности полученных результатов проводилась проверкой консервативности разностной схемы аналогично [19, 20] и решением тестовой задачи [21] проверкой сходимости, апробация закона сохранения энергии в области решения задачи – методом, аналогичным [22].

Начальная концентрация серного ангидрида в воздушном пространстве принималась усредненной для соответствующих значений летнего и весеннего времени года [1] и составляла 2,5 мг/м³. При постановке задачи были приняты следующие допущения:

- 1) не учитывалось испарение капли в процессе движения;
- 2) не принималось во внимание влияние солнечной радиации;
- 3) шаг по пространственным координатам 10⁻⁵;
- 4) ядро конденсации имеет форму куба.

Анализировалось влияние на процесс формирования капли кислоты скорости ветра в диапазоне изменения от 5 до 20 м/с.

Результаты и обсуждения

Сравнение результатов математического моделирования (табл. 1–4) 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. Следует отметить, что наиболее интенсивно этот процесс происходит в начальный период времени (до 600 с). В табл. 1–4 представлены результаты численного моделирования роста капель в процессе конденсации для различных скоростей ветра в летнее (294 К) и весеннее (284 К) время года.

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. Следует отметить, что капли соответствующего размера характерны для осадков в виде дождя, относящихся к типу «грубодисперсных» частиц [23]. Можно сделать вывод, что в весенне-летний период года, при скоростях ветра от 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.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что влияние скорости ветра на процесс образования капель серной кислоты, способных достичь поверхности Земли, незначительно.

Таблица 1. Размеры капель серной кислоты при скорости ветра 5 м/с

Лето						
t, c	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,073	0,183	0,292	0,340	0,432
1800		0,106	0,269	0,428	0,533	0,633
3600		0,127	0,320	0,510	0,634	0,754
5400		0,144	0,363	0,579	0,720	0,855
7200		0,163	0,411	0,655	0,814	0,967
9000		0,176	0,444	0,707	0,880	1,045
10800		0,187	0,473	0,753	0,937	1,113
Весна						
t, c	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,060	0,150	0,222	0,269	0,354
1800		0,087	0,220	0,314	0,382	0,519
3600		0,104	0,263	0,397	0,482	0,618
5400		0,118	0,298	0,456	0,554	0,701
7200		0,133	0,337	0,504	0,612	0,793
9000		0,144	0,364	0,545	0,662	0,857
10800		0,153	0,388	0,581	0,706	0,913

Таблица 2. Размеры капель серной кислоты при скорости ветра 10 м/с

Лето						
t, c	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,068	0,173	0,275	0,320	0,406
1800		0,100	0,253	0,403	0,501	0,596
3600		0,119	0,301	0,480	0,597	0,710
5400		0,135	0,342	0,545	0,678	0,805
7200		0,153	0,387	0,616	0,766	0,911
9000		0,165	0,418	0,666	0,828	0,984
10800		0,176	0,445	0,709	0,882	1,048
Весна						
t, c	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,057	0,144	0,212	0,258	0,339
1800		0,084	0,211	0,301	0,365	0,497
3600		0,099	0,251	0,380	0,462	0,592
5400		0,113	0,285	0,437	0,531	0,671
7200		0,128	0,322	0,482	0,586	0,759
9000		0,138	0,348	0,522	0,634	0,820
10800		0,147	0,371	0,556	0,675	0,874
10800		0,143	0,361	0,541	0,657	0,850

Таблица 3. Размеры капель серной кислоты при скорости ветра 15 м/с

Лето						
t, c	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,066	0,167	0,266	0,310	0,393
1800		0,097	0,245	0,390	0,485	0,576
3600		0,115	0,292	0,464	0,578	0,686
5400		0,131	0,331	0,527	0,655	0,779
7200		0,148	0,374	0,596	0,741	0,881
9000		0,160	0,404	0,644	0,801	0,952
10800		0,170	0,430	0,686	0,853	1,013
Весна						
t, c	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,055	0,140	0,206	0,251	0,330
1800		0,081	0,205	0,292	0,355	0,483
3600		0,097	0,244	0,370	0,449	0,575
5400		0,110	0,277	0,425	0,516	0,653
7200		0,124	0,314	0,469	0,570	0,739
9000		0,134	0,339	0,508	0,617	0,798
10800		0,143	0,361	0,541	0,657	0,850

Образовавшиеся частицы рассеиваются на различные расстояния под воздействием воздушных масс [3, 4, 24, 25]. Проведен численный анализ процесса рассеивания капель с использованием разработанной методики. При этом было выделено два диапазона размеров образовавшихся капель, $0,1 \cdot 10^{-3} \dots 0,5 \cdot 10^{-3}$ м и $0,5 \cdot 10^{-3} \dots 1,0 \cdot 10^{-3}$ м, соответственно. На рис. 2 представлена зависимость процесса рассеивания (по оси факела продуктов сгорания) образовавшихся частиц в рассматриваемом диапазоне размеров в зависимости от скорости ве-

тра. На рис. 3 показано сравнение результата расчета абсолютной концентрации в настоящей работе (1) и по теории рассеивания [26–28].

Таблица 4. Размеры капель серной кислоты при скорости ветра 20 м/с

		Лето				
t, с	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,064	0,162	0,257	0,300	0,380
1800		0,094	0,237	0,377	0,469	0,558
3600		0,112	0,282	0,450	0,559	0,664
5400		0,127	0,320	0,510	0,634	0,754
7200		0,143	0,362	0,577	0,717	0,852
9000		0,155	0,391	0,623	0,775	0,921
10800		0,165	0,417	0,664	0,826	0,981
		Весна				
t, с	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{ м}$	0,03	0,05	0,80	1,00	5,00
		$\delta_1 \cdot 10^3, \text{ м}$				
600		0,054	0,136	0,200	0,243	0,320
1800		0,079	0,199	0,284	0,345	0,469
3600		0,094	0,237	0,359	0,436	0,559
5400		0,107	0,269	0,413	0,501	0,634
7200		0,121	0,305	0,455	0,553	0,717
9000		0,130	0,329	0,493	0,599	0,775
10800		0,139	0,351	0,525	0,638	0,825

где δ_0 – размер ядра конденсации в начальный момент времени, м; δ_1 – размер сформировавшейся частицы в момент времени t, с.

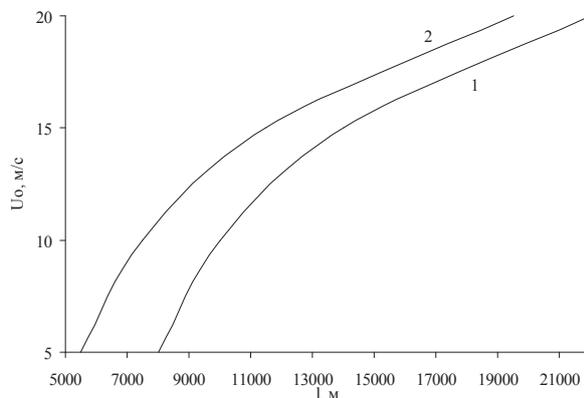


Рис. 2. Рассеивание сформировавшихся капель серной кислоты: 1) $\delta_1=0,1 \cdot 10^{-6} \dots 0,5 \cdot 10^{-6}$ м; 2) $\delta_1=0,5 \cdot 10^{-6} \dots 1,0 \cdot 10^{-6}$ м

Из рис. 2 видно, что капли размером $0,1 \cdot 10^{-3} \dots 0,5 \cdot 10^{-3}$ м распространяются на расстояние от 8000 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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздяков Д.В., Губин В.Е., Кузнецов Г.В. Численная оценка формирования условий атмосферного образования серной кислоты в районе расположения тепловой электрической станции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – № 2–2. – С. 195–200.
2. Гвоздяков Д.В., Губин В.Е. Математическое моделирование процесса конденсации серного ангидрида в атмосфере, приле-

способны рассеиваться в атмосфере на расстояния от 5500 до 19500 м. При этом содержание серных соединений в атмосфере (по оси факела продуктов сгорания) составляет $0,532 \dots 0,501$ мг/м³ (рис. 3 зависимость 1).

Для сравнения на рис. 3 (зависимость 2) проиллюстрировано изменение концентрации в зависимости от скорости ветра по теории рассеивания [26–28] с допущением об отсутствии осаждения примесей на поверхность Земли.

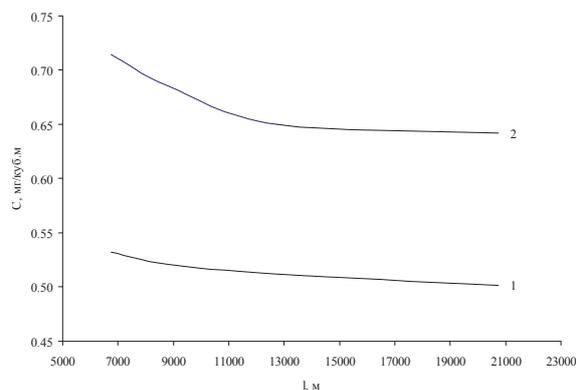


Рис. 3. Концентрация антропогенных соединений в атмосфере: 1) настоящая работа; 2) рассеивание примесей согласно теории [26–28]

Отклонение результатов настоящей работы от теории [26–28] составили в среднем 23 %. Это можно объясняется тем, что при расчете поля концентрации по теории [26–28] отклонение распределения концентраций по осям *ox* и *oy* принимались постоянными и не зависящими ни от каких параметров и характеристик.

Заключение

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.

Работа выполнена в рамках НИР госзадания «Наука» (шифр федеральной целевой научно-технической программы 7.3073.2011).

гающей к тепловой электрической станции // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 2. – С. 185–189.

3. Заиков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. Кислотные дожди и окружающая среда. – М.: Химия, 1991. – 144 с.
4. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапка А.Г. Кислотные дожди. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 270 с.

5. Хорватов Л. Кислотный дождь. – М.: Стройиздат, 1986. – 83 с.
6. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. – М.: Мир, 1979. – 200 с.
7. Фелленберг Г. Загрязнение природной среды. Введение в экологическую химию. – М.: Мир, 1997. – 232 с.
8. Лабунцов А.Д. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 388 с.
9. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Дужих Ф.П. Газоотводящие трубы ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
10. Внуков А.К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 176 с.
11. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
12. Берковский Б.М., Полевиков В.К. Вычислительный эксперимент в конвекции. – Минск: Университетское, 1988. – 167 с.
13. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
14. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
15. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Conjugate natural convection an enclosure with local heat sources // Computational Thermal Sciences. – 2009. – Т. 1. – № 3. – С. 341–360.
16. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Numerical simulation of turbulent natural convection in a rectangular enclosure having finite thickness walls // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Т. 53. – № 1–3. – С. 163–177.
17. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Об одном переходе к математическому моделированию тепловых режимов радиоэлектронной аппаратуры и электронной техники // Микроэлектроника. – 2008. – Т. 37. – № 2. – С. 150–158.
18. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Сопряженный теплоперенос в замкнутой области с локально сосредоточенным источником тепловыделения // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79. – № 1. – С. 56–63.
19. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – Т. 18. – № 2. – С. 162–167.
20. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45. – № 5. – С. 42–50.
21. Dixit H.N., Babu V. Simulation of high Rayleigh number natural convection in a square cavity using the lattice Boltzmann method // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2006. – № 49. – С. 727–739.
22. Кузнецов Г.В., Белозерцев А.В. Численное моделирование полей силовых транзисторов с учетом разрывов коэффициентов переноса // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 150–154.
23. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 284 с.
24. Бызова Н.Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы. – М.: Гидрометеоздат, 1974. – 90 с.
25. Федосов А.А. Моделирование распространения выбросов вредных веществ в пограничном слое атмосферы // Теплоэнергетика. – 2006. – № 5. – С. 34–40.
26. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 272 с.
27. Шаприцкий В.Н. Разработка нормативов ПДВ для защиты атмосферы. – М.: Металлургия, 1990. – 416 с.
28. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: справочник, в 2-х ч. Ч. 1 / пер. с англ. под ред. Калверта С., Инглунда Т.М. – М.: Металлургия, 1988. – 706 с.

Поступила 22.08.2013 г.

UDC 536.253

CONVECTION EFFECT ON SULFURIC ACID DROP FORMATION IN ATMOSPHERE NEIGHBORING TO A THERMAL POWER PLANT REGION

D.V. Gvozdyakov, V.E. Gubin

Tomsk Polytechnic University

The paper introduces the results of mathematical modeling of sulphurous anhydride condensation on condensation nuclei surface with in the stated problem. The design results are given for spring and summer. It was ascertained that sulfuric acid drops are formed with slight changes at different wind speed and typical operation parameters of thermal station. The authors estimated the sizes of condensation nuclei. On their surface the drops which are capable of falling on Earth surface are formed. Air mass displacement velocity affects the acid antropogenic impurity dispersion in the air. The obtained values of sulphurous anhydride were compared with the results of calculation by one of famous techniques. The results obtained were approved by checking the difference scheme conservation and solving the test problems.

Key words:

Mathematical modeling, thermal power plant, smoke gases, pollution, sulphurous anhydride, condensation, particle, sulfuric acid.

REFERENCES

1. Gvozdyakov D.V., Gubin V.E., Kuznetsov G.V. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2012. 2–2, pp. 195–200.
2. Gvozdyakov D.V., Gubin V.E. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013. 323, 2, pp. 185–189.
3. Zaikov G.E., Maslov S.A., Rubaylo V.L. *Kislotnye dozhd i okruzhayushchaya sreda* (Acid rains and environment). Moscow, Khimiya, 1991. 144 p.
4. Izrael Yu.A., Nazarov I.M., Pressman A.Ya., Rovinskiy F.Ya., Ryaboshapko A.G. *Kislotnye dozhd* (Acid rains). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989. 270 p.
5. Horvatov L. *Kislotny dozhd* (Acid rain). Moscow, Stroyizdat. 1986. 83 p.
6. Guderian R. *Zagryaznenie vozduшной среды*. Moscow, Mir, 1979. 200 p.
7. Fellenberg G. *Zagryaznenie prirodnoy sredy. Vvedenie v ekologicheskuyu khimiyu* (Environment pollution. Introduction into ecological chemistry). Moscow, Mir, 1997. 232 p.
8. Labuncov A.D. *Fizicheskie osnovy energetiki. Izbrannye trudy po teploobmenu, gidrodinamike, termodinamiki* (Power engineering principle physics. Selecta on heat exchange, hydrodynamics and thermodynamics). Moscow, MEI, 2000. 388 p.
9. Volkov E.P., Gavrilo E.I., Duzhikh F.P. *Gazootvodyashchie trubyy TES i AES* (Flue pipes of thermal power plants and atomic power stations). Moscow, Energoatomizdat, 1987. 280 p.
10. Vnukov A.K. *Zashchita atmosfery ot vybrosov energoobektov* (Atmosphere protection against power facilities release). Moscow, Energoatomizdat, 1992. 176 p.
11. Rouch P. *Vychislitel'naya gidrodinamika* (Computational fluid dynamics). Moscow, Mir, 1980. 616 p.
12. Berkovskiy B.M., Polevikov V.K. *Vychislitel'nyy eksperiment v konveksii* (Simulation experiment in convection). Minsk, Universitetskoe, 1988. 167 p.
13. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. *Chislennoe modelirovanie protsessov teplo- i massoobmena* (Simulation of thermal- and mass transfer). Moscow, Nauka, 1984. 288 p.
14. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* (Theory of difference schemes). Moscow, Nauka, 1983. 616 p.
15. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Conjugate natural convection an enclosure with local heat sources. *Computational Thermal Sciences*, 2009. 1, 3, pp. 341–360.
16. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Numerical simulation of turbulent natural convection in a rectangular enclosure having finite thickness walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010. 53, 1–3, pp. 163–177.
17. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Mikroelektronika*, 2008. 37, 2, pp. 150–158.
18. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2006. 79, 1, pp. 56–63.
19. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2009. 18, 2, pp. 162–167.
20. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. *Fizika goreniya i vzryva*, 2009. 45, 5, pp. 42–50.
21. Dixit H.N., Babu V. Simulation of high Rayleigh number natural convection in a square cavity using the lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006. 49, pp. 727–739.
22. Kuznetsov G.V., Belozertsev A.V. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005. 308, 1, pp. 150–154.
23. Terehov V.I., Pahomov M.A. *Teplomassoperenos i gidrodinamika v gazokapel'nykh potokakh* (Heat and mass transfer and hydrodynamics in gas-droplet flow). Novosibirsk, NGTU, 2008. 284 p.
24. Byzova N.L. *Rasseyaniye primesi v pograničnom sloe atmosfery* (Impurity dissipation in boundary atmosphere). Moscow, Gidrometeoizdat, 1974. 90 p.
25. Fedosov A.A. *Teploenergetika*, 2006. 5, pp. 34–40.
26. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* (Prediction and control of atmosphere pollution). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985. 272 p.
27. Shapritskiy V.N. *Razrabotka normativov PDV dlya zashchity atmosfery* (Development of regularities MPE to protect atmosphere). Moscow, Metallurgiya, 1990. 416 p.
28. Kalverta S., Inglanda T.M. *Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy* (Protection of atmosphere against industrial pollution). Moscow, Metallurgiya, 1988. 706 p.