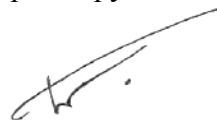


На правах рукописи



Гвоздяков Дмитрий Васильевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ОБРАЗОВАНИЯ КИСЛОТНЫХ ОСАДКОВ В РАЙОНАХ
РАБОТЫ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их
энергетические системы и агрегаты

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Атомные и тепловые электростанции»
Энергетического института ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: Кузнецов Гений Владимирович, доктор
физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Кормилицын Владимир Ильич, доктор
технических наук, профессор, НИУ МЭИ
(г. Москва), кафедра котельных
установок и экологии энергетики,
профессор.

Руденко Михаил Георгиевич, доктор
технических наук, профессор
ИрГСХА (г. Иркутск), заведующий
кафедрой энергообеспечения и
теплотехники.

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Сибирский федеральный
университет (г. Красноярск).

Защита состоится «20» декабря 2013 г. в 14³⁰ (в ауд. 302 4 уч. корпуса
ТПУ) на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при ФГБОУ
ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет» (по адресу г. Томск, пр. Ленина 30а, 4 уч. Корпус ТПУ,
ауд. 302).

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической
библиотеке ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского
Томского политехнического университета».

Автореферат разослан «18» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.269.13
кандидат технических наук, доцент



А.С. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Одним из основных источников антропогенного загрязнения воздушного бассейна Земли являются объекты теплоэнергетического комплекса. На долю тепловых электрических станций (ТЭС) приходится около 65% от общего объема антропогенных выбросов в атмосферу. При использовании угля в качестве топлива в результате сжигания образуется большое количество соединений серы, оксидов азота и золы. Вступая в химические и физические взаимодействия с отдельными компонентами атмосферного воздуха, эти вещества способны трансформироваться. В результате возможно образование различных химических соединений, например, кислот.

Проблема формирования кислотных осадков в атмосфере Земли является актуальной и малоизученной. При этом процесс образования кислотных осадков, способных достичь поверхности Земли в процессе седиментации, до настоящего времени мало изучен экспериментально и теоретически.

Развитие угольных технологий производства электрической энергии невозможно без создания практически значимой теории распространения и преобразования в кислоты антропогенных выбросов ТЭС, работающих на угле, и дальнейшего выпадения кислотных осадков как на прилегающих к ТЭС территориях, так и на достаточно удаленных от мест расположения таких объектов. Экспериментальное изучение основных закономерностей процессов загрязнения окружающей среды антропогенными продуктами сгорания углей в условиях, соответствующих условиям работы ТЭС, практически невозможно.

В связи с вышеизложенным, актуальной научной задачей, имеющей существенные значения для теории и практики функционирования и развития ТЭС, работающих на угольном топливе, является разработка математических моделей и методов решения задач прогноза условий и характеристик процессов образования кислотных осадков в районах работы ТЭС с учетом основных значимых факторов.

Цель диссертационной работы заключается в математическом моделировании процессов образования в атмосфере Земли кислотных осадков и их выпадения на территориях, прилегающих к ТЭС, в рамках математической модели, учитывающей двумерный тепло- и массоперенос, кинетику процесса конденсации, диффузию и

конвекцию паров оксидов серы. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработка физической модели процесса формирования и выпадения кислотных осадков при взаимодействии продуктов сгорания углей с атмосферным воздухом.
2. Создание математической модели, учитывающей процессы нестационарного тепло- и массопереноса, кинетику конденсации, диффузию и конвекцию паров оксидов серы, образующихся при работе ТЭС.
3. Разработка методики решения задачи конденсации серного ангидрида в атмосфере Земли на поверхности ядер конденсации с учетом метеорологических условий и параметров антропогенных выбросов ТЭС.
4. Численное исследование основных закономерностей процесса конденсации серного ангидрида и формирования частиц, способных выводиться на поверхность Земли в процессе седиментации, в зависимости от факторов и условий:
 - начальной температуры и концентрации антропогенных соединений, образующихся при сжигании углей на ТЭС;
 - времени года;
 - размеров ядер конденсации;
 - скорости ветра в районе работы ТЭС.

Научная новизна работы.

Впервые поставлена и решена задача тепломассопереноса в процессе образования кислотных осадков в атмосфере, прилегающей к району расположения ТЭС, на поверхности ядер конденсации. Обоснована возможность прогнозирования процессов выпадения кислотных осадков на территориях, прилегающих к ТЭС, а также на удаленных от места выброса антропогенных продуктов сгорания углей в атмосферу.

Практическая значимость работы.

Разработанная математическая модель, алгоритм и метод численного решения задачи могут быть использованы для прогноза возможного выпадения кислотных осадков на прилегающих к ТЭС территориях как при проектировании новых, так и при увеличении мощности действующих объектов теплоэнергетического комплекса (или переходе на другие твердые топлива).

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается проверками на последовательностях сгущающихся сеток,

результатами оценки аппроксимационной сходимости применяемой разностной схемы, сравнением с известными результатами других методик, тестированием на группе примеров менее сложных задач.

Защищаемые положения.

1. Математическая модель процесса формирования капель серной кислоты в условиях вывода из атмосферы, прилегающей к району расположения ТЭС, на поверхности ядер конденсации различного размера в рамках математической модели, учитывающей двумерный тепло- и массоперенос, кинетику процесса конденсации, диффузию и конвекцию паров оксидов серы.

2. Результаты численного исследования процесса формирования капель серной кислоты в атмосфере, прилегающей к району расположения ТЭС, на поверхности ядер конденсации различного размера в рамках математической модели, учитывающей двумерный тепло- и массоперенос, кинетику процесса конденсации, диффузию и конвекцию паров оксидов серы.

3. Результаты численных исследований влияния основных значимых факторов (размер ядер конденсации, время года, высота антропогенного источника, скорость ветра, влажность воздуха) на процессы формирования и выпадения на поверхность Земли капель серной кислоты.

Связь работы с научными программами.

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

Личный вклад автора.

Состоит в постановке задачи образования кислотных осадков в районе работы ТЭС, выборе метода и разработке алгоритма решения, проведения теоретических исследований влияния различных факторов на процесс конденсации серного ангидрида на поверхности ядра конденсации, обобщении результатов выполненных исследований.

Апробация работы.

Основные положения и результаты докладывались и обсуждались на конференциях: «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск 2009); «Региональная научно-практическая конференция» (Томск 2009); «Международная научно-практическая конференция молодых ученых» (Томск 2010); X Всероссийское совещание «Энергосбережение, энергоэффективность и энергетическая безопасность регионов России» (Томск 2009); VIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов,

аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука» (Красноярск 2012); «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск 2013).

Публикации.

Основные результаты диссертации представлены в 9 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объём работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 24 таблицы, библиография включает 126 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, обоснована практическая значимость и новизна полученных теоретических результатов, представлены защищаемые автором положения.

Первая глава отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования кислотных осадков в районе расположения ТЭС. Рассмотрены результаты анализа процесса распространения в атмосфере антропогенных примесей, немногочисленные исследования трансформации кислотообразующих веществ в воздушном пространстве и их выпадения на поверхность Земли. Установлено отсутствие результатов теоретического исследования процессов тепло – и массопереноса при перемещении антропогенных веществ в атмосфере с учетом их трансформации в более токсичные и опасные соединения, способные достичь поверхности Земли в процессе седиментации.

Во **второй главе** представлена постановка задачи образования кислотных осадков в воздушном пространстве, прилегающем к ТЭС. Приведено описание используемого численного метода и алгоритма решения задачи. Выполнена оценка достоверности результатов, полученных при решении системы дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый процесс. Приведен алгоритм проверки консервативности разностной схемы.

В качестве основного кислотообразующего вещества принимался серный ангидрид, как один из наиболее опасных и токсичных соединений продуктов сгорания натуральных топлив ТЭС. Процесс рассеивания в атмосфере дымового факела, содержащего

продукты сгорания, осуществляется при непосредственном взаимодействии их с воздухом. Это позволяет использовать коэффициенты бинарной диффузии для смеси «воздух–загрязняющее вещество». Задача решена в декартовой системе координат. Область решения задачи в начальный момент времени представлена на рис. 1.

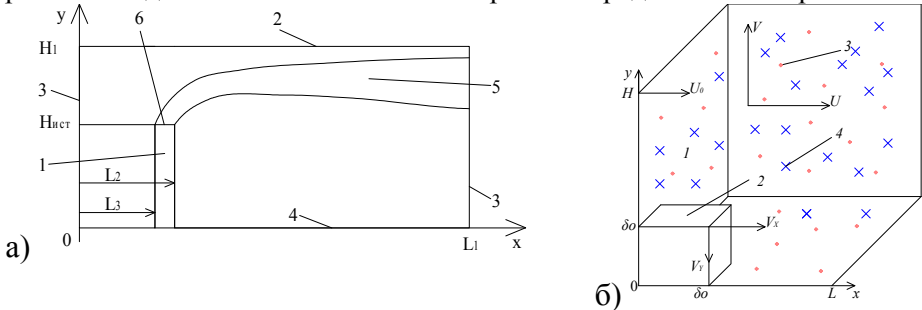


Рис. 1. Область решения задачи:

- а) 1 – газотводящая труба ТЭС; 2 – верхняя горизонтальная граница области решения; 3 – вертикальные границы области решения; 4 – подстилающая поверхность; 5 – дымовой факел; 6 – участок истечения дымовых газов
- б) 1 – газовая фаза; 2 – ядро конденсации; 3 – серный ангидрид; 4 – водяной пар; 5 – устье дымовой трубы ТЭС; U , V – скорости движения газовой среды в направлении осей X и Y ; V_x , V_y – скорости движения частицы в направлении осей X и Y

Рассматривался механизм образования серной кислоты при котором серный ангидрид SO_3 поглощается водяным паром.



Реакция (1) протекает практически мгновенно и в совокупности с метеорологическими условиями определяет интенсивность выпадения капель кислоты в окрестностях антропогенных источников.

При разработке математической модели учитывались следующие процессы:

- 1) перенос газообразных продуктов сгорания ТЭС;
- 2) изменение химического состава воздушного потока;
- 3) конвективный теплообмен частицы серной кислоты с внешней средой.

Основные допущения:

- 1) не учитывалось испарение капли в процессе движения;
- 2) не принималось во внимание влияние солнечной радиации;
- 3) ядро конденсации принималось в форме куба;
- 4) образовавшаяся при конденсации капля серной кислоты при движении не деформируется;
- 5) не учитывался радиационный теплообмен с внешней средой;

б) принималось, что на частицу действуют силы тяжести и сопротивления воздушной среды.

Особенностью настоящей задачи является смещение внешней границы частицы в результате конденсации серного ангидрида с переменной во времени скоростью, величина которой зависит от изменяющейся во времени температуры поверхности частицы. При такой постановке задача сводится к решению ниже приведенной системы дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями.

Система безразмерных нестационарных дифференциальных уравнений в приближении Буссинеска в переменных «вихрь скорости – функция тока – температура – концентрация», соответствующая сформулированной физической постановке задачи, имеет следующий вид:

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

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Y^2} \right) + \frac{Q \cdot W_K \cdot \delta_0}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_3}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial C_3}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial C_3}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Sc}} \cdot \left(\frac{\partial^2 C_3}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_3}{\partial Y^2} \right) - \frac{W_3^K \cdot \delta_0}{\rho \cdot U_0}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_4}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial C_4}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial C_4}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Sc}} \cdot \left(\frac{\partial^2 C_4}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_4}{\partial Y^2} \right) - \frac{W_4^K \cdot \delta_0}{\rho \cdot U_0}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\text{Fo}} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Y^2}. \quad (7)$$

Уравнения движения частицы в направлении осей OX и OY соответственно:

$$\frac{dV_X}{d\tau} = - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho \cdot |V_X - U|^2}{8 \cdot \delta \cdot g}, \quad (8)$$

$$\frac{dV_Y}{d\tau} = 1 - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho \cdot |V_Y|^2}{8 \cdot \delta \cdot g}. \quad (9)$$

Принятые обозначения в системе уравнений (2)–(9): X, Y – координаты декартовой системы координат; τ – время; Θ – температура; C_3 – концентрация серного ангидрида; C_4 – концентрация водяного пара; Ψ – функция тока; Ω – вихрь скорости; 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; $\rho = \rho_1/\rho_2$ – относительная плотность; g – безразмерный аналог ускорения свободного падения; C_D – коэффициент сопротивления; Q – тепловой эффект реакции, кДж/кг; W_i^K – массовая скорость конденсации серного ангидрида и водяного пара, кг/(м³·с); δ_0 – характерный геометрический размер частицы (ядра конденсации), м; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); U_0 – скорость внешней среды, м/с.

Расчет скорости конденсации проводился с использованием формулы:

$$W^K = \beta \cdot \frac{P_A - P_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right)}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}{M}}}, \quad (10)$$

где P_A – атмосферное давление, Па; P_0 – 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 – текущая температура газовой среды, К.

Начальные условия для системы уравнений (2)–(9) приняты в виде:

$$\begin{aligned} \Omega(X, Y, 0) &= 0, \quad V_x(X, Y, 0) = 0, \\ \Psi(X, Y, 0) &= 0, \quad V_y(X, Y, 0) = 0, \\ \Theta(X, Y, 0) &= 0, \quad U(X, Y, 0) = 0, \\ C(X, Y, 0) &= 0, \quad V(X, Y, 0) = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Граничные условия для системы уравнений (2)–(9):

$$X = 0, 0 \leq Y \leq \delta_0 : \frac{\partial \Theta}{\partial X} = 0, C_3 = 0, \Psi = 0, \Omega = 0; \quad (12)$$

$$X = 0, \delta_0 \leq Y \leq H : \Theta = \Theta_1, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = U, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = -V, C_3 = C_0; \quad (13)$$

$$X = \delta_0, 0 \leq Y \leq \delta_0 : \begin{cases} \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} + \frac{Q \cdot W_i^K \cdot \delta_0}{\Delta T \cdot \lambda_1}, \Theta_1 = \Theta_1, \\ \frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_i^K \cdot \delta_0}{D \cdot \rho}, \psi = \Omega = 0; \end{cases} \quad (14)$$

$$X = L, 0 \leq Y \leq H : \Theta = \Theta_1, \frac{\partial C_3}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial X} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial X} = 0; \quad (15)$$

$$Y = 0, 0 \leq X \leq \delta_0 : \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = 0, C_3 = 0, \Psi = 0, \Omega = 0; \quad (16)$$

$$Y = 0, \delta_0 \leq X \leq L : \Theta = \Theta_1, C_3 = C_0, \frac{\partial \psi}{\partial Y} = U, \frac{\partial \psi}{\partial X} = -V; \quad (17)$$

$$Y = \delta_0, 0 \leq X \leq \delta_0 : \begin{cases} \frac{\partial \Theta_1}{\partial X} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial \Theta_2}{\partial X} - \frac{Q \cdot W_i^K \cdot \delta_0}{\Delta T \cdot \lambda_1}, \Theta_1 = \Theta_2, \\ \frac{\partial C_3}{\partial X} = \frac{W_i^K \cdot \delta_0}{D \cdot \rho}, \psi = \Omega = 0; \end{cases} \quad (18)$$

$$Y = H, 0 \leq X \leq L : \Theta = \Theta_1, \frac{\partial C_3}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = 0, \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = 0. \quad (19)$$

где C_0 – безразмерная концентрация серного ангидрида на границе области.

Система (2)–(9) решена методом конечных разностей. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений и краевых условий проведено методом переменных направлений и локально-одномерным методом. Оценка достоверности полученных результатов проводилась проверкой консервативности разностной схемы.

Проведено решение группы тестовых задач конвективного тепло – и массопереноса, а также теплопроводности с учетом фазовых переходов при испарении на границе. Решение тестовых задач показало удовлетворительное соответствие полученных теоретических следствий с результатами других авторов.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования процесса образования кислотных осадков на поверхности ядер конденсации, выполненного с учетом влияния группы факторов (изменение концентрации и температуры антропогенного вещества на источнике, время года, параметры работы ТЭС).

Рассматривался стационарный источник выбросов высотой $H_{\text{ист}}$ (газоотводящая труба ТЭС) с заданной объемной концентрацией загрязняющих веществ на выходе из «устья». В исследуемой области ось x ориентирована по направлению ветра.

В качестве примера в автореферате приведены результаты анализа условий образования серной кислоты в воздушном пространстве протяженностью 10000 м и высотой 400 м. Теплофизические параметры дымовых газов на источнике считались постоянными. Абсолютная концентрация водяного пара в атмосфере равна 2000 мг/м^3 , серного ангидрида $0,04 \text{ мг/м}^3$. Концентрация водяного пара на срезе газоотводящей трубы $3 \cdot 10^5 \text{ мг/м}^3$, серного ангидрида 100 мг/м^3 . Температура наружного воздуха изменялась от 263 К до 297 К, Температура дымовых газов на срезе газоотводящей трубы ТЭС принималась равной 413 К, скорость ветра 20 м/с. Типичные результаты численного моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты численной оценки условий образования серной кислоты

Параметр	Термический период			
	Весенний	Летний	Осенний	Зимний
Температура окружающей среды, К	284	297	280	263
Расстояние от источника загрязнения до области образования серной кислоты, м	1300	100...200	1350	1400
Протяженность области возможного выпадения осадков, м	от 1650	от 100...200	от 1800	от 1300
Концентрация серной кислоты в области возможного выпадения осадков, мг/м^3	3,0...1,5	3,0...0,04	2,5...1,5	2,5...0,04

Полученные результаты иллюстрируют возможность пространственного моделирования координат участков территорий (прилегающих к ТЭС), на которых возможно выпадение кислотных дождей в различные времена года.

Проанализирована возможность образования кислотных осадков, способных достичь поверхности Земли в процессе седиментации в атмосфере, прилегающей к ТЭС.

Таблица 2. Зависимости размеров капель серной кислоты от времени

$t, \text{с}$	$\delta_0 \cdot 10^6, \text{м}$					
0	0,03	0,1	0,5	0,8	1,0	5,0
	$\delta \cdot 10^3, \text{м}$					
600	0,012	0,045	0,110	0,178	0,230	0,920
1800	0,025	0,089	0,270	0,445	0,440	1,380
3600	0,036	0,118	0,400	0,587	0,580	1,790
5400	0,045	0,138	0,471	0,652	0,680	2,080
7200	0,052	0,155	0,520	0,719	0,750	2,310
9000	0,059	0,169	0,562	0,776	0,820	2,510
10800	0,064	0,181	0,588	0,826	0,880	2,670

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

Проведен численный анализ процесса конденсации серного ангидрида на поверхности ядер конденсации в прилегающем к ТЭС воздушном пространстве. Установлено, что частицы, способные выводиться из атмосферы Земли за счет процесса седиментации, образуются при начальном размере ядра конденсации $\delta_0 = 1,0 \cdot 10^{-6}$ м и более за время 0,5...3 ч. Частицы с меньшим размером способны переноситься на большие расстояния от источника антропогенных компонент за счет конвекции и диффузии.

Исследовано влияние времени года на процесс образования кислотных осадков. В соответствии с известными данными по скорости взаимодействия водяных паров с серным ангидридом предполагалось, что процесс образования кислоты происходит за время, много меньше времени тепловой релаксации.

Установлено, что наиболее интенсивно конденсация происходит в начальный период рассматриваемого процесса (до 600 с). Затем скорость конденсации по мере роста температуры воздуха уменьшается, но рост диаметра капли продолжается в течение всего периода ее движения к поверхности Земли. Результаты представлены на рис. 2.

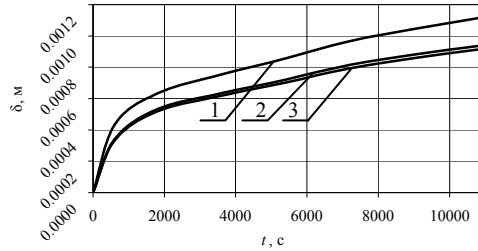


Рис. 2. Изменение размера капель кислоты с ростом времени:
1 – $\delta=1$ мкм, лето; 2 – $\delta=5$ мкм, лето; 3 – $\delta=5$ мкм, весна

На основании полученных результатов математического моделирования можно сделать вывод о влиянии параметров воздуха в окрестностях ТЭС на процесс распространения формирующихся на базе серного ангидрида кислотных образований в районах, прилегающих к тепловой электрической станции.

На рис. 3. изображены усредненные зависимости размеров δ от времени.

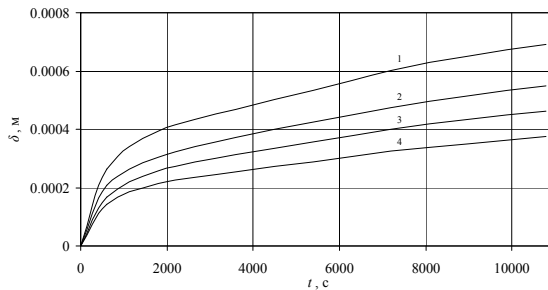


Рис. 3. Усредненные зависимости размеров капель серной кислоты от времени: 1 – лето; 2 – весна; 3 – осень; 4 – зима

Проведенные численные исследования иллюстрируют умеренное влияние времени года на процесс формирования капель серной кислоты на поверхности ядер конденсации. При этом в каждый термический период года образуются частицы, способные выводиться из атмосферы на поверхность Земли в процессе седиментации. Наиболее интенсивное формирование кислотных осадков возможно в весеннее и летнее время года. Существенное влияние на процесс образования капель серной кислоты оказывает размер ядер

конденсации, минимальное значение которых составляет $\delta_0=1,0 \cdot 10^{-6}$ м и $\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}$ м для весеннего и летнего периода, соответственно.

Проведены исследования влияния скорости ветра на процесс формирования кислотных осадков.

Сравнение результатов математического моделирования 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 (в пределах 1...3% по δ) 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 $\delta_0=5,00 \cdot 10^{-6}$ м и более. Наиболее интенсивно, этот процесс происходит в начальный период времени (до 600 с). На рис. 4 представлены результаты численного моделирования роста капель в процессе конденсации при различных скоростях ветра в летний (294 К) и весенний (284 К) период года.

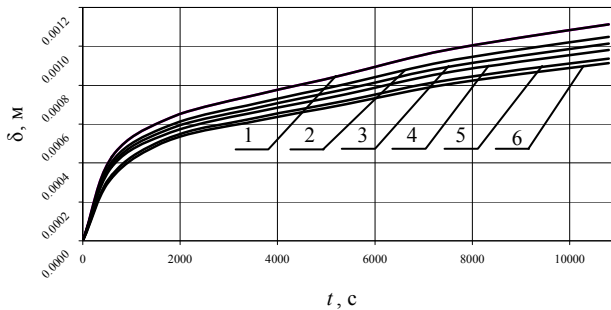


Рис. 4. Изменение размера капель кислоты с ростом времени:

- 1 – $\delta_0=5$ мкм, $U_0=5$ м/с лето; 2 – $\delta_0=5$ мкм, $U_0=10$ м/с лето; 3 – $\delta_0=5$ мкм, $U_0=15$ м/с лето; 4 – $\delta_0=5$ мкм, $U_0=20$ м/с лето; 5 – $\delta_0=1$ мкм, $U_0=5$ м/с лето; 6 – $\delta_0=5$ мкм, $U_0=5$ м/с весна

Установлено, что, например, при начальном размере ядра конденсации $\delta_0=1,0 \cdot 10^{-6}$ м и скорости ветра 5 м/с уже через 10800 с образуется частица, способная достигнуть поверхности Земли. Можно сделать вывод, что 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 $\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}$ м происходит уже через 7200 с с момента начала процесса.

Дальнейшее увеличение скорости перемещения воздушных масс приводит к снижению скорости процесса формирования капли.

Проведено сравнение значений концентрации SO_3 в пространстве, прилегающем к ТЭС (рис. 5), с рассчитанными по разработанной ранее методике «ОНД-86». Установлено, что отклонение составляет в среднем 21%.

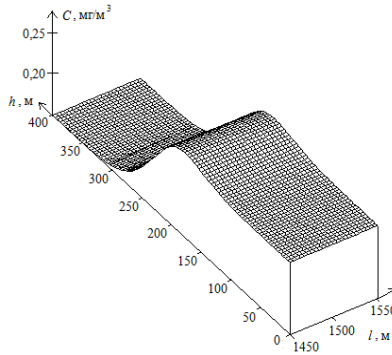


Рис. 5. Поле концентрации серного ангидрида в исследуемой области

На рис. 6 и 7 показано типичное распределение концентрации и температуры «дымового факела» в исследуемой области.

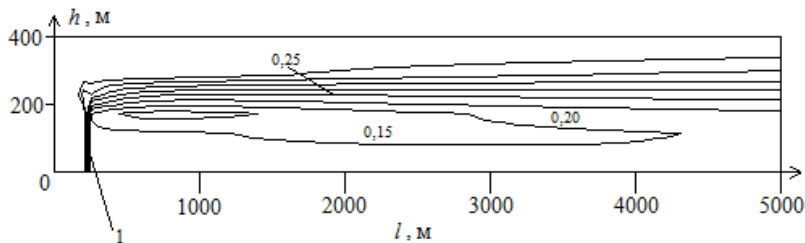


Рис. 6. Поле концентрации серного ангидрида в исследуемой области:
1 – дымовая труба ТЭС

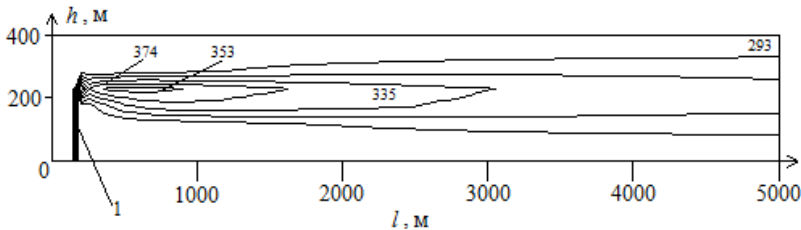


Рис. 7. Изотермы «дымового факела» в исследуемой области:
1 – дымовая труба ТЭС

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1) Впервые разработана математическая модель процесса образования кислотных осадков в атмосфере Земли в районах расположения ТЭС на поверхности ядер конденсации в рамках математической модели, учитывающей двумерный тепло- и массоперенос, кинетику процесса конденсации, диффузию и конвекцию паров оксидов серы.
- 2) Численно исследован процесс формирования кислотных осадков на поверхности ядер конденсации в воздушном пространстве, прилегающем к тепловой электрической станции.
- 3) Проведена оценка выполнения условий возможного образования серной кислоты в воздушном пространстве, прилегающем к ТЭС. Установлена протяженность участков образования серной кислоты. Значение абсолютной концентрации серной кислоты при этом находится в диапазоне от 3 мг/м^3 до $0,04 \text{ мг/м}^3$.
- 4) Установлено, что частицы, способные выводиться из атмосферы Земли за счет процесса седиментации, образуются при начальном размере ядра конденсации $\delta_0 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и более за время $0,5 \dots 3 \text{ ч}$. Частицы с меньшим размером способны переноситься на большие расстояния от источника антропогенных компонент за счет конвекции и диффузии.
- 5) Проведенные численные исследования иллюстрируют умеренное влияние времени года на процесс формирования капель серной кислоты на поверхности ядер конденсации. При этом во все термические периоды года образуются частицы, способные выводиться из атмосферы на поверхность Земли в процессе седиментации. Наиболее интенсивное формирование кислотных осадков наблюдается в весеннее и летнее время года. Существенное влияние на процесс образования капель серной кислоты оказывает размер ядер конденсации, минимальное значение которых составляет $\delta_0 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ и $\delta_0 = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ для весеннего и летнего периода, соответственно.
- 6) 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 распространение кислотных образований (также их первичных соединений) в прилегающих к ТЭС районах.

7) Совместная конденсация паров серного ангидрида и водяного пара существенно ускоряет процесс формирования седиментационных осадков в воздушном пространстве районов расположения ТЭС, на поверхности ядер конденсации ($\delta_0=1,0 \cdot 10^{-6}$ м и $\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}$ м).

8) Разработанная математическая модель, описывающая процесс образования кислотных осадков, может быть использована для прогноза образования и выпадения кислотных дождей на территориях, прилегающих к ТЭС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Гвоздяков Д.В.** Оценка степени загрязнения окружающей среды продуктами сгорания натуральных топлив ТЭС / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин, С.А. Янковский // Теплофизические основы энергетических технологий: материалы региональной научно-практической конференции. Изд-во ТПУ, 2009.– С. 252-256.

2. **Гвоздяков Д.В.** Применение методов математического моделирования при оценке степени загрязнения окружающей среды продуктами сгорания / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // Ресурсоэффективные технологии для будущих поколений. Сборник трудов II Международной научно-практической конференции молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010 г.

3. **Гвоздяков Д.В.** Моделирования рассеивания в атмосфере продуктов сгорания натуральных топлив ТЭС / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин, С.А. Янковский // Энергосбережение энергоэффективность и энергетическая безопасность регионов России: X Всероссийское совещание - Томск, ТМДЦ «Технопарк». – Томск: Изд. ТМДЦ «Технопарк». - 2009. - с. 99-101.

4. **Гвоздяков Д.В.** Математическое моделирование процесса образования серной кислоты в районе расположения тепловой электрической станции / Д.В. Гвоздяков // Тезисы и доклады VIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука». 2012. – Красноярск: Изд. Сибирского федерального университета.

5. **Гвоздяков Д.В.** Численное моделирование процесса конденсации продуктов сгорания натуральных топлив ТЭС в атмосфере / Д.В. Гвоздяков // Теплофизические основы энергетических технологий. – Томск: Изд-во ТПУ. С. 100–103.

6. **Гвоздяков Д.В.** Численная оценка формирования условий атмосферного образования серной кислоты в районе расположения

тепловой электрической станции / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин, Г.В. Кузнецов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. – №2-2. – С. 195–200.

7. **Гвоздяков Д.В.** Математическое моделирование процесса конденсации серного ангидрида в атмосфере, прилегающей к тепловой электрической станции / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // Известия ТПУ. 2013. – Т. 323 – №2. С. 185–189.

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

9. **Гвоздяков Д.В.** О влиянии конвекции на формирование капель серной кислоты в атмосфере, прилегающей к району расположения тепловой электрической станции / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // Известия ТПУ. 2013. – Т. 323 – №4. – С. 52–58.