

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

УДК 551.591:551.576.11

**САЕНКО Андрей Геннадьевич**

**ПРОЗРАЧНОСТЬ КОНДЕНСАЦИОННЫХ СЛЕДОВ  
И ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ**

25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2006

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики атмосферы в Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете.

**Научные руководители:** Кандидат физ.-мат. наук, доцент  
Григоров Николай Олегович

**Официальные оппоненты:** Доктор физ.-мат. наук, профессор  
Ивлев Лев Семёнович

Кандидат физ.-мат. наук, доцент  
Головина Елена Георгиевна

**Ведущая организация:** Научно-исследовательский центр  
дистанционного зондирования атмосферы  
при Главной геофизической обсерватории  
им. А.И. Воейкова

Защита состоится 21 декабря 2006 г. в 15 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д.212.197.01 Российского Государственного Гидрометеорологического Университета.

Адрес: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного Гидрометеорологического Университета.

Автореферат разослан 18 ноября 2006 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук  
проф. Кузнецов А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В последние десятилетия мировое сообщество уделяет большое внимание исследованию и прогнозированию глобальных изменений природной среды, связанных с человеческой деятельностью. К числу видов человеческой деятельности, воздействие которых на окружающую среду нельзя не учитывать, относится авиация.

Несмотря на то, что первый полёт с двигателями был выполнен чуть более 100 лет назад, сегодня авиация представляет собой динамично развивающуюся отрасль, ставшую неотъемлемой и важной частью современного общества. В этой связи необходимо рассмотреть вопрос о текущих и возможных в будущем последствиях воздействия авиации на атмосферу. Увеличение интенсивности воздушного движения ведёт к увеличению влияния газов, образующихся при сгорании авиационного топлива на радиационный баланс атмосферы. Воздушные суда выбрасывают газы и частицы непосредственно в верхние слои тропосферы и нижние слои стратосферы, где они оказывают воздействие на состав атмосферы. Эти газы и частицы изменяют концентрацию атмосферных «парниковых» газов, включая двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), водяной пар ( $\text{H}_2\text{O}$ ), озон ( $\text{O}_3$ ) и метан ( $\text{CH}_4$ ); инициируют образование конденсационных (инверсионных) следов и могут способствовать развитию перистой облачности; все эти факторы оказывают влияние на изменение климата.

Выхлопные газы любых самолетов содержат в своем составе достаточно большое количество водяного пара и частиц сажи, образующихся при сгорании топлива. В результате за самолетом возникает полоса воздуха, несколько более влажного, теплого и пыльного, чем окружающий, "невозмущенный" воздух. И у влаги в этом воздухе есть некоторые предпосылки сконденсироваться, чему способствует наличие ядер конденсации (частиц сажи), низкая температура окружающей среды, и несколько более низкая плотность следа, поскольку он чуть теплее и чуть более влажный. При конденсации на больших высотах образуются ледяные кристаллики, рассеивающие свет, делая тем самым эту полосу видимой.

Конденсационные следы, аналогично тонкой облачности на больших высотах, способствуют нагреву земной поверхности. Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что после образования устойчивых конденсационных следов начинает развиваться обширная перистая облачность, что так же способствует нагреву земной поверхности.

Согласно оценке, приведённой в докладе "Авиация и глобальная атмосфера" Межправительственной группы экспертов по изменению климата, радиационное воздействие в 1992 году, обусловленное полётами воздушных судов, составило  $0,05 \text{ Вт/м}^2$ , или примерно 3,5 % полного радиационного воздействия, обусловленного всеми видами антропогенной

деятельности. Предполагается, что к 2050 году воздействие возрастёт до  $0,13 - 0,56 \text{ Вт/м}^2$ , или в 2,6 – 11 раз превысит значение 1992 года. Такой разброс в оценке обусловлен малой изученностью этого вопроса, особенно мало изучен вопрос влияния перистой облачности.

Для оценки влияния конденсационных следов и перистых облаков на изменение климата представляется необходимым проанализировать факторы, влияющие на их развитие, и рассчитать их прозрачность.

Материалы работы являются оригинальными, все уравнения и расчёты по ним проделаны самим автором.

### **Цель работы.**

Целью настоящей работы заключалась в оценке роли различных факторов в развитии и существовании конденсационных следов самолётов, а также перистых облаков, инициированных ими. Кроме того, задачей исследования являлись: разработка математической модели развития конденсационного следа, разработка способов определения прозрачности следа и перистой облачности.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Произвести обзор литературных источников и на его основе рассмотреть современные представления об образовании конденсационных следов и перистых облаков, их оптических свойств и их влияние на тепловой баланс.

2. Создать математическую модель конденсационного следа, и на основе численных экспериментов проанализировать факторы, влияющие на его развитие.

3. Разработать алгоритм расчёта прозрачности на разных участках конденсационного следа.

4. Разработать способ определения прозрачности конденсационных следов и перистых облаков по снимкам с метеорологического спутника NOAA в видимом диапазоне.

### **Научная новизна.**

1. Разработана математическая модель формирования горизонтального конденсационного следа самолёта, позволяющая по параметрам двигателя и окружающей атмосферы рассчитать эволюцию следа.

2. Предложена методика расчёта прозрачности на разных участках конденсационного следа.

3. Предложен способ определения прозрачности перистых облаков на основе данных снимков с метеорологического спутника.

### **Теоретическая и практическая значимость.**

Предложенное в диссертации исследование может быть использовано для расчётов пропускания конденсационными следами и перистыми

облаками излучения в видимом диапазоне при анализе их влияния на тепловой баланс системы “атмосфера-земля”. Также предложенная математическая модель развития конденсационного следа может быть использована для моделирования в целях уменьшения воздействия авиации на климат.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель конденсационного следа на активном участке струи, зависимость параметров струи от параметров двигательной установки и окружающей атмосферы.

2. Модель конденсационного следа на пассивном участке струи и зависимость времени её существования от параметров окружающей атмосферы.

3. Зависимость прозрачности конденсационного следа от параметров двигателя и окружающей среды.

4. Способ определения прозрачности перистых облаков по яркости изображения на снимках видимого диапазона.

#### **Апробация.**

Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на пятой Международной конференции “Естественные и антропогенные аэрозоли” в 2006 г., на итоговой сессии Учёного совета РГГМУ в 2005 г.

#### **Публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 печатных работах

#### **Структура и объём.**

Диссертация состоит из 7 основных частей: введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объём работы составляет 104 страниц текста, включая 25 рисунков и 5 таблиц. Список использованной литературы включает 97 наименований из них 41 англоязычных.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, излагаются цели и задачи исследования, дана оценка научной новизны и практической ценности работы, приведён перечень поставленных и решённых в ходе исследования задач, а также защищаемые положения.

**В первой главе** рассматриваются современные представления о формировании конденсационных следов самолётов и инициируемых ими перистых облаках, так же рассматривается их влияние на тепловой баланс системы “атмосфера-земля”.

Образованию конденсационных следов способствуют водяные пары, выбрасываемые авиационными двигателями, а их оптические свойства зависят от состава выбрасываемых или образуемых в авиационном дыме частиц и от внешних атмосферных условий. Радиационное воздействие конденсационных следов зависит от их оптических свойств и площади глобального охвата. Со спутников конденсационные следы наблюдаются как облака в форме линий над районами с наиболее интенсивным воздушным движением, которые в 1996-1997 гг. в среднем охватывали примерно 0,5% площади над Центральной Европой.

Часто из устойчивых конденсационных следов развиваться обширная перистая облачность. Перистыми облаками покрыто примерно 30% поверхности земли. В среднем увеличение площади перистых облаков способствует нагреву поверхности земли. Согласно оценке, выполненной в конце 90-х годов, площадь инициируемых воздушными судами перистых облаков составляет до 0,2% поверхности земли. К 2050 г. эта величина может увеличиться в четыре раза; однако механизмы, связанные с увеличением площади перистых облаков возникших из конденсационных следов, пока хорошо не изучены, что обуславливает необходимость проведения дополнительных исследований.

После террористических актов 11 сентября 2001 года небо над США было закрыто для гражданской авиации на три дня, чтобы аэропорты могли усилить меры безопасности. Оказалось, что отсутствие эффекта создаваемых самолетами конденсационных следов, отразилось немедленным изменением температуры воздуха, причем очень существенным. В среднем суточный разброс температуры увеличился на 1,2 градуса Цельсия, то есть ночью стало холоднее, а днем теплее. На тех территориях, где в силу особенностей климата инверсионные следы образуются более активно, где воздушное пространство особенно загружено, перепад температуры 11-13 сентября увеличился на 3 градуса.

Первоначально, при оценках климатических последствий эмиссии газов образующихся при сгорании авиационного топлива, основное внимание было сфокусировано на возможном изменении химического баланса атмосферы в результате протекания химических реакций. Также были проведены оценки возможного радиационного воздействия сажевых аэрозолей, как частиц, сильно поглощающих солнечное излучение. Полученный эффект нагревания атмосферы по абсолютной величине примерно в 30 раз уступает радиационному эффекту охлаждения атмосферы природными аэрозолями. Поэтому в настоящее время выделяются два других наиболее существенных фактора, определяющих последствия эмиссии в атмосферу:

1. Формирование долгоживущих конденсационных следов (прямой эффект)
2. Инициирование образования перистых облаков (вторичный эффект).

Хотя среди других факторов человеческого воздействия, например, выбросы заводов, конденсационные следы вносят небольшой вклад в

глобальное потепление, эта проблема заслуживает пристального изучения, так как мировые объёмы авиаперевозок интенсивно и постоянно растут.

**Во второй главе** строится математическая модель развития конденсационного следа самолёта, рассматриваются условия способствующие его развитию и существованию, даётся расчёт прозрачности следа.

В результате сгорания в двигателях самолётов топлива в атмосферу выбрасывается большое количество нагретого, сильно увлажненного воздуха. При смешении с атмосферным воздухом в струе, выбрасываемой двигателем, понижается как содержание водяного пара, так и температура воздуха. В зависимости от параметров двигателя и состояния атмосферы могут встретиться различные случаи изменения относительной влажности воздуха в области непосредственно за выходным соплом двигателя.

Для расчётов была выбрана следующая система координат, которая представлена на рисунке 1. Начало координат совмещено с самолётом. Ось  $X$  располагается вдоль оси конденсационного следа. Ось  $Y$  перпендикулярна оси  $X$  и располагается горизонтально, а  $Z$  – вертикально, и обе берут начало от оси следа. Прозрачность рассчитывалась в вертикальном направлении на различных расстояниях от оси следа.

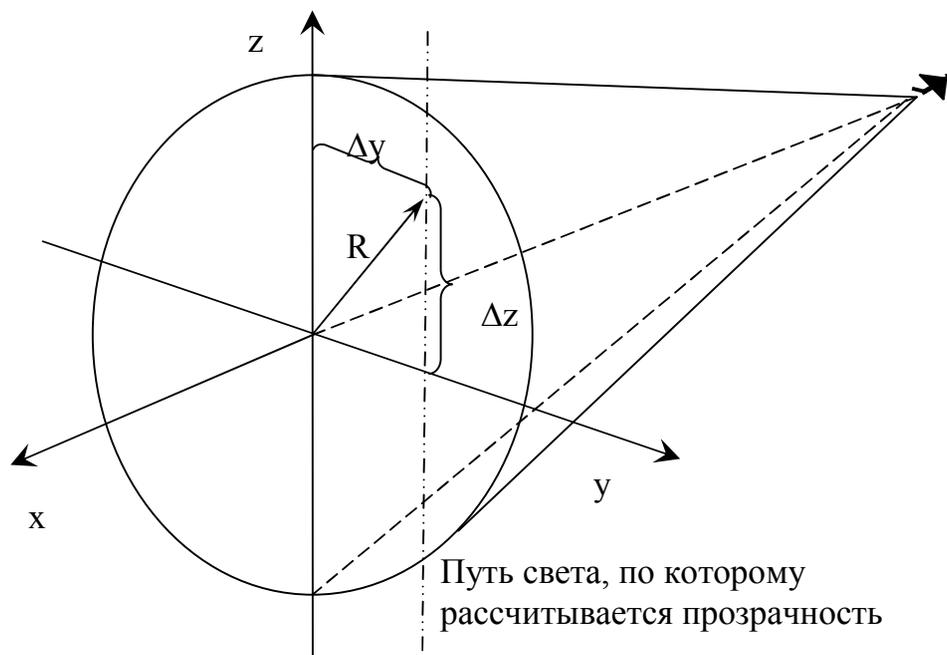


Рисунок 1. Схема системы координат для расчёта параметров конденсационного следа.

Струю, созданную мощным турбореактивным двигателем, можно разделить на три участка.

1. Активный участок, на котором скорость движения струи значительно больше скорости ветра.

2. Пассивный участок, на котором скорости движения струи и ветра практически совпадают.

3. Промежуточный участок.

Выброшенный из двигателя горячий воздух на активном участке струи смешивается с более холодным воздухом и в результате струя охлаждается. Дополнительно охлаждение происходит в результате того, что воздух в струе совершает работу расширения по мере движения струи. Горизонтальная скорость струи за счет эффекта смешивания уменьшается. Такая струя является примером движения тела с переменной массой.

Изменение параметров такой струи (пока влажность в струе меньше 100%) описывается системой дифференциальных уравнений по аргументу  $x$ , которая выведена на основе уравнений для вертикально направленной струи предложенной Качуриным Л.Г. (“Физические основы воздействия на атмосферные процессы”).

$$\begin{aligned} \frac{2}{R'} \frac{dR'}{dx} &= \frac{C}{R'} \frac{T'}{T} - \frac{1}{v'} \frac{dv'}{dx} + \frac{1}{T'} \frac{dT'}{dx} & ; \\ \frac{1}{v'} \frac{dv'}{dx} &= -\frac{C}{R'} \frac{T'}{T} & ; \\ -\frac{1}{T'} \frac{dT'}{dx} &= \frac{C}{R'} \frac{T' - T}{T} & ; \\ -\frac{1}{q' - q} \frac{dq'}{dx} &= \frac{C}{R'} \frac{T'}{T} & ; \end{aligned}$$

где  $R'$  – радиус струи,  $v'$  – скорость в струе,  $T'$  и  $T$  – температура в струе и окружающей среде,  $q'$  и  $q$  – массовая доля водяного пара в струе и в атмосфере,  $C$  – константа вовлечения (по опытным данным колеблется от 0,18 до 0,24).

При условии насыщения водяного пара, уравнение изменения температуры в струе становится более общим за счёт добавления слагаемого учитывающего выделения тепла при конденсации

$$-\frac{dT'}{dx} = \frac{C}{R'} \frac{T'}{T} \left( \frac{\mu}{M} \frac{L}{c'_p p} (E' - fE) + (T' - T) \right) \left( 1 + \frac{\mu L^2 E'}{k T'^2 M c'_p p} \right)^{-1},$$

где  $p$  – атмосферное давление,  $E'$  и  $E$  – парциальное давление насыщенного водяного пара в струе и атмосфере,  $\mu$  и  $M$  – молекулярные массы водяного пара и сухого воздуха,  $k$  – постоянная Больцмана,  $c'_p$  – удельная теплоёмкость воздуха в струе,  $L$  – удельная теплота парообразования.

Полученная система уравнений может быть решена численно, если полагать, что в пределах малого шага по горизонтали можно пренебречь изменением некоторых параметров. Расчёты проводились методом последовательных приближений. Вначале при расчёте радиуса струи за неизменный параметр в пределах малого шага по горизонтали принималась температура струи, далее все параметры струи рассчитывались для нового радиуса. Полученные новые данные использовались для расчёта нового значения радиуса струи. Такие операции производились до тех пор, пока полученные значения не отличались от значений, полученных на предыдущем шаге. Если принять за неизменный параметр не радиус струи, а температуру, то в результате расчётов получаются те же значения параметров струи. Параметры окружающего воздуха считались на всём протяжении конденсационного следа неизменными.

Были проведены расчёты активного участка струи при различных условиях в атмосфере и разных параметров двигателя. На рисунке 2 представлены результаты одного из расчётов активного участка струи, формируемого двигателем ИЛ-86.

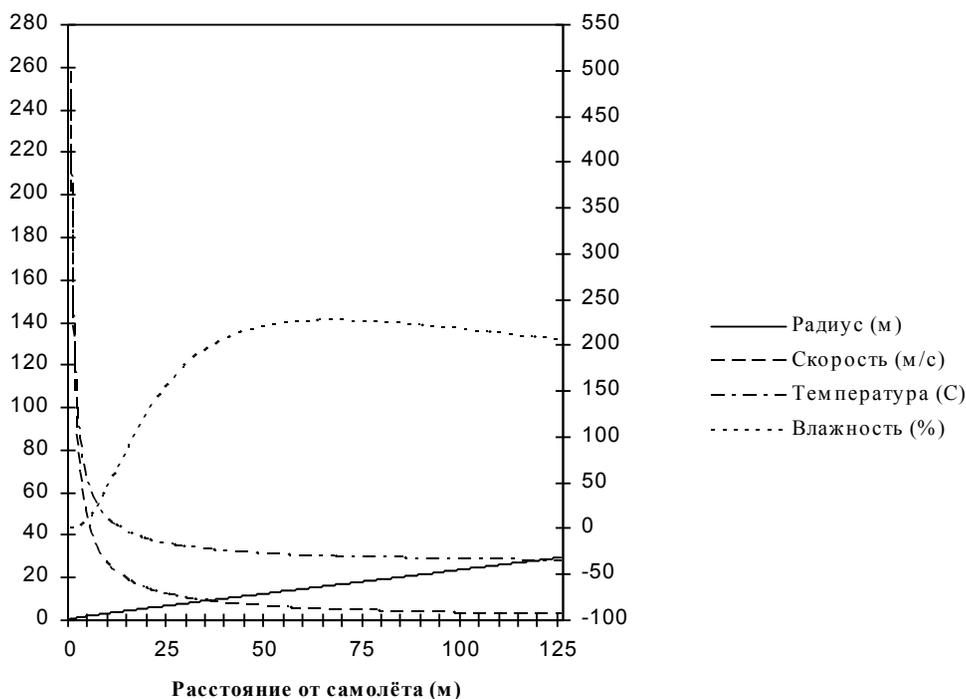


Рисунок 2. Характеристики активного участка струи при температуре окружающего воздуха - 40° С и влажности 70 % температура на срезе сопла 500° С и начальная скорость струи 250 м/с.

При расчёте конденсации в струе значения относительной влажности большие 100% условны в том смысле, что они отмечают участок, на котором происходит конденсация. На самом деле на этих участках относительная влажность практически равна 100%, а пересыщение исчезает в результате

конденсации водяного пара на каплях, которые затем могут кристаллизоваться, если температура струи достаточно низкая.

Зависимость эффекта конденсации от относительной влажности атмосферы оказалась сравнительно слабой, так как количество пара в атмосфере при низких температурах мало по сравнению с его количеством в струе реактивного двигателя.

Расчёты показывают, что эффект конденсации в струе существенно зависит от температуры окружающего воздуха, и конденсационный след может образоваться только при достаточно низкой температуре воздуха.

Основными параметрами, влияющими на развитие конденсационного следа на активном участке, являются температура окружающего воздуха и начальная температура струи, а так же количество воды, которая образуется при сгорании топлива. Они влияют на пресыщение водяного пара в струе. Наибольшее влияние на конденсационный след оказывает температура окружающего воздуха. Изменение температуры воздуха с  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $-50^{\circ}\text{C}$ , при прочих равных условиях, ведёт к увеличению относительной влажности в струе примерно в 5 раз, результаты расчётов влияния температуры на конденсационный след представлены на рисунке 3. Остальные параметры не оказывают существенного влияния.

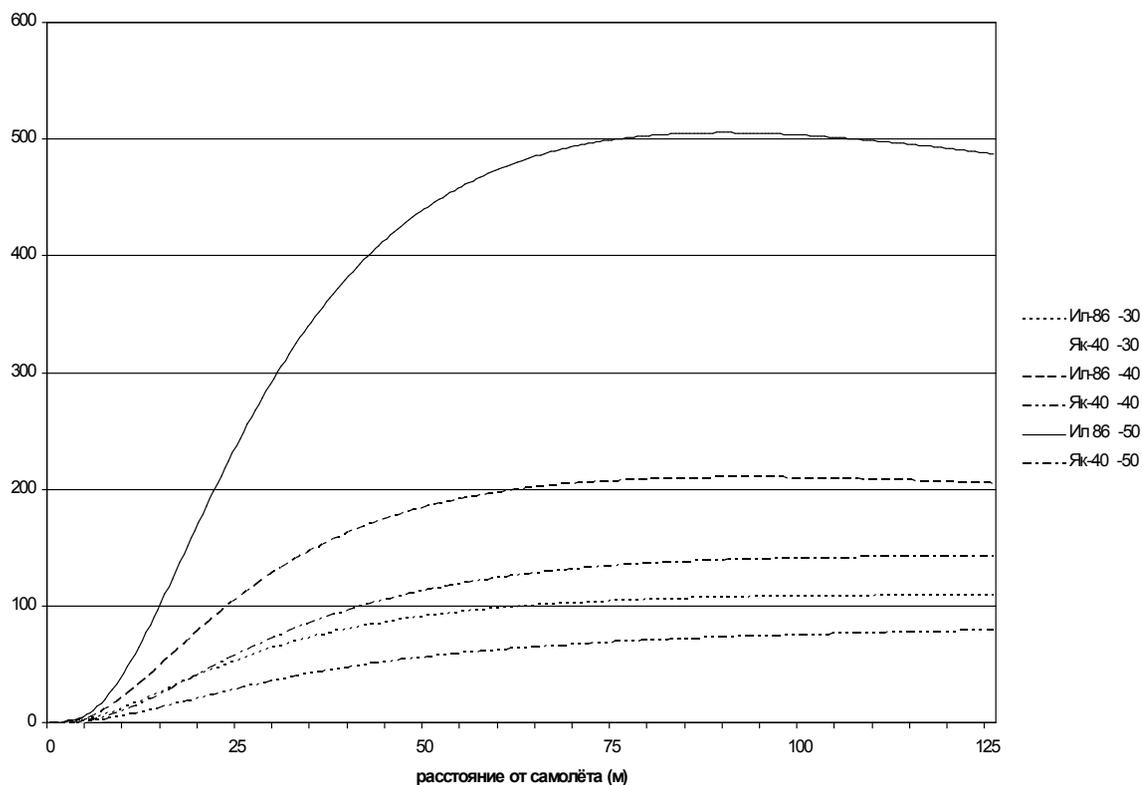


Рисунок 3. Зависимость относительной влажности в струе от температуры окружающей среды и типа самолёта. Относительная влажность воздуха 80% .

Условия для начала конденсации водяного пара возникают на расстоянии 10-200 м от среза сопла в зависимости от характеристик двигателя и атмосферных условий. Чем ниже температура окружающего воздуха, тем ближе к соплу начинает конденсироваться водяной пар. Также начало зоны конденсации приближается к соплу с ростом количества воды, образующейся при сгорании топлива.

Длина активного участка струи конденсационного следа не превышает 100-400 м, радиус конденсационного следа в этом случае составляет 20-50 м. Основными влияющими факторами являются параметры двигателя, наибольшее влияние оказывает начальная скорость истечения газов из сопла. Изменение параметров окружающего воздуха существенно не влияет на длину и ширину активного участка конденсационного следа.

Для анализа физического механизма появления сконденсированных частиц найдём термодинамическую вероятность образования гетерофазных зародышей в пересыщенном паре по формуле, взятой из работы Бекряева В.И. 1991 г.:

$$\Omega_i = 10^{31} \left( \frac{e}{E_0} \right)^2 \exp \left( - \frac{4\pi \delta_{i-n} r_i^{*2}}{3kT} \right) ,$$

где  $\Omega_i$  – термодинамическая вероятность образования зародыша соответствующей фазы в  $\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$  (индекс  $i$  соответствует параметрам воды или льда),  $T$  – температура,  $e$  – парциальное давление водяного пара в струе,  $E_0$  – давление насыщенного водяного пара при температуре  $T_0=273,15$  К,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\delta_{i-n}$  – поверхностная энергия на границе вода-пар или лёд-пар,  $r_i^*$  – радиус гетерофазного зародыша. Радиус гетерофазного зародыша можно определить по формуле:

$$r_i^* = \frac{2\delta_{i-n} \mu}{\rho_i k N_A T \ln \frac{e}{E_i}} ,$$

где  $\mu$  – молярная масса воды,  $\rho_i$  – плотность воды или льда,  $N_A$  – число Авогадро,  $E_i$  – давление насыщенного водяного пара над водой или льдом при температуре  $T$ .

Анализ термодинамической вероятности образования гетерофазных зародышей в пересыщенном паре показывает, что на всём протяжении конденсационного следа нет условий для формирования частиц непосредственно из пара, а следовательно, они формируются на инородных

ядрах конденсации (атмосферные аэрозоли и твёрдые частицы, выбрасываемые из двигателя).

На пассивном участке температура и скорость в струе и окружающей среде практически не отличаются друг от друга (перегрев исчез, собственная скорость струи потеряна). Однако турбулентное рассеяние струи продолжается, площадь её поперечного сечения увеличивается, водяной пар распространяется всё дальше и дальше от оси, но сама струя перестала быть активным рассеивателем, скорость распространения водяного пара теперь определяется атмосферной турбулентностью, которая характеризуется коэффициентом турбулентности атмосферы.

Распространение водяного пара в струе, в этом случае, может быть рассчитано на основе уравнения диффузии примеси от мгновенного линейного источника. Концентрация ледяных частиц в конусообразно расширяющейся за самолётом зоне рассчитывается по формуле, предложенной Качуриным Л.Г.

$$\frac{c(x, R)}{N'} = \frac{v}{4\pi D x} \exp\left(-\frac{v R^2}{4 D x}\right),$$

где  $c(x, R)$  – концентрация примеси на расстоянии  $R$  от оси и  $x$  от самолёта,  $N'$  – число ледяных кристаллов образующихся в струе на единице пути,  $D$  – коэффициент турбулентной диффузии,  $v$  – скорость самолёта.

Это уравнение выведено при условии одинакового коэффициента диффузии в горизонтальной и вертикальной плоскости. Если это условие не выполняется, то уравнение принимает следующий вид

$$\frac{c(y, z, \tau)}{N'} = \frac{1}{4\pi \sqrt{D_y D_z} \tau} \exp\left(-\frac{y^2}{4 D_y \tau} - \frac{z^2}{4 D_z \tau}\right),$$

где  $D_y$  – коэффициент диффузии по горизонтали,  $D_z$  – коэффициент диффузии по вертикали, при этом  $y^2 + z^2 = R^2$ ,  $\tau$  – время с момента пролёта.

Для расчёта концентрации кристаллов в различных участках конденсационного следа необходимо знать, сколько ледяных кристаллов может сформироваться в выбрасываемом двигателем самолёта воздухе:

$$N' = \alpha' \varphi N,$$

где  $\alpha'$  – влаготворная способность топлива (количество воды, которая образуется при сжигании топлива, для керосина она составляет 1,4 кг/кг),  $\varphi$  – расход топлива на единицу пути,  $N$  – льдообразующая активность водяного пара. По результатам опытов, проводившихся в ЛГМИ в 1980 г., льдообразующая активность водяного пара сильно зависит от давления пара

и диаметра сопла. При уменьшении диаметра сопла льдообразующая активность возрастает. При увеличении давления газа, выходящего из сопла, активность пара возрастает, однако, при увеличении давления выше 5 МПа это увеличение замедляется. Для условий типичных реактивных двигателей её можно принять равной  $10^8$ - $10^{10}$  (1/г).

Для образования и развития конденсационного следа относительная влажность надо льдом должна быть больше 100%, в тоже время при большой влажности перистые облака могут образоваться сами. Для исключения из рассмотрения условий, при которых может существовать перистая облачность, был использован критерий наличия облачности по значению дефицита точки росы. На рисунке 4, первая кривая показывает 100% влажность надо льдом, вторая проведена по критерию наличия облачности. Зона между ними соответствует условиям образования конденсационных следов. Для этой зоны и были проведены расчёты развития конденсационных следов.

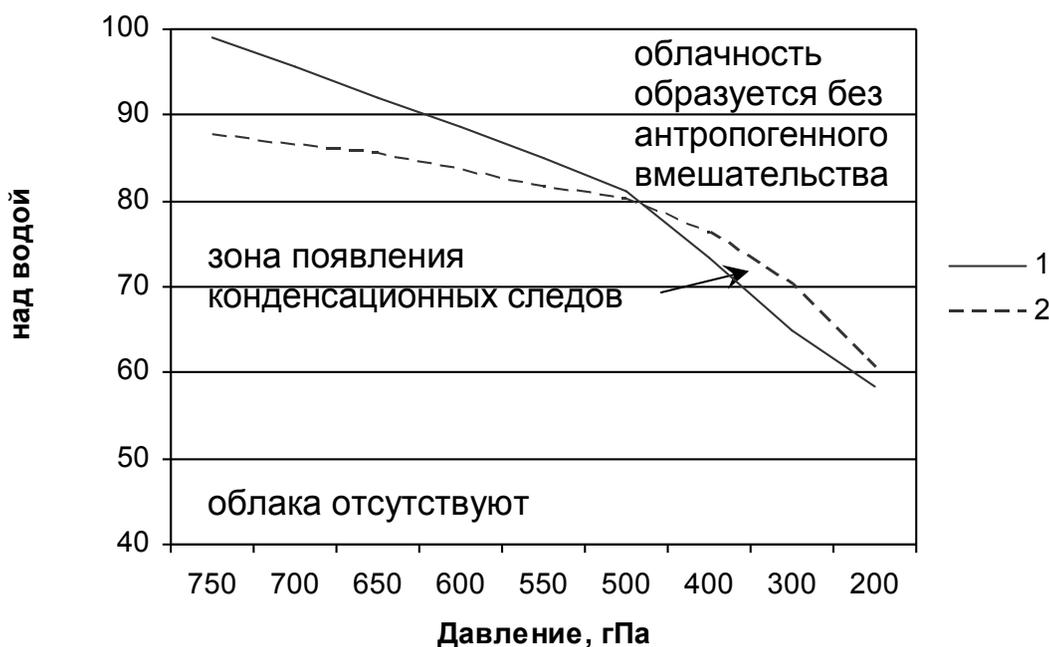


Рисунок 4. График возможности появления конденсационных следов.

Время существования следов оценивалось по времени укрупнения ледяных частиц до размеров, когда их скорость падения превышала вертикальную скорость ветра и образовавшаяся частица выпадала из следа. Изменение радиуса частиц со временем рассчитывалось по следующей формуле

$$r(\tau) = \sqrt{r_0^2 + 2D_m \frac{\rho_{ex}}{\rho_l} \frac{\mu}{M} \frac{f E_\epsilon}{P} \left(1 - \frac{E_l}{f E_\epsilon}\right) \tau},$$

где  $r_0$  – начальный радиус частицы,  $D_m$  – коэффициент молекулярной диффузии пара,  $\rho_{ex}$  и  $\rho_l$  – плотности воздуха и льда соответственно,  $\mu$  и  $M$  – молярные массы водяного пара и воздуха,  $f$  – относительная влажность над водой,  $P$  – атмосферное давление,  $E_e$  и  $E_l$  – парциальное давление насыщенного водяного пара над поверхностью воды и льда.

Скорость падения частицы можно рассчитать по эмпирической формуле, выведенной из формулы Стокса

$$v(r) = 9,6 (1 - \exp(-1200 * r))(1 - \exp(-12000 * r)) \sqrt{\frac{\rho_{ex 0}}{\rho_{ex}(z)}}$$

где  $\rho_{ex 0}$  и  $\rho_{ex}(z)$  – плотность воздуха при нормальных условиях и на высоте.

Результаты расчётов времени существования конденсационных следов при различной относительной влажности приведён в таблице 1. Для других высот время существенно не изменяется.

Таблица 1.

Время существования конденсационного следа в зависимости от относительной влажности атмосферы на высоте 400 гПа изобарической поверхности.

Относительная влажность над поверхностью воды (%)	Относительная влажность над поверхностью льда (%)	Время существования конденсационного следа (мин.)
100	148	13
90	133	22
80	118	39
70	103	215
60	88	пропадёт через 6с.

На существование конденсационного следа существенно влияет относительная влажность окружающего воздуха, так как образовавшиеся в результате сгорания авиационного топлива кристаллические зародыши растут за счёт поступления водяного пара из окружающего струю воздуха. Чем больше относительная влажность, тем быстрее кристаллы достигают размеров, при которых они не в состоянии поддерживаться воздушными потоками в зоне следа, и выпадают из него. При относительной влажности над льдом, немного большей 100% рост кристаллов очень медленный и конденсационный след существует продолжительное время. Если

относительная влажность надо льдом в атмосфере меньше 100%, то зародыши, образовавшиеся в зоне пересыщенного водяного пара струи, выходя из неё, начинают испаряться, и конденсационный след быстро исчезает.

Для расчёта прозрачности всей толщины конденсационного следа, в предположении симметрии верхней и нижней частей конденсационного следа относительно плоскости, в которой лежит ось следа, была выведена следующая формула:

$$p = \exp\left(-\frac{6,3 N' r^2(\tau)}{4\pi D\tau} \exp\left(-\frac{y^2}{4D\tau}\right) 2 \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{z^2}{4D\tau}\right) dz\right) .$$

Из полученной формулы видно, что на изменение прозрачности конденсационного следа во времени направлены два противоположных процесса. Первый связан с уменьшением прозрачности вследствие увеличения размера частиц, а второй – с увеличением прозрачности вследствие распространения этих частиц на больший объём пространства

Пример расчёта прозрачности приведён на рисунке 5.

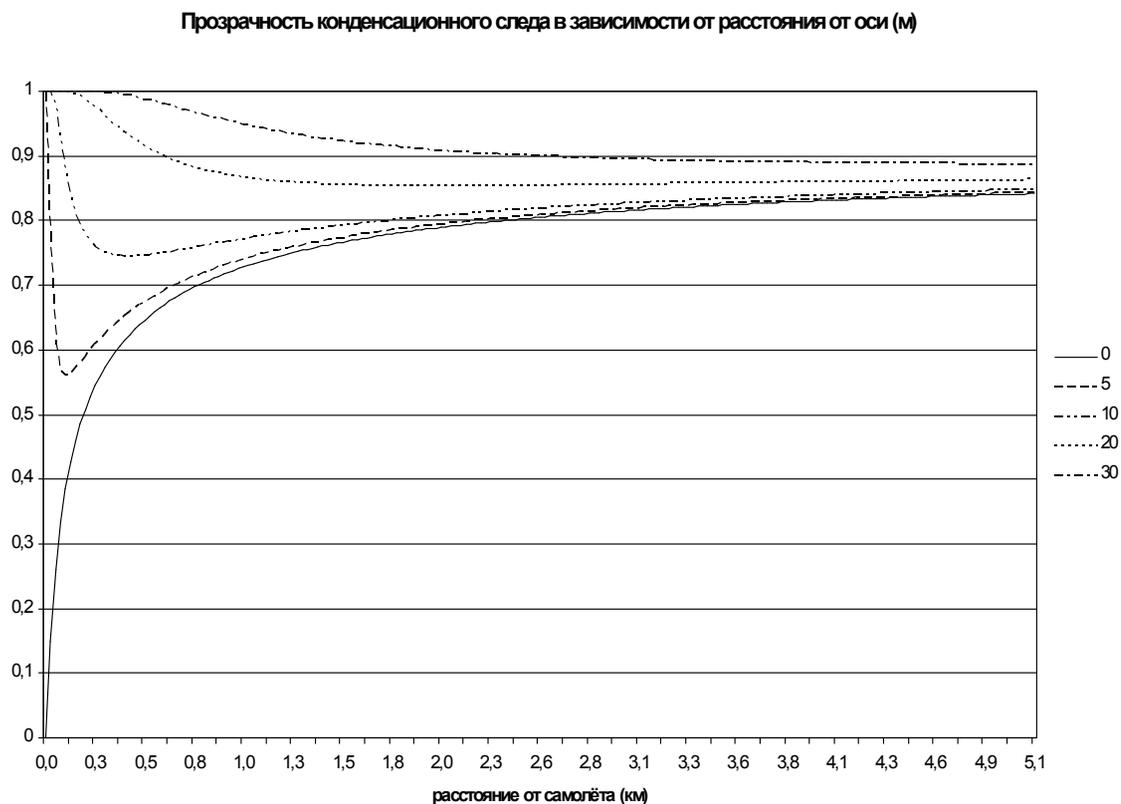


Рисунок 5. Расчёт прозрачности при условиях: температура воздуха – 50° С, относительная влажность 65%, коэффициент турбулентности 10 м<sup>2</sup>/с, льдообразующая активность 10<sup>10</sup> 1/г, количество образующейся воды 10 г/м.

Прозрачность конденсационного следа через центр оси в начале активного участка струи, когда возникают условия для конденсации пара, резко уменьшается, затем с течением времени начинает возрастать. При небольших пересыщениях в воздухе, когда конденсационный след существует длительное время, прозрачность начинает уменьшаться вследствие расширения конденсационного следа и увеличения радиуса частиц в результате конденсации. При рассмотрении прозрачности не через ось следа, а на небольших расстояниях от оси, может наблюдаться уменьшение прозрачности до некоторого значения за счет распространения частиц от оси, и дальнейшее увеличение её по мере расширения конденсационного следа. Это расстояние зависит от температуры и влажности окружающего струю воздуха, коэффициента турбулентности и количества образующихся кристаллов. На больших расстояниях от оси прозрачность плавно уменьшается.

Чем больше воды образуется при сгорании топлива, тем менее прозрачным оказывается конденсационный след. Чем меньше температура окружающей среды, тем более прозрачным получается конденсационный след, что обусловлено меньшим массовым содержанием водяного пара в холодном воздухе. Чем больше турбулентность атмосферы, тем быстрее изменяется прозрачность. При больших значениях коэффициента турбулентности конденсационный след более прозрачный и занимает больший объём пространства. При значениях влажности воздуха, типичных для условий формирования конденсационных следов, прозрачность следа изменяется от 50 до 90%.

**В третьей главе** приводятся результаты наблюдений за развитием перистых облаков из конденсационных следов, даётся описание оптических свойств этих облаков и приводится способ измерения прозрачности облаков по снимкам в видимом диапазоне с метеорологического спутника NOAA.

По результатам наблюдений время сохранения конденсационных следов и эволюция перистой облачности на этой же высоте находится в непосредственной и хорошо выраженной зависимости. В случае сохранения следа меньше 10 минут перистая облачность на этой высоте будет рассеиваться с вероятностью 85 % или, если её нет, не возникает в течение ближайших 4 – 6 часов. В случае сохранения следа более 30 минут с такой же вероятностью можно утверждать, что в течение 4 – 6 часов будет происходить развитие перистой облачности, а если она есть, то эта облачность будет уплотняться.

Перистые облака, трансформирующиеся из конденсационных следов, занимают большую площадь чем сами следы, а, следовательно, они вносят большой вклад в изменение радиационного баланса системы “атмосфера-земля”, обусловленный воздействием авиации. Перистые облака при оптической толщине  $\tau \approx 0,1-0,2$  дают значительный парниковый эффект и изменение альбедо системы “земля – атмосфера” до 5%. Тонкие облака верхнего яруса, расположенные над подстилающей поверхностью с малым

альбедо, больше влияют на альбедо системы, чем плотные нижерасположенные облака.

Радиационные характеристики облаков зависят от геометрических размеров облачного слоя, его высоты над поверхностью земли, величины альбедо подстилающей поверхности, угла падения прямого солнечного излучения на верхнюю границу облака и оптических характеристик элементарного объёма облачной среды. Вследствие большого разнообразия факторов, влияющих на оптические свойства перистых облаков, теоретические расчёты проводятся только для модельных сред, в которых изначально задаются некоторые параметры среды, что не полностью соответствует реальным наблюдениям.

При распространении в атмосфере оптическое излучение претерпевает поглощение и рассеяние. Эти процессы описываются посредством коэффициента рассеяния  $\sigma$ , коэффициента ослабления  $\epsilon$ , и коэффициента поглощения  $\alpha$ , причем сумма этих коэффициентов равна единице. При длине волны излучения  $\lambda \leq 2$  мкм в облаках  $\alpha \ll \sigma$  и эффект поглощения можно не учитывать. Поэтому коэффициент пропускания, или прозрачность, можно определить по измерению рассеяния света.

На основе световоздушного уравнения (Матвеев Л.Т., 2000г), была выведена формула, позволяющая оценить прозрачность слоя перистых облаков по снимкам в видимом диапазоне. На снимках можно найти районы, где рядом находятся области, как закрытые облаками, так и безоблачные. Для таких районов можно определить прозрачность облаков, определив разность яркости фона и облака. В таком случае прозрачность (предполагая 256 градаций серого цвета для монохромных снимков) можно определить по формуле:

$$p = \frac{J_{об} - 256}{J_{ф} - 256} * 100 \quad ,$$

где  $J_{об}$  – яркость изображения облака в точке, где рассчитывается прозрачность,  $J_{ф}$  – яркость близлежащего фона. При получении значения яркости точки берется среднее значение точек в небольшой области, что исключает влияние помех при передаче изображения. При выборе точки фона необходимо, чтобы характер освещения фона и точки изображения, для которой рассчитывается прозрачность, был одинаков, а также, чтобы фон под выбранными для измерений точками не сильно отличался. Точность определения прозрачности сильно зависит от разности яркостей фона и точки, чем больше эта разность, тем точнее можно определять прозрачность.

### Ошибки определения прозрачности

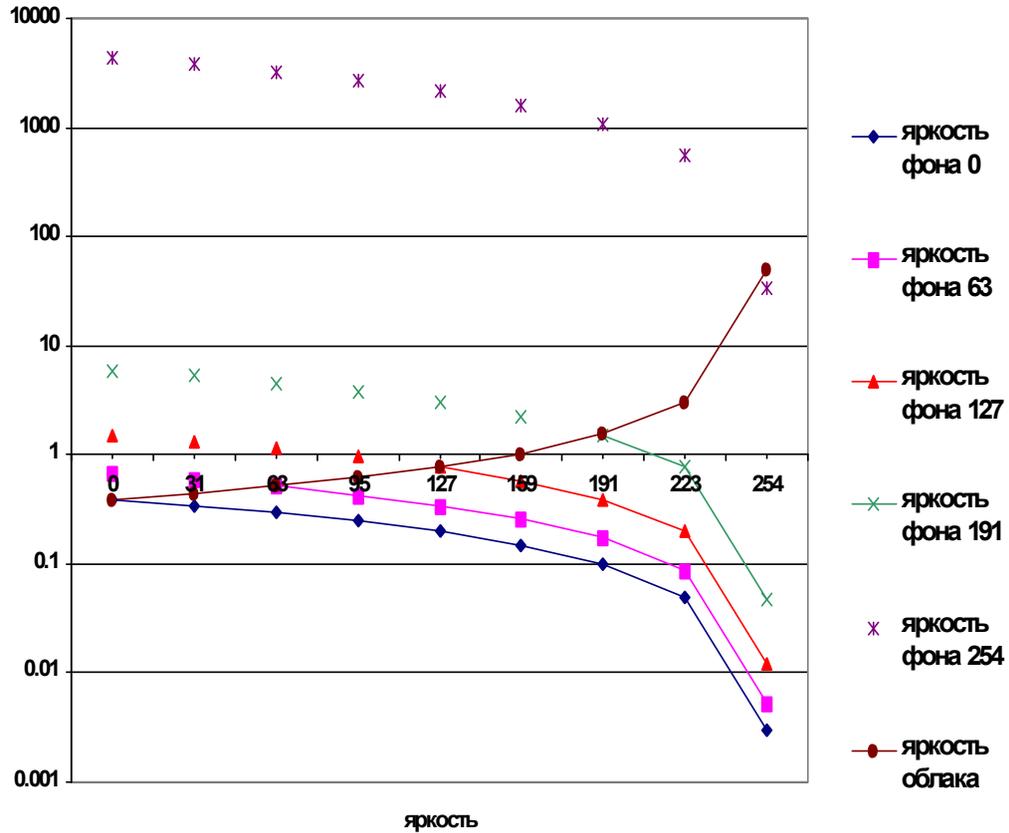


Рисунок 6. Абсолютные ошибки расчёта прозрачности по приведённой формуле.

На рисунке 6 представлены абсолютные ошибки (в процентах) в вычислении прозрачности. По горизонтали отложено значение яркости фона в случае, когда рассматривается влияние ошибки в определении яркости облака на рассчитанную прозрачность, или яркость облака, когда анализируется влияние ошибки в определении яркости фона. Видно, что ошибки метода резко возрастают при большой яркости фона, при яркости большей 159 ошибка становится больше 1%. Приведенная формула не может работать, если яркость облака оказывается меньше яркости фона.

Пример расчета прозрачности облачности приведен на рисунке 7. Слева представлен результат, а справа исходный снимок. Расчет проводился только для облачности над поверхностью воды. Полученные данные о прозрачности были усреднены для 10 градаций, и указаны средние значения в каждой градации.

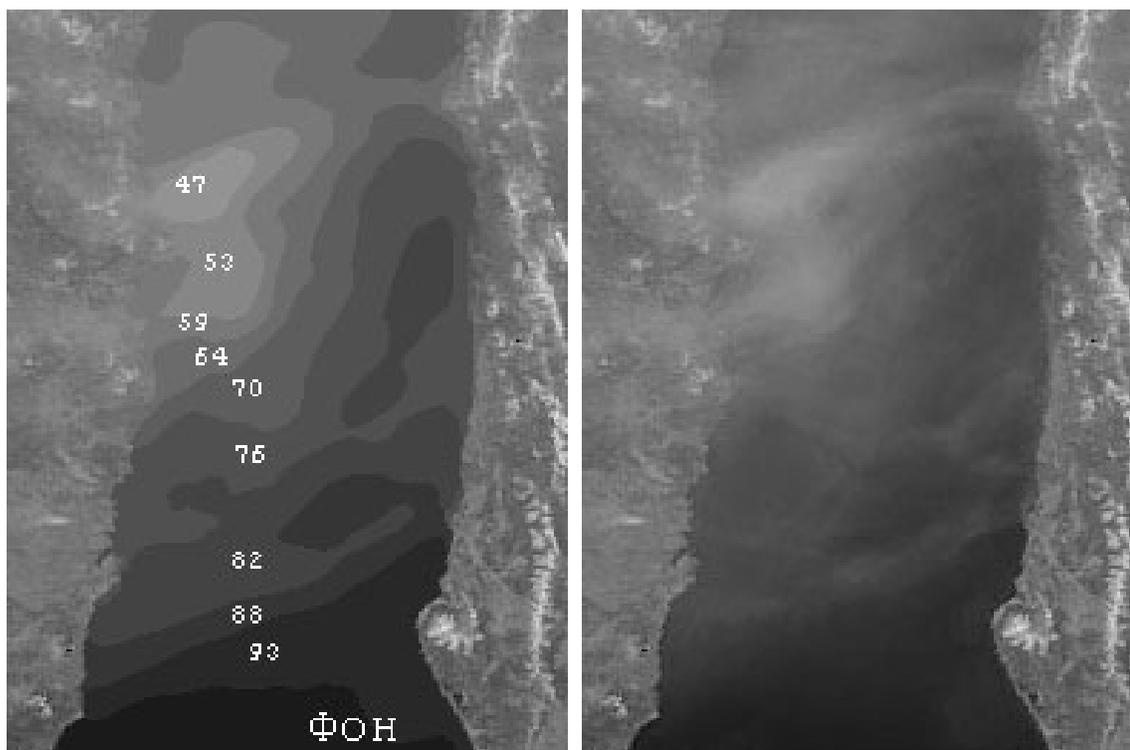


Рисунок 7. Результат расчёта прозрачности перистых облаков.

**В заключении** обобщаются результаты выполненных научных исследований и сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. Предложена методика расчета параметров активного и пассивного участков конденсационного следа за самолетом. Исходными данными для расчета является количество выбрасываемой в атмосферу воды в расчете на единицу длины следа, начальная температура струи, её начальная скорость, температура и относительная влажность окружающей атмосферы.

2. Проведенные расчеты свидетельствуют, что основными параметрами, влияющими на развитие следа на активном участке, являются температура окружающего воздуха, начальная температура струи и количество выбрасываемой воды в расчете на единицу длины следа. Понижение температуры воздуха приводит к более ярко выраженному следу, этому же способствует увеличение количества выбрасываемой воды. Наибольшее влияние оказывает температура окружающего воздуха в диапазоне от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $-50^{\circ}\text{C}$ . Конденсация водяного пара (видимый участок струи) начинается на расстоянии 10 – 20 метров от среза сопла самолета. Длина активного участка струи не превышает 100 – 400 метров, а радиус следа на этом участке составляет 20 – 50 метров.

3. Расчеты, проведенные для пассивного участка струи, свидетельствуют, что основным параметром, определяющим существование и устойчивость следа, является относительная влажность окружающего воздуха. При относительной влажности надо льдом менее 100% след быстро исчезает, при влажности надо льдом выше 100% рост ледяных кристаллов продолжается, причем тем быстрее, чем выше влажность.

4. Предложена методика расчета прозрачности конденсационного следа. Выведены уравнения, позволяющие рассчитать прозрачность на основе количества выбрасываемой воды на единицу длины следа, льдообразующей активности водяного пара, температуры и влажности окружающего воздуха и коэффициента турбулентной диффузии в атмосфере.

5. Результаты расчета прозрачности струи показывают, что увеличение количества выбрасываемой воды (также как и увеличение её льдообразующей активности) приводит к появлению оптически более плотного следа. Понижение температуры воздуха наоборот, приводит к образованию более прозрачного следа, что объясняется меньшей скоростью роста кристаллов льда в следе.

6. Проведены расчеты прозрачности следа в различных его участках, причем варьировались координаты в двухмерной горизонтальной системе координат. Прозрачность следа, рассматриваемого «через центр оси» резко уменьшается в самом начале образования следа, затем постепенно возрастает по мере удаления от самолета. Прозрачность следа, рассматриваемого «сбоку от оси» уменьшается по мере удаления луча зрения от оси следа, причем след размывается тем быстрее, чем более атмосфера турбулентная. Значения прозрачности следа при типичных условиях на высотах, характерных для образования следов, составляют от 50% до 90%. В случаях достаточно высокой влажности след может трансформироваться в перистую облачность.

7. Предложена методика определения прозрачности перистой облачности на основе анализа фотографий, сделанных с искусственных спутников Земли, в случаях, когда облачность появляется над однородным, достаточно темным фоном (например, над морем). Предложена простая формула для определения прозрачности перистой облачности по изменению яркости отдельных объектов. Проанализированы несколько фотографий перистой облачности, определена её прозрачность, которая оказывалась в пределах от 40% до 70%. Показано, что ошибка метода резко возрастает при возрастании яркости фона. Если яркость фона превышает яркость облаков, то предложенная методика неприменима. Если яркость фона не превышает 159 (из 256 возможных уровней яркости), то ошибка определения прозрачности становится менее 1%. Таким образом, предложенная методика может применяться в достаточно широком диапазоне изменения яркости фона.

### **Основные публикации по теме диссертации.**

1. Григоров Н.О., Саенко А.Г. Расчёт прозрачности конденсационных следов за самолётами. – Материалы 5-й международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли». СПб.: НИИХ СПбГУ, 2006г. 96с.

2. Григоров Н.О., Саенко А.Г. Оценка прозрачности перистых облаков на основе анализа спутниковых фотографий. – Материалы итоговой сессии учёного совета 2005 г. Изд. РГГМУ, 2005г. 224с.

3. Григоров Н.О., Саенко А.Г. Приём телевизионного изображения Земли из космоса. Лабораторная работа № 18. по дисциплине “Методы и средства гидрометеорологических измерений” – Изд. РГГМУ, 2004г. 30с.

4. Бриедис Т.Е., Григоров Н.О., Глушковский Б.И., Саенко А.Г. Исследование импульсного фотометра ФИ-1. Лабораторная работа № 13. по дисциплине “Методы и средства гидрометеорологических измерений” – Изд. РГГМУ, 2000г. 24с.