

УДК 629.735.33.048

В.Т. ДЕДЕШ, Р.Х. ТЕНИШЕВ, С.Н. КИОСЕ, М.А. ЛАВРОВ

*Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова, Жуковский, Россия*

## МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА ОБРАЗОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ СЛЕДОВ В КРЕЙСЕРСКИХ ПОЛЕТАХ САМОЛЕТОВ С ГТД И ЕЕ ИДЕНТИФИКАЦИЯ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Разработаны количественная модель и комплексная методика для количественной оценки и прогноза условий образования и характеристик кондследов при полетах гражданских самолетов с различными типами ГТД с использованием специально оборудованной летающей лабораторией Ту-154 генератора/зондировщика, позволяющей измерять характеристики облаков и конденсационных следов. Методика использует равномерное и двухмерное смешение выхлопной струи двигателя и атмосферы. Данные, полученные в ходе летных экспериментов, подтверждают надежность методики.

**Ключевые слова:** глобальное потепление, авиация, кондследы, перистые облака, модель прогноза, летный эксперимент.

### Введение

Влияние авиации на окружающую среду не ограничивается лишь парниковыми газами. Образование кондследов, согласно проведенным исследованиям, может быть так же важно, как и CO<sub>2</sub>. Но в предшествующих работах по кондследам было несколько особенностей, затрудняющих их применение. Во-первых, характеристики выхлопной струи двигателя оценивались приближенно, с использованием суммарного теплового эквивалента и для кон-

кретных двигателей и самолетов их характеристики были приближенными. Во-вторых, особенности двухконтурных двигателей без камеры смешения и турбовинтовых двигателей вообще не были учтены. В-третьих, условия формирования кондследов рассматривались лишь качественно, что не давало возможности оценить конкретное влияние отклонения характеристик двигателей и атмосферы на характеристики кондследов и условия образования на различных трассах полета (рис. 1).

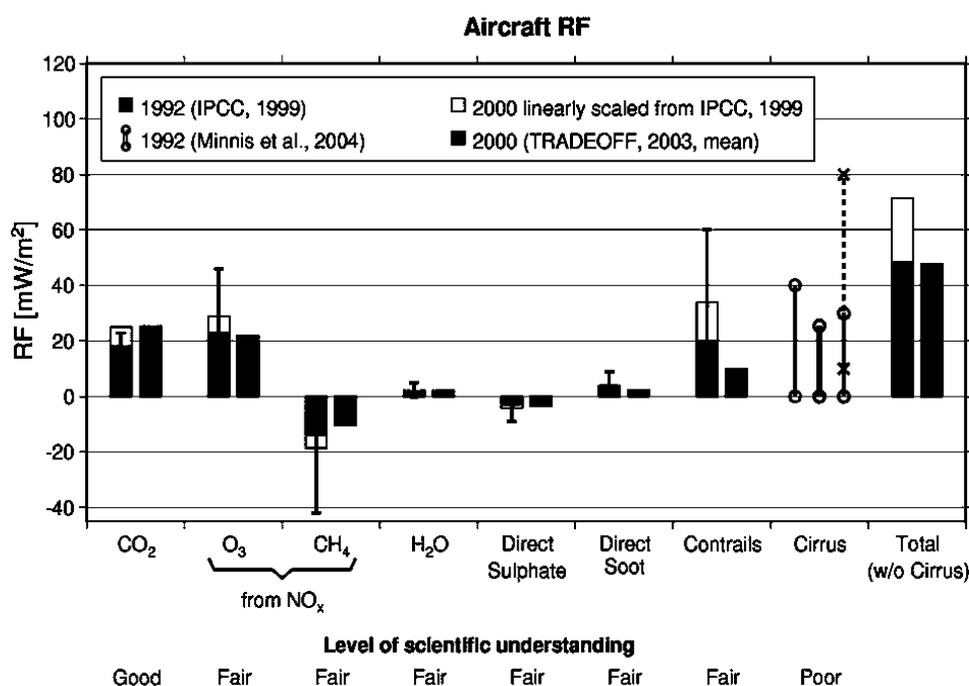


Рис. 1. Изменение теплообмена из-за авиации

### 1. Модель

В ЛИИ разработана и апробирована на летающей лаборатории Ту-154 качественно новая (по сравнению с применяющимися в международной практике) методика исследований образования конденсационных следов в ближнем поле.

Сущность методики:

1. Теория образования конденсационных следов – общепринятая.
2. Смещение струи газа и атмосферы – при двухмерном смещении обоснована возможность использования «прямой смещения», аналогичной равномерному смещению (рис. 2).

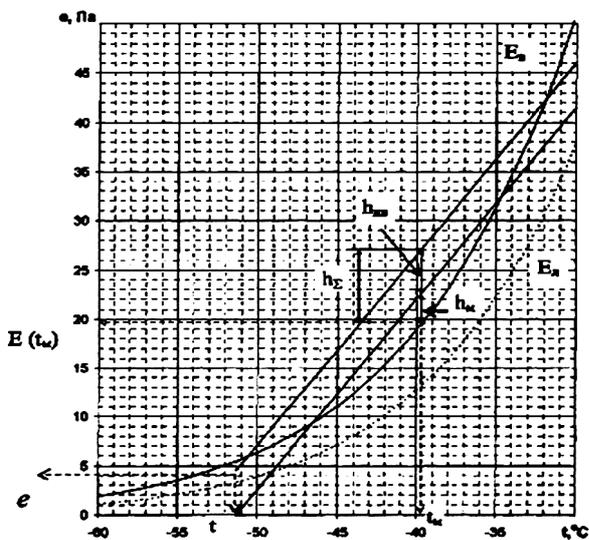


Рис. 2. Показатель количественного пересыщения влажности

3. Расчет – прямой учет характеристик струи газа конкретного типа ГТД (расчет или замер).
4. Применение количественного критерия образования конденсационных следов, состоящего из двух членов:  $h_{\Sigma} = h_m + e_{нв}$ .
5. Использование для эксперимента специальной летающей лаборатории Ту-154 зондировщика-генератора с двигателями Д-30КУ.

### 2. Летающая лаборатория

Для проверки обоснованности критерия и коррекции методики использовалась летающая лаборатория Ту-154, оборудованная специальными измерительными приборами для измерения характеристик облаков и конденсационных следов. Основной упор был сделан на влажность окружающего воздуха, которая измерялась самолетным конденсационным гигрометром (СКГ) и бортовым сорбционным измерителем влажности (БСИВ), показанными на рис. 3.



Рис. 3. Датчики на ЛЛ Ту-154М

Водность атмосферы и кондследов измерялась измерителем влажности облаков и конденсационных следов (ИВОКС). Температура измерялась термометром сопротивления (ЭТ-17). Графики результатов расчетов для двигателя Д-30КУ показаны на рис.4.

Для полетного наблюдения за формированием конденсационного следа были установлены перископ (ТС-27АМШ) и видеокамера. Для регистрации границ образования и времени жизни кондследов были использованы кинотеодолитные системы «Опал», «Янтарь» и специальная камера для видео и фотосъемки с земли. Данные летного эксперимента показаны на рис. 5.

По результатам эксперимента и расчета границы образования устойчивых конденсационных следов имели место на высотах  $H \sim 11...13$  и  $H \sim 7...8$  км.

При отклонениях от МСА  $\Delta T_{нв} = \pm 5^{\circ}$  и более граничная высота образования КС может изменяться на несколько километров, что подтверждается экспериментом. На высотах 11...13 км при  $T_{нв\_мса} = -56^{\circ}C$ ,  $e_{нв} \leq 2Pa$ , изменение  $\Delta e_{нв} = \pm 40\%$  при  $e_{нв\ ср.} \approx 60\%$  приведет к изменению  $\Delta H_{гр} \approx 600...750m$ , а на высоте  $H \approx 8$  км  $\Delta H_{гр}$  может составлять  $\sim 2km$  и более. Влияние отклонений  $\Delta T_{см}$ ,  $\Delta \alpha_{см}$  на  $\Delta H_{гр}$  на  $\pm 5\%$  составляло не более 1000 м.

Оценка параметрического влияния отклонений этих же параметров на изменение  $\Delta h_{\Sigma}$ , что определяет при наличии КС изменение его «мощности», свидетельствует также о более сильном влиянии отклонений  $\Delta T_{нв}$ ,  $\Delta e_{нв}$  на эти показатели.

### 3. Двухмерная модель

Для исследования процессов образования кондследа была разработана методика смещения выхлопной струи современного авиадвигателя с окружающим воздухом. Данная методика основана на решении полной системы газодинамических уравнений с учетом турбулентности.

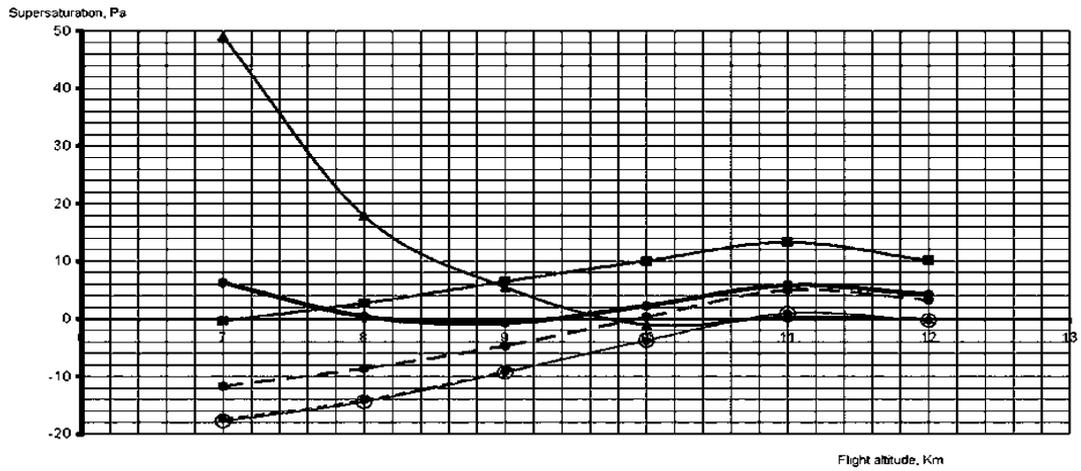


Рис. 4. Результаты расчетов для двигателя Д-30КУ

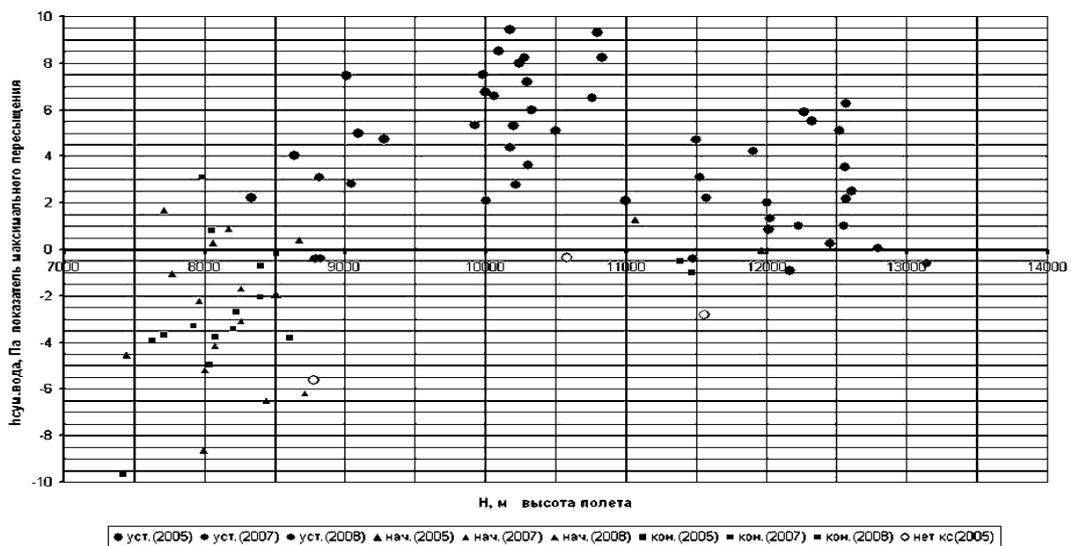


Рис. 5. Данные летного эксперимента на ЛЛ Ту-154 с двигателями Д-30КУ

Выделены основные газодинамические и геометрические параметры, созданы физическая и математическая модели течения, разработана вычислительная модель, отработана технология численного моделирования (пример – на рис. 6).

Основываясь на данных результатах была создана спецификация количественной прогнозной модели для образования и существования конденсатов для однородного смешения выхлопной струи двигателя с атмосферой. Был предложен способ вычисления угла наклона линии смешения с учетом как полной, так и статической температур выхлопной струи двигателя. Методы равномерного смешения и вычисления угла наклона линии смешения были применены для нахождения значений показателя пересыщения над водой и льдом, с учетом полной и статической температур выхлопной струи двигателя за камерой смешения.

$$B_0 = \frac{B_0(T_{cm}^*) + B_0(T_{cm})}{2}, \quad (1)$$

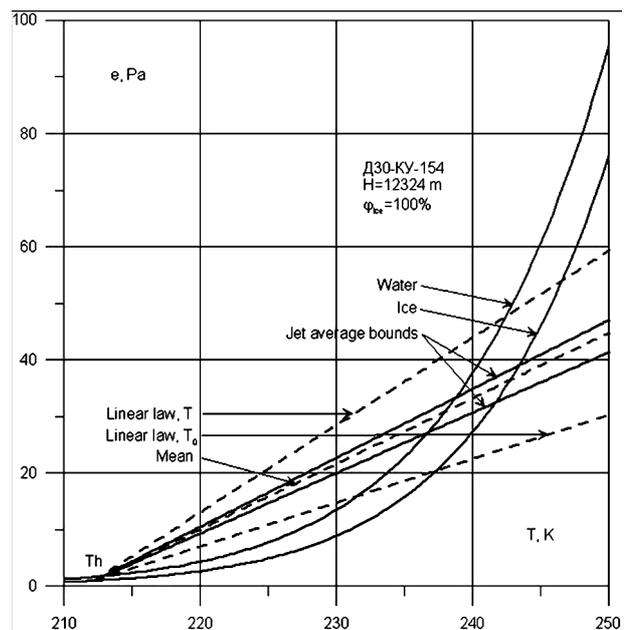


Рис. 6. Линия равномерного смешения, рассчитанная по двумерной модели

где  $B_0$  – градиент линии смещения;  $T_{см}^*$  – полная температура смеси;  $T_{см}$  – статическая температура смеси.

Проведенное исследование показало, что численно показатель пересыщения влажности, рассчитанный по усовершенствованной методике, где использовалась средняя температура в камере сгорания ( $T_{см.ср}$ ), более соответствует условиям образования конденсатов, согласно кривым насыщения над водой и над льдом, чем использовавшийся до этого показатель, рассчитанный по предыдущей методике, где использовалась полная температура ( $T_{см.абс}$ ).

Исследования по условиям формирования конденсатов были также проведены для двигателей без камеры смешения. Проведенные, согласно разработанной методике расчеты (рис. 7), показали, что и для двигателей с открытым капотированием также существует усредненная линия смещения.

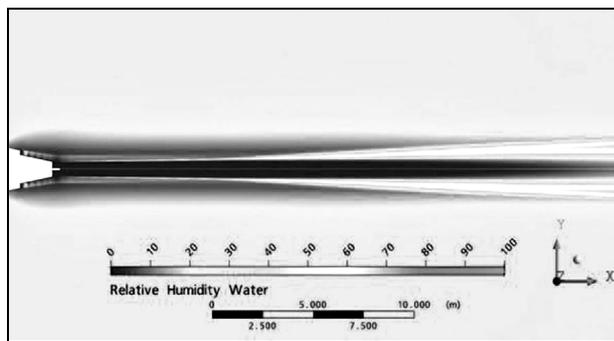


Рис. 7. Двухмерный расчет для двигателя с неполным капотированием

#### 4. Результаты

Проведенные расчеты, эксперимент, их анализ и обобщение позволили при использовании модели прогноза и обычных средств измерений на самолете сформировать (выделить) количественные показатели «экологического паспорта», определяющие для самолета конкретного типа с конкретным типом двигателя:

- условия образования устойчивых КС в ближнем поле – возможные границы образования по высоте полета  $H_{гр}$  и их изменение при изменении атмосферных условий ( $T_{нв}$ ,  $e_{нв}$ ), режима двигателя, режима полета;

- эквивалентное влияние на границы образования КС -  $\Delta H_{гр}$ , изменения атмосферных условий ( $\Delta T_{нв}$  и  $\Delta e_{нв}$ ) и характеристик струи двигателя ( $\Delta T_{см}$ ,  $\Delta \alpha_{см}$ );

- мощность конденсационного следа.

Показано, что для всех типов одноконтурных

ГТД и ТРДД с камерой смешения и без камеры смешения при проведении расчетов с учетом двухмерного смешения м.б. определена осредненная «прямая смешения» струи газа и атмосферы, наличие которой позволяет с применением предложенной методики количественной оценки определять условия образования устойчивых КС и их изменение при изменении атмосферных условий, режима двигателя и условий полета, что требуется для разработки «экологического паспорта» самолета с данным типом двигателя.

Полученные зависимости и расчетные формулы позволяют оценить для конкретного самолета численные значения изменения  $\Delta H$  на границе образования устойчивых конденсационных следов по высоте полета при изменении температуры и влажности атмосферы  $\Delta T_{нв}$  и  $\Delta e_{нв}$ , температуры выхлопной струи двигателя  $\Delta T_4$  и коэффициента избытка воздуха в камере сгорания  $\Delta \alpha_{кс}$ , которые могут иметь место при изменении режима двигателя или в процессе эксплуатации.

Апробация разработанной модели и методики на примере самолета Ту-154 с двигателями Д-30КУ (с камерой смешения) подтвердила ее правомерность и достоверность.

#### Выводы

Проведенные расчеты и полученные результаты при применении и развитии могут существенно дополнить работы, ведущиеся в данном направлении другими европейскими организациями, и представляют большой интерес для экологических оценок влияния эмиссий конкретных самолетов с различными двигателями на образование конденсатов в крейсерских полетах и возможного влияния на климат Земли. Данные работы можно использовать для формирования рекомендаций по организации полетов по маршрутам (местным, региональным, глобальным) для уменьшения вредного влияния, с учетом особенностей атмосферы в конкретных регионах, на конкретных трассах и в различные времена года.

Данные методы можно использовать для оценки влияния альтернативных топлив (при наличии характеристик) на образование и существование конденсатов в крейсерских полетах самолетов.

#### Литература

1. Методология прогноза и идентификация влияния характеристик ГТД на образование конденсационных следов в крейсерском полете / В.Т. Дедеш,

*Р.Х. Тенишев, Н.А. Данковцев, А.П. Леут, Э.Г. Павлова, М.А. Григорьев, А.Н. Невзоров, С.Н. Киосе, В.В. Попов, А.И. Ланишин // Международная конференция «Авиадвигатели XXI века, ЦИАМ, 6-9 декабря 2005.*

2. *Необходимость разработки методик летных исследований условий образования и существования конденсационных следов самолетов с ГТД в крейсерских полетах / В.Т. Дедеш, Р.Х. Тенишев, Н.А. Данковцев, А.П. Леут, Э.Г. Павлова, С.Н. Киосе, В.В. Попов, А.И. Ланишин, М.А. Григорьев, А.Н. Невзоров // Девятый международный салон «Двигатели-2006». – Москва, АССАД, 2006.*

3. *Опыт ЛИИ в проведении летных исследований влияния авиадвигателей на загрязнение атмосферы» / В.Т. Дедеш, Р.Х. Тенишев, Н.А. Данковцев, А.П. Леут, Э.Г. Павлова, С.Н. Киосе, В.В. Попов, А.И. Ланишин, М.А. Григорьев, А.Н. Невзоров // Ме-*

*ждународный семинар по авионавтике «Европа-Россия». – Брюссель, Бельгия, 2006.*

4. *Fischter K. Influence of cruise flight altitude on condensation trails and corresponding radiational / K. Fischter, S. Markwart, R. Sausen // Meteorologische Zeitschrift. – 2005. – Vol. 14, No. 4. – P. 563-572.*

5. *Manstein G. Cirrus clouds over Europe, formed by aircraft condensation trails / G. Manstein, U. Schumann // Meteorologische Zeitschrift. – 2005. – Vol. 14, No. 15. – P. 549-554.*

6. *Mathes S. Impact of aviation on the environment in global scale / S. Mathes // AERONEN III Work materials №17 Results of the seminar on air transport systems. – Stockholm, Sweden, 2005.*

7. *Schumann U. On condensation trail of aircraft exhaust jet formation conditions / U. Schumann // Meteorologische Zeitschrift. – 1996. – N. 5. – P. 4-23.*

*Поступила в редакцию 1.04.2010*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой информатики А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

## **МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУ УТВОРЕННЯ СТІЙКИХ КОНДЕНСАЦІЙНИХ СЛІДІВ В КРЕЙСЕРСЬКИХ ПОЛЬОТАХ ЛІТАКІВ З ГТД І ЇЇ ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ З ЕКСПЕРИМЕНТОМ**

*В.Т. Дедеш, Р.Х. Тенішев, С.М. Киосе, М.О. Лавров*

Розроблені кількісна модель і комплексна методика для кількісної оцінки і прогнозу умов освіти і характеристик кондслідів при польотах цивільних літаків з різними типами ТРДД з використанням спеціально обладнаної лабораторією, що літає, Ту-154, генератора/зондувальника, що дозволяє вимірювати характеристики хмар і конденсаційних слідів. Методика використовує рівномірне і двомірне зміщення вихлопного струменя двигуна і атмосфери. Дані, отримані в ході льотних експериментів, підтверджують надійність методики.

**Ключові слова:** глобальне потеплення, авіація, кондсліди, перисті хмари, модель прогнозу, льотний експеримент.

## **QUANTITATIVE FORECAST MODEL OF CONTRAIL FORMATION IN AIRCRAFT CRUISE FLIGHTS AND ITS IDENTIFICATION WITH THE experiment**

*V.T. Dedesh, R.Kh. Tenishev, S.N. Kiose, M.A. Lavrov*

In the report quantitative forecast model and calculation methodic are considered for steady contrail formation in cruise flights of the aircraft with jet engines and identification of calculation results with the experiment on the flying testbed Tu-154 probe/generator with D-30KU engines (jet engines with mixing chamber). Prospects of the application of the forecast model are considered for the estimation of possibility to reduce contrail formation during the flights of airplanes equipped with modern and prospect jet engines on different air routes aiming at the decrease of the harmful influence of jet engine emissions on the greenhouse effect of Earth heat exchange.

**Key words:** global warming, aviation, contrails, cirrus clouds, forecast model, flight experiment.

**Дедеш Виктор Трифонович** – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник КНИО-3 Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, Жуковский, Россия, e-mail: kd3@aha.ru.

**Тенишев Рустем Хасанович** – канд. техн. наук, начальник сектора КНИО-3 Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, Жуковский, Россия, e-mail: kd3@aha.ru.

**Киосе Светлана Николаевна** – ведущий инженер КНИО-3 Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, Жуковский, Россия, e-mail: kd3@aha.ru.

**Лавров Михаил Александрович** – инженер КНИО-3 Летно-исследовательского института им. М.М. Громова, Жуковский, Россия, e-mail: wiedz@progtech.ru.