

Approbation of the Methodology for Modeling the Conditions of Formation of Condensation Trails of Aircraft Based on Atmospheric Sounding Data

D. V. Apraksin, I. V. Voronich

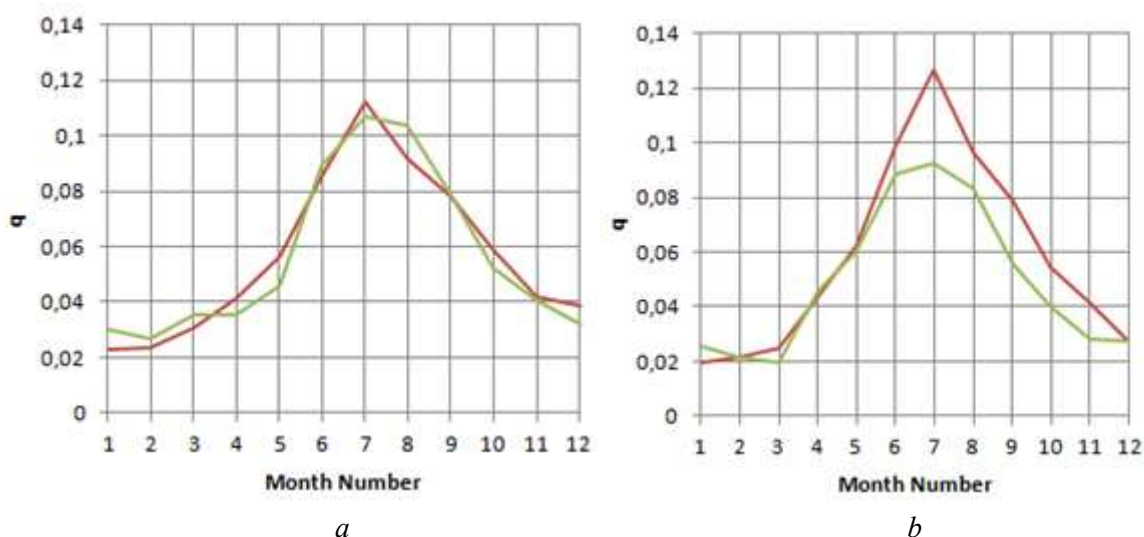
*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, 141701, Russia*

apraksin.dv@phystech.edu voronich.iv@mipt.ru

Abstract

The purpose of this work is to test the methodology for modeling the conditions of formation of aircraft condensation trails (ACT), taking into account its application to regional climatic conditions. Examples of the formation of ACT based on known data from flight experiments are analyzed. An analysis of the conditions for the formation of ACT in the 1970s and 2010s in the Omsk and Moscow regions is carried out using a quantitative criterion for the theoretically possible maximum supersaturation of water vapor in an aircraft engine jet. The characteristics of aircraft engines of the D-30 and CFM56 families, which were widely used during these periods, were used for the estimates. Using the regional data averaged over 3 years from radiosonde observations of the atmosphere, conclusions were drawn about climate changes and the difference in the conditions of formation of ACT in the Omsk and Moscow regions. To control the influence of aviation on the formation of cirrus clouds and the radiation balance of the atmosphere, an approach has been proposed to assess the conditions for the formation of ACT based on current atmospheric sounding data in the region.

Keywords: aircraft engine, axisymmetric nozzle, aircraft condensation trail, impact of aviation on the environment, heat transfer and jet gas dynamics.



Calculated distributions of specific humidity q [g/kg] for Moscow (a) and Omsk (b) regions in 1978–1980 (red line) and 2015–2017 (green line) at flight altitude of $H=10$ km

УДК 533.6, 629.7

Апробация методики моделирования условий образования конденсационных следов самолетов на основе данных зондирования атмосферы

Д. В. Апраксин, И. В. Воронич

*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Долгопрудный, 141701, Институтский переулок, д.9
apraksin.dv@phystech.edu voronich.iv@mipt.ru*

Аннотация

Целью данной работы является апробация методики моделирования условий образования конденсационных следов самолетов (КСС) с учетом ее применения к региональным климатическим условиям. Проанализированы примеры формирования КСС на основе известных данных летных экспериментов. Делается анализ условий формирования КСС в 1970-х и 2010-х годах в регионах Омск и Москва с помощью количественного критерия теоретически возможного максимального перенасыщения водяного пара в струе авиационного двигателя. Для оценок использованы характеристики авиационных двигателей семейств Д-30 и CFM56, которые массово использовались в эти периоды. С использованием осредненных за 3 года региональных данных радиозондовых наблюдений атмосферы сделаны выводы о климатических изменениях и различии условий образования КСС в регионах Омск и Москва. Для управления влиянием авиации на образование перистой облачности и радиационный баланс атмосферы предложен подход к оценке условий образования КСС на основе текущих данных зондирования атмосферы в регионе.

Ключевые слова: авиационный двигатель, осесимметричное сопло, конденсационный след самолета, влияние авиации на окружающую среду, теплообмен и газодинамика струи.

1. Введение

Эта работа является продолжением работы “О методике моделирования условий образования конденсационных следов самолетов”, опубликованной в настоящем журнале (Т. 26, вып. 3) [1].

Как известно, авиационные выбросы являются важным антропогенным источником загрязнений, которые попадают в верхнюю тропосферу и нижнюю стратосферу, в силу чего явление имеет глобальный характер и регулируется авиационными властями [2–4]. Помимо эмиссии парниковых газов (CO_2 , CH_4 , NO_x) и сажевых частиц, авиация напрямую влияет на образование перистых облаков верхнего яруса, инициируемое конденсационными следами самолетов (КСС), а также в некоторой степени на общую влажность атмосферы. Эти факторы достаточно важны при оценке изменения радиационного баланса Земли [5]. По разным оценкам, КСС в среднем покрывают не более 1 % поверхности Земли, но в регионах с интенсивным воздушным движением этот показатель может локально достигать ~ 10 % [6].

Очевидно, что локальные атмосферные условия определяют, образуется ли КСС, как долго он будет сохраняться и повлияет ли он на образование облачности верхнего яруса. В настоящей работе используется методика количественной оценки условий образования КСС, основанная на критерии максимального теоретически возможного перенасыщения водяного

пара в струе авиационного двигателя [1,7,8]. Исследование проводится с использованием наборов данных радиозондовых наблюдений за 1970-е (1978–1980) и 2010-е (2015–2017) годы на крейсерских высотах полета ($9 \div 11$ км) в регионах Омск и Москва [9], существенно различающихся по климату и являющихся авиационными узлами. Количественный анализ опирается на характеристики двигателя Д-30КУ/КП, применявшегося на самолетах ТУ-154/Ил-62/Ил-76 и двигателя CFM56-5, применяющегося на самолетах А319/А320/А321. Эти двигатели существенно отличаются степенью двухконтурности ($m = 2.5$ для Д-30КУ и $m = 5.5$ для CFM56) и аэротермодинамикой образования КСС.

Исследования высокой облачности показывают, что в ряде регионов покрытие облаками (и отдельно перистыми облаками) уменьшалось в период с конца 1970-х по 2010-е гг. [10, 11]. С точки зрения результатов настоящей работы это можно объяснить уменьшением годового временного «окна», в течение которого выполняется условие существования перистой облачности на этих высотах (относительная влажность не менее 100 % по отношению ко льду). В настоящей работе это подтверждается данными радиозондовых наблюдений, которые показывают заметное увеличение температуры и вытекающее отсюда снижение относительной влажности на крейсерских высотах полета самолетов. Одной из локальных причин этого явления, помимо глобального потепления, для региона Омск может выступать сокращение площади сибирских лесов [12, 13].

Целью данной работы является апробация методики моделирования условий образования КСС на основе известных данных. Особый акцент делается на применении методики к региональным условиям. Для управления влиянием авиации на образование перистой облачности и радиационный баланс атмосферы предложен подход к локальной оценке условий образования КСС на основе текущих данных зондирования атмосферы в вышеуказанных регионах.

2. Газодинамический анализ состояния струи Д-30КУ и CFM56-5B1

Для корректного анализа формирования полей удельной и относительной влажности струи турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) необходимо получить реалистическую газодинамическую картину течения с учетом формы сопла. Это связано также и с тем, что струи обладают небольшой степенью «нерасчетности» и нормализуются на расстоянии нескольких калибров от сопла, становясь изобарическими после небольшого изменения площади сечения струи. Для учета структуры потоков, сходящих с твердых поверхностей двигателя, расчетная область должна включать части внешней и внутренней поверхностей сопла и разделителя потоков, так что граница выхода из каждого контура углублена внутрь. Как показывает предыдущий анализ [1], размер расчетной области вниз по течению должен составлять ~ 100 калибров ($D_{свк}$), в радиальном направлении ~ 20 калибров. Осесимметричная расчетная область получается вращением вокруг оси двумерной области на угол периодичности. Настройка параметров расчетной сетки производится с учетом структуры и масштабов течения с соблюдением критериев ее качества: обеспечивается сгущение узлов к твердым стенкам и поперек слоев смешения, также скорость роста ячеек вниз по течению должна обеспечить правильное описание развития струи. Турбулентный пограничный слой на внешней и внутренней поверхностях сопла характеризуется значением числа Рейнольдса Re порядка 10^7 , отсюда следует оценка его толщины: $\delta_{тс} \sim LRe^{-0.2} = 1$ см, где $L \sim 1$ м – характерный масштаб длины. Толщина слоев смешения струи вблизи сопла определяется тем же масштабом. При этих условиях характерная размерность расчетной сетки для задачи в осесимметричной постановке составляет $0.5 \div 1$ млн. узлов. Схема течения в расчетной области и блочная структура расчетной сетки в плоскости симметрии, а также вид расчетной сетки в плоскости симметрии вблизи среза сопла представлены на рис. 1.

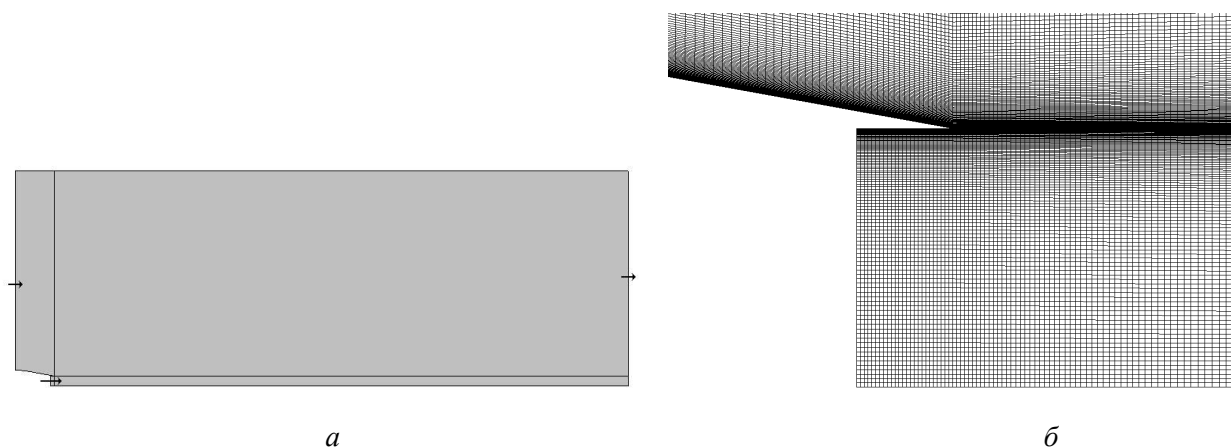


Рис. 1. Схема течения в расчетной области и блочная структура расчетной сетки в плоскости симметрии (а), вид расчетной сетки в плоскости симметрии вблизи среза сопла (б)

В качестве модели турбулентного течения принята система осредненных по Рейнольдсу или Фавру уравнений Навье – Стокса. Из нескольких известных двухпараметрических моделей турбулентности на основе результатов предварительных тестов была выбрана модель, работоспособная как в пограничном слое (с учетом особенностей вязкого подслоя и логарифмической области), так и в слое смешения – SST модель, комбинирующая преимущества $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ моделей [1].

Граничные условия для представленной на рис. 1 схемы течения должны обеспечивать фиксацию ключевых параметров течения и возможность получения корректного численного решения. На границе втекания спутного потока (граница слева) фиксируется направление потока по нормали к границе, полное давление, полная температура, параметры турбулентности, удельная влажность. На выходе каждого контура фиксируется направление потока по нормали к границе, расход массы, полная температура, параметры турбулентности, удельная влажность. На плоскостях симметрии используются условия симметрии (производные по нормали к поверхности от параметров потока равны нулю, условие непротекания). При изучении трехмерных эффектов, например, в закрученной струе, на этих плоскостях необходимо поставить условие вращательной периодичности. На твердых стенках сопла ставятся условия прилипания (обращение в нуль вектора скорости на стенке) с учетом разрешения вязкого подслоя сеткой и условия на теплообмен (например, задание нулевого теплового потока – адиабатическая стенка). На выходе расчетной области (граница справа) вниз по течению необходимо фиксировать среднее по границе статическое давление, равное атмосферному. На верхней границе расчетной области необходимо фиксировать статическое давление с экстраполяцией вектора скорости для обеспечения эжекции газа.

Начальные условия для расчета выбираются заданием двухслойной струи в спутном потоке с гладкими профилями радиальных распределений переменных. При таких начальных условиях формирование струи происходит существенно быстрее.

Численный метод, с помощью которого решается система уравнений, должен быть консервативным, не порождающим паразитных осцилляций переменных, а также достаточно точным и устойчивым. Этим критериям удовлетворяют конечно-объемные TVD схемы, использующие неявные методы интегрирования по времени первого или второго порядка точности. Для струйных неустановившихся течений на начальном этапе необходимо вести расчет с шагом по времени $\Delta t \sim 10^{-5}$ с, затем шаг может быть постепенно увеличен на порядок. Критерием установления решения является падение значений производных по времени от параметров поля течения, а также установление потока массы через расчетную область. При описанных условиях установление решения достигалось за $5000 \div 7000$ шагов.

На рис. 2 представлено сравнение осредненных параметров струи (способ их получения описан в [1]) для CFM56-5B1 и Д-30КУ: прямые смешения (а), распределения перенасыщения вдоль струи по воде и льду (б). На рис. 3 представлены характерные поля температуры и относительной влажности по воде.

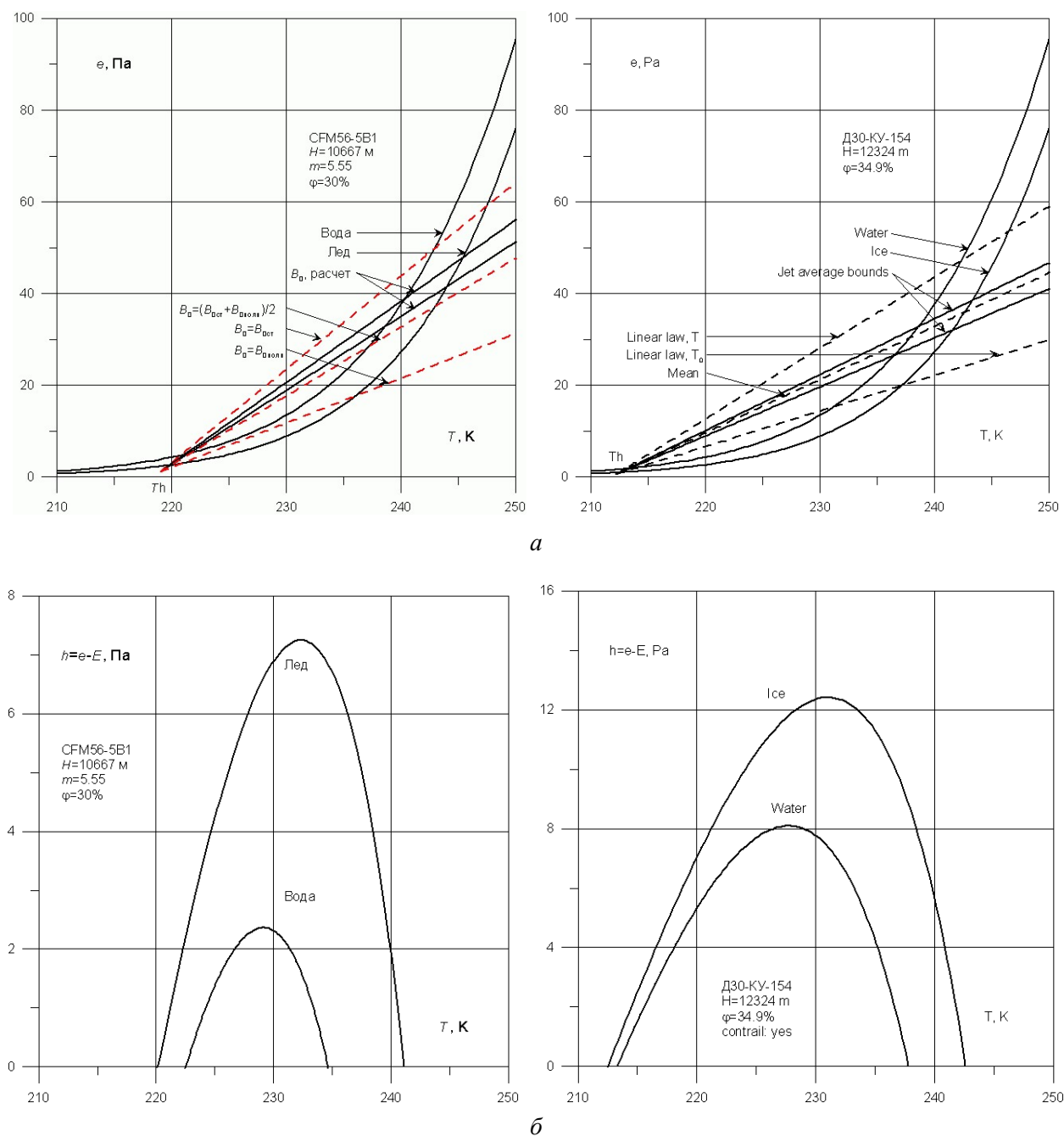
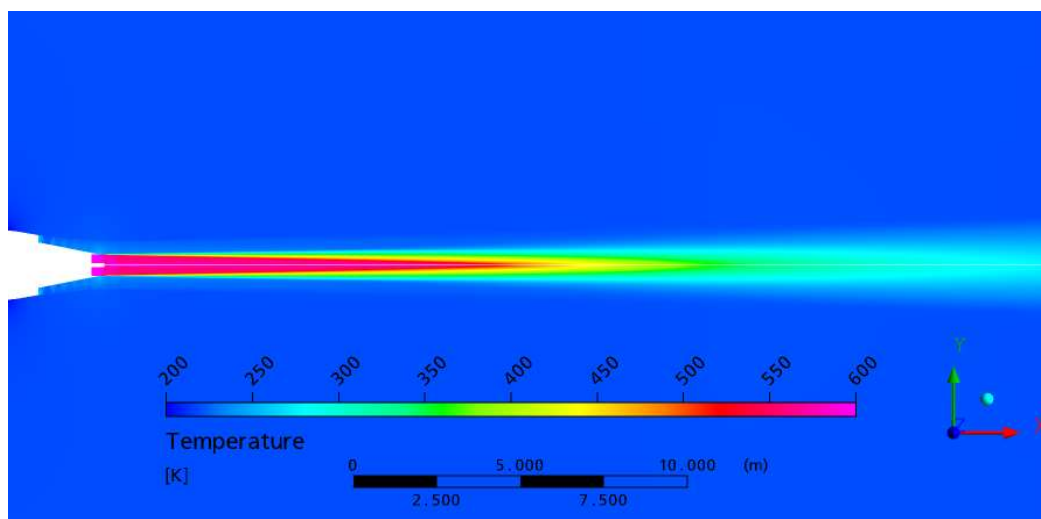
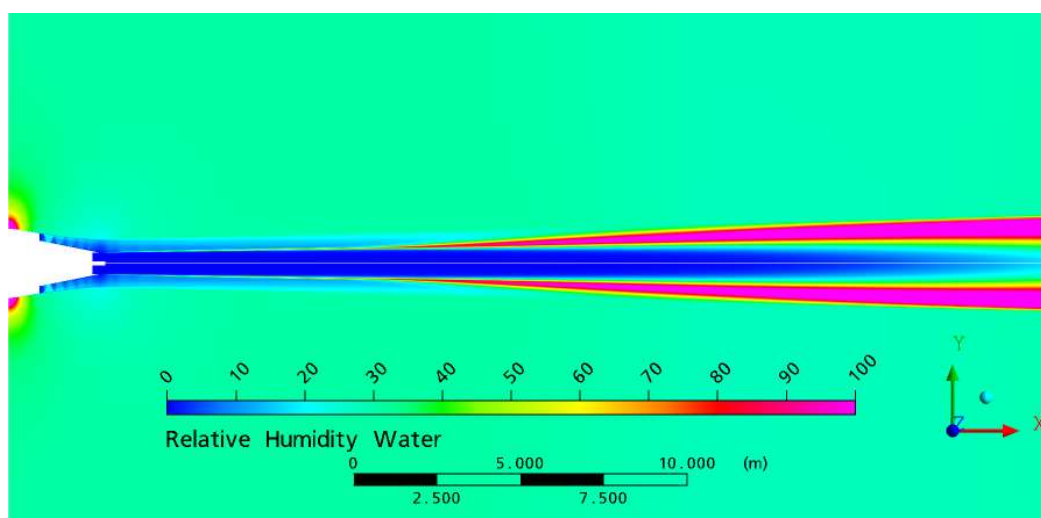


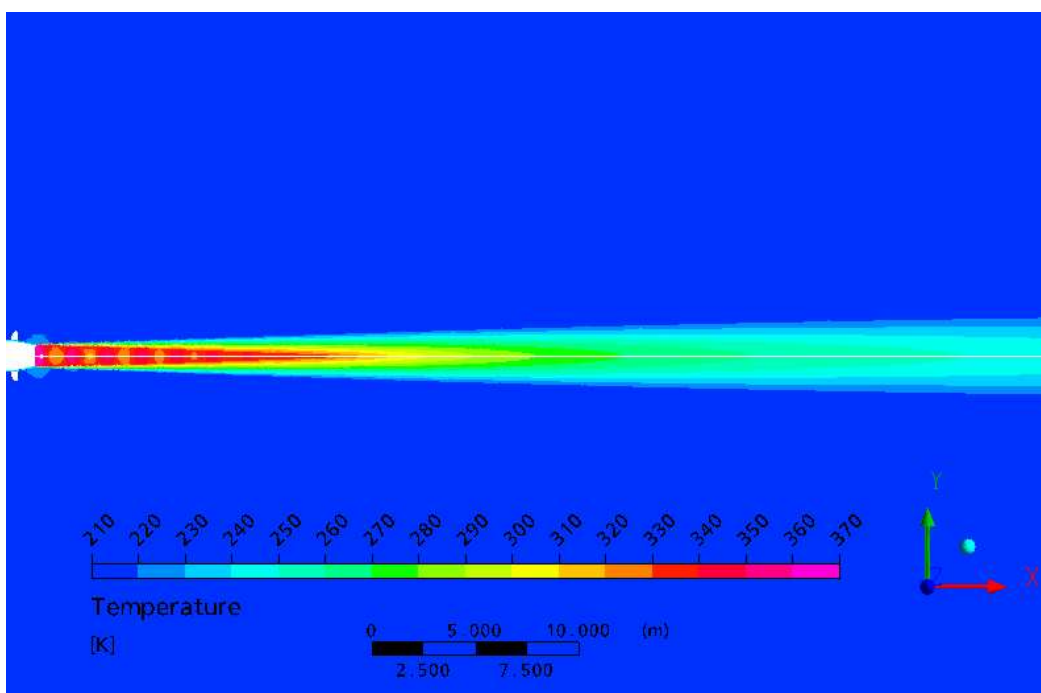
Рис. 2. Прямые смешения для двигателей CFM56-5 и Д-30КУ (а); распределения перенасыщения для двигателей CFM56-5 и Д-30КУ (б), где: H – высота полета (м); h – перенасыщение водяного пара в струе над водой и льдом (Па); e – среднее парциальное давление паров воды (Па); E – давление насыщенных паров над водой (Па); T – средняя температура атмосферного воздуха (К); φ – относительная влажность паров над льдом и водой (%); T_h – температура наружного воздуха (К); m – степень двухконтурности авиационного двигателя; T, T_0 (Linear, Mean) – линейные и среднее распределения полной и статической температуры струи для линий смешения в координатах « $T - e(T)$ »



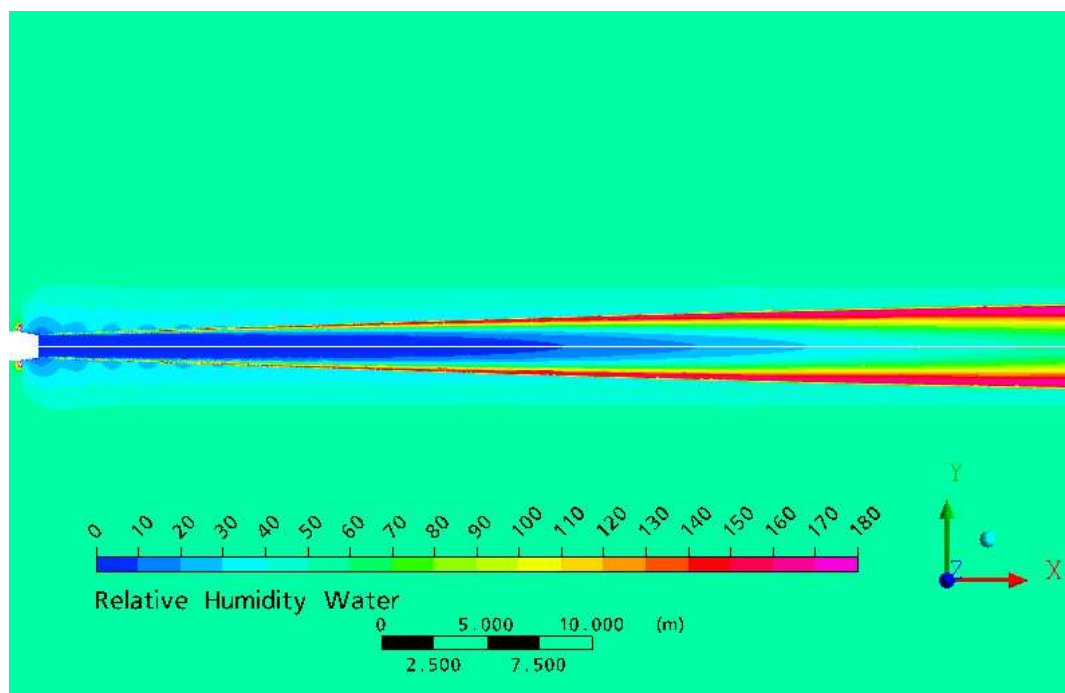
a



б



в



2

Рис. 3. Поле статической температуры для CFM56-5B1 (а); поле относительной над водой влажности для CFM56-5B1 (б); поле статической температуры для Д-30КУ (в); поле относительной над водой влажности для Д-30КУ (г)

3. Методика оценки образования КСС на основе критерия h_m

Для построения критерия образования КСС рассматривается количественный показатель теоретически возможного перенасыщения водяного пара в струе авиационного двигателя. Такого рода показатели получаются на основе различных моделей смешения струи с атмосферой [14, 15]. В настоящей работе критерий опирается на моделирование струй авиационных двигателей и обоснован экспериментально [7, 8].

Образование КСС определяется аэротермодинамикой струи для конкретного типа воздушного судна при температуре наружного воздуха t_H на высоте H . При наличии условий образования КСС длительность его существования определяется главным образом относительной влажностью атмосферы φ [%] [16]. В связи с этим влияние регионального климата приобретает существенную роль.

В рассматриваемой модели используются параметры: t_H, P_H – температура и давление наружного воздуха; t_j и q_j – температура и удельная влажность струи. t_j является средней величиной по сечению струи вблизи сопла и зависит от типа двигателя, коэффициента двухконтурности и высоты полета H ; q_j – удельная средняя влажность выхлопной струи вблизи сопла. Последняя величина в соответствии с правилами ИКАО табулируется производителями двигателей [4]. Центральное место в модели занимает параметр [7, 8]

$$B_0 = \frac{1.61 P_H q_j}{t_j - t_H}, \quad (1)$$

который представляет скорость изменения среднего (по площади поперечного сечения струи) парциального давления пара как функции средней температуры струи по мере ее развития в сухой атмосфере. B_0 зависит от типа и режима работы двигателя и от высоты полета, для большинства двигателей на крейсерском режиме полета лежит в пределах от 1 до 2, что подтверждается моделированием струй [1, 7]. После анализа характеристик двигателей Д-30КУ и CFM56-5B1 значения B_0 были приняты от 1.75 до 1.25 для высот от 9 до 11 км.

На основе B_0 вводится количественный показатель h_m , который представляет собой максимальную разницу между парциальным давлением пара в струе $e(T)$ при ее смещении с сухой атмосферой и давлением насыщенного пара $E_s(T)$ при температуре струи t_m

$$h_m = e(t_m) - E_s(t_m) = B_0(t_m - t_H) - E_s(t_m) \quad (2)$$

Давление насыщенного пара E_s при температуре t [°C] определяется в виде формул Магнуса [17]

$$E_s = E_0 e^{at/t+b} \quad (3)$$

Для воды $E_0 = 610.94$ [Па], $a = 17.625$, $b = 243.04$ [°C]; для льда $E_0 = 611.21$ [Па], $a = 22.587$, $b = 273.86$ [°C]. Температура t_m , при которой достигается максимум h_m , находится из условия экстремума функции $h(t)$

$$E_s(t) = \frac{B_0(t+b)^2}{ab} \rightarrow t = t_m \quad (4)$$

Если $h_m > +\delta$, считаем, что КСС однозначно образуется; если $h_m < -\delta$, однозначно нет. Если h_m лежит в интервале $[-\delta, +\delta]$, необходимо учесть влажность атмосферы для более точной оценки. Здесь δ выступает в качестве меры неопределенности и обычно принимается равным $3 \div 5$ Па.

На основе этой простой количественной модели, полученной в результате детальных расчетов струй авиационных двигателей, может быть построена прогнозная модель, которая учитывает атмосферные условия в регионе, информацию о характеристиках выхлопных струй авиационных двигателей с различной степенью двухконтурности, диапазон значений B_0 , и на выходе дает количественный показатель максимально возможного перенасыщения h_Σ во влажной атмосфере для определения локальных условий образования КСС

4. Валидация методики по данным летных исследований

Для надежной оценки условий формирования КСС и индуцированной ими перистой облачности, а также оценки длительности их существования необходимо учитывать влажность атмосферы. Для валидации методики ранее проводилось определение границ образования КСС для конкретных типов самолетов [8]. Было доказано, что «линия смещения» в координатах $T - e(T)$ выхлопной струи в атмосфере является практически прямой линией. В качестве количественного критерия для формирования КСС используется теоретически максимально возможное перенасыщение h_Σ во влажной атмосфере (здесь $e_H = \varphi E_s(t_H)/100$ – парциальное давление пара в атмосфере)

$$h_\Sigma = h_m + e_H \quad (5)$$

Работа [8] на основе анализа летных испытаний (ЛИ) на летающей лаборатории (ЛЛ) и натурных наблюдений полетов ВС демонстрирует, что расчетные значения высоты образования КСС H_{bcalc} для конкретных самолетов (Ту-154М, В777, В747, В767, В757, В737, А310, А330, А319, А320, А321, А340) при стандартной температуре МСА t_{ISA} и «условно стандартной» относительной влажности $\varphi = 60\%$ практически соответствуют экспериментальным значениям H_{bexp} . На рис. 4 и в табл. 1 в краткой форме представлен большой объем результатов валидации методики. Видно, что для $H = 9 \div 11$ км критерий $h_\Sigma > 3 \div 5$ Па может быть использован для идентификации стабильного КСС.

Приведенные данные также показывают, что образование устойчивых КСС происходит на высоте полета выше 9 км. В этой связи в настоящей работе рассмотрены данные зондирования атмосферы для высот 9, 10, 11 км.

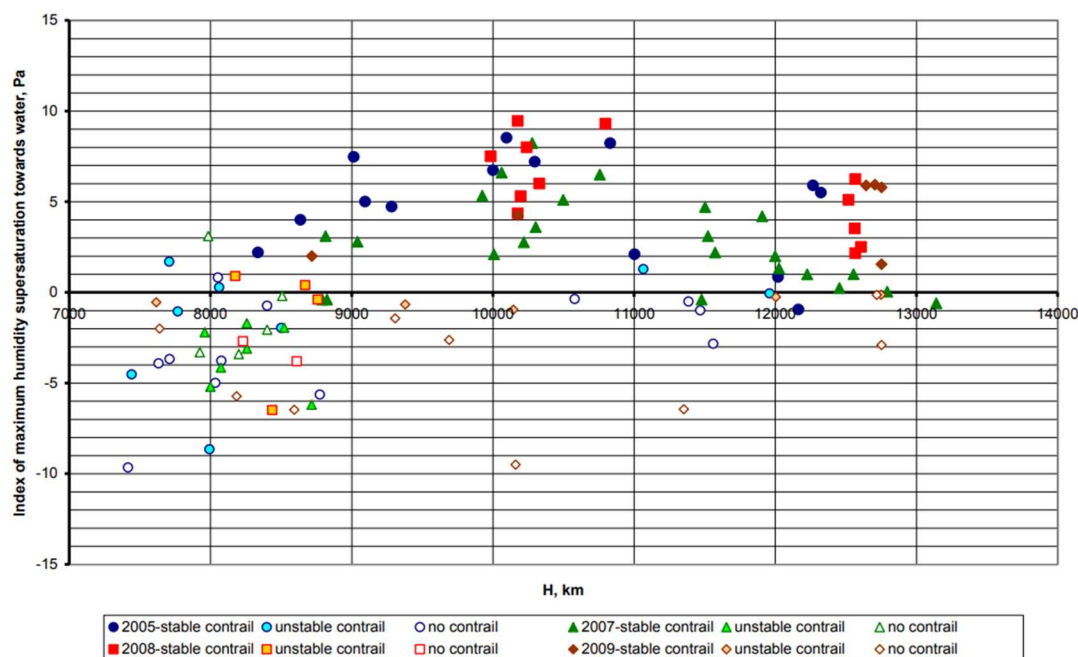


Рис. 4. Критерий перенасыщения h_{Σ} [Па] для Ту-154М ЛЛ с двигателями Д-30КУ

Таблица 1

Значения H_{bcalc} и H_{bexp} , полученные для $t_H = t_{ISA}$ и $\varphi = 60\%$ [8]

Самолет	Марка авиадвигателя	H_{bcalc} , км	H_{bexp} , км
Ту-154	Д-30КУ	10.125	10.2
Як-42	Д-36	9.6	9.35
B777	GE90-94B	9.175	9.1
B747	PW4054	9.385	9.5
B747	RB211-524G/H	9.84	9.7
B 767	PW4056	9.385	9.15
B757	RB211-524G/H	9.84	9.35
A310. 330	CF680	9.45	9.35
B737	CFM56-5B1	9.45	9.85
A319	CFM56-5B1	9.45	9.63
A320	CFM56-5B1	9.45	9.65

5. Применение методики к условиям регионов Омск и Москва

Ниже рассмотрены данные зондирования атмосферы в 1970-х и 2010-х годах в регионах Омск и Москва. Данные радиозондовых наблюдений атмосферы обрабатывались для исключения явных выбросов и усреднялись в пределах месяца для смягчения влияния ежедневных колебаний и в течение 3 лет для смягчения влияния колебаний между годами [18].

Для иллюстрации изменений климата на рис. 5 приведены помесечные распределения температуры t_H [°C] и удельной влажности атмосферы q_H [г/кг] для регионов Москва (а) и Омск (б) в периоды 1978–1980 (красная линия) и 2015–2017 (зеленая линия) на высоте

$H = 10$ км. Из этих данных очевиден факт увеличения температуры (в Москве в течение всего года, в Омске в первой половине года), т.е. потепления климата. Следствием этого является уменьшение относительной влажности, которое здесь не приведено для сокращения изложения. При анализе климатических изменений не менее важен вопрос об изменении количества пара в атмосфере, поэтому на рис. 5 приведены распределения удельной влажности q_H , вычисленные на основе измеренных значений ϕ_H, t_H и P_H . Для Москвы она ожидаемо не изменилась, тогда как для Омска во второй половине года видно значимое уменьшение. В силу описанных особенностей изменение климатических условий в Омске требует более обширного анализа, выходящего за рамки настоящей работы.

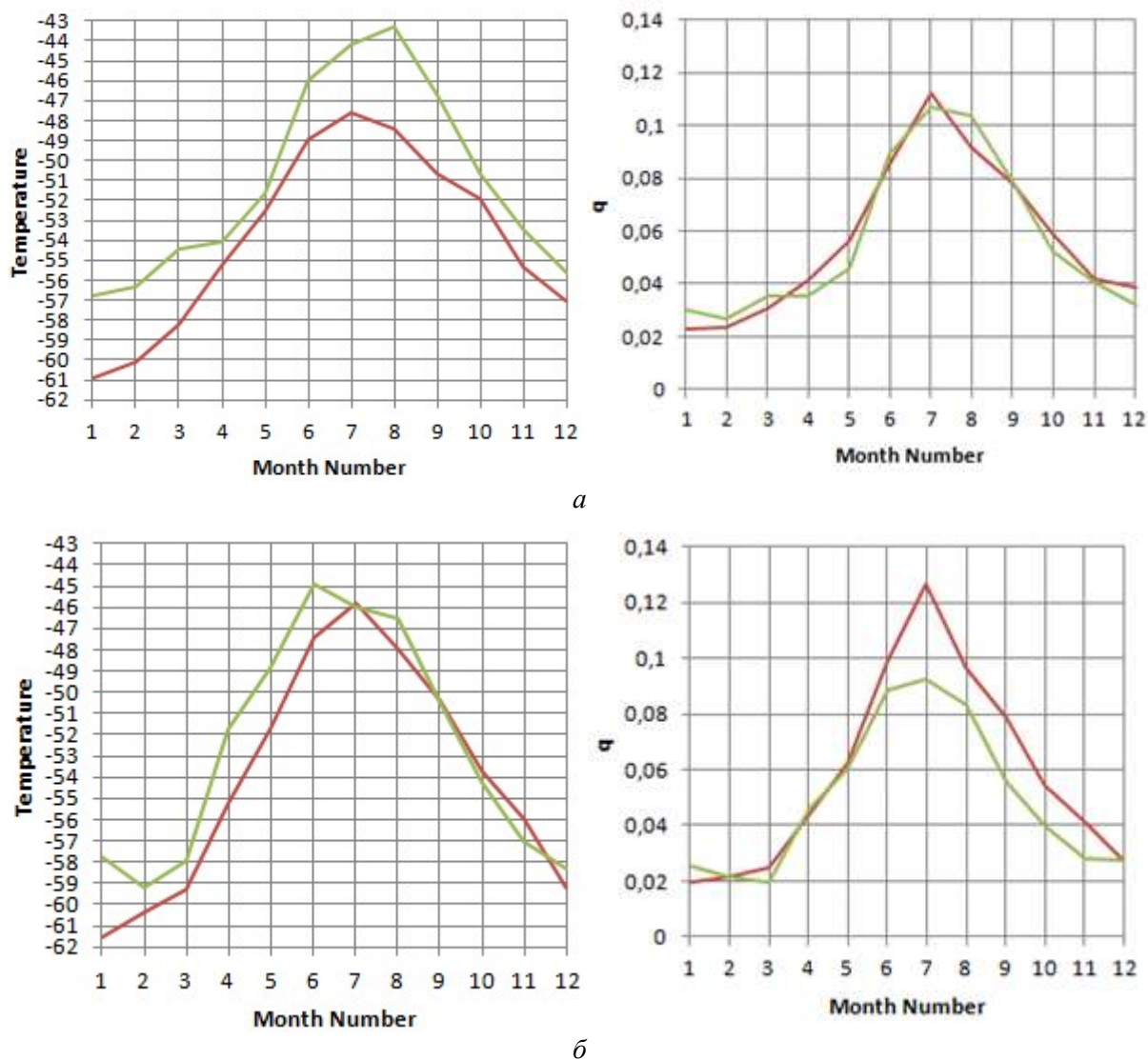


Рис. 5. Измеренное распределение температуры t_H [°C] и рассчитанное распределение удельной влажности q [г/кг] для регионов Москва (а) и Омск (б) в 1978–1980 гг. (красная линия) и 2015–2017 гг. (зеленая линия) на высоте $H = 10$ км

Расчет h_Σ при анализе условий образования КСС ведется по отношению к состоянию насыщения водяного пара над поверхностью воды, так как механизм конденсации обязательно включает образование жидких капель в выхлопной струе. Анализ основан на характеристиках авиационных двигателей Д-30КУ и CFM56-5, которые массово использовались в эти периоды. На рис. 6 и 7 приведены результаты расчетов h_Σ на высотах $H = 9$ и 11 км для регионов Омск и Москва соответственно. Обсуждение этих результатов приведено в следующем разделе.

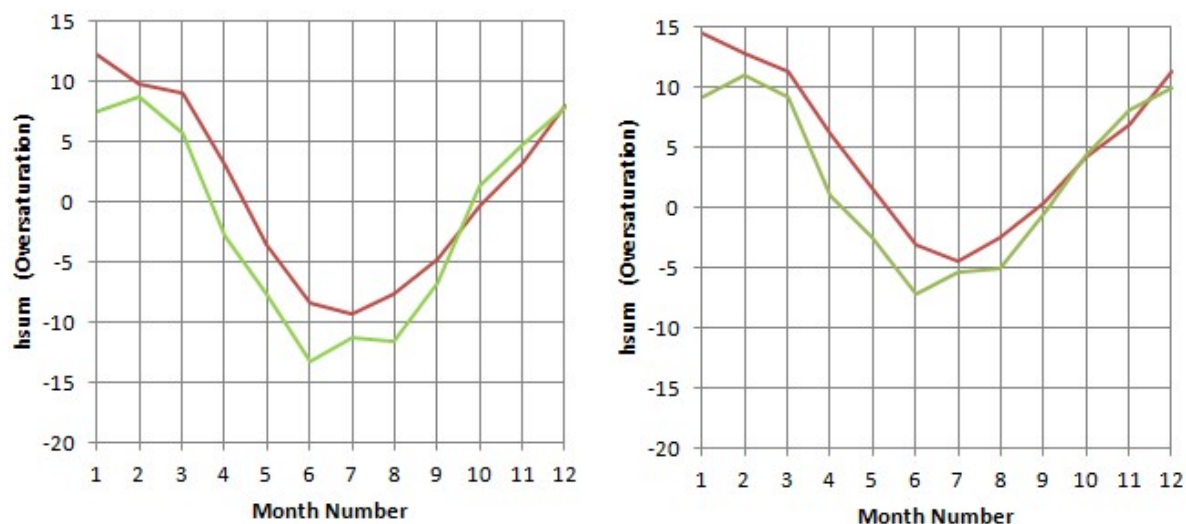


Рис. 6. Рассчитанные распределения h_{Σ} в 1978–1980 гг. (красная линия) и 2015–2017 гг. (зеленая линия) в регионе Омск на высотах $H=9$ км (слева) и 11 км (справа)

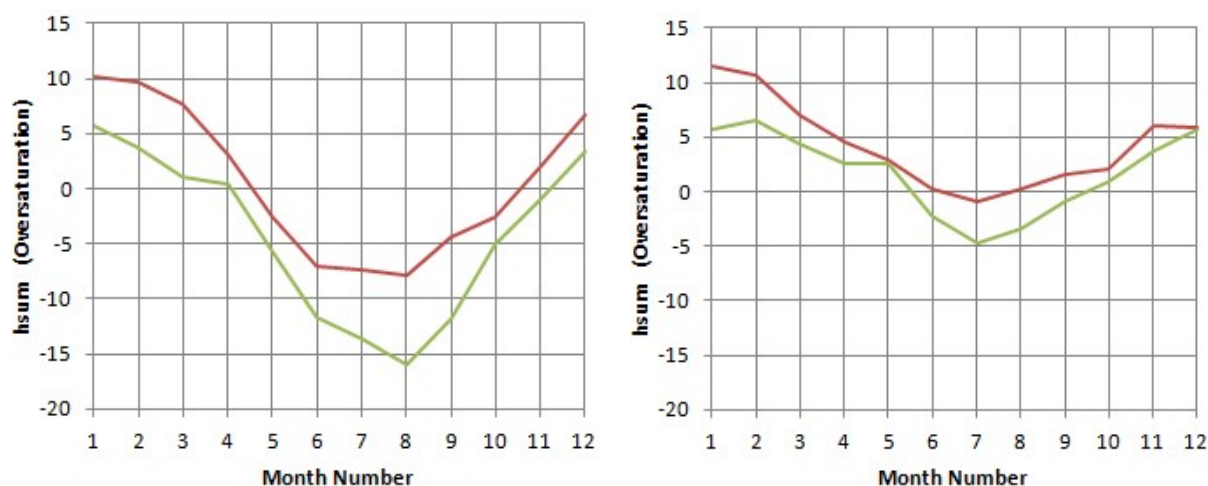


Рис. 7. Рассчитанные распределения h_{Σ} в 1978–1980 гг. (красная линия) и 2015–2017 гг. (зеленая линия) в регионе Москва на высотах $H=9$ км (слева) и 11 км (справа)

Условия получения данных для кривых на рис. 2 были подробно описаны ранее [1]. Для получения распределений температуры, удельной влажности и количественного показателя теоретически максимально возможного перенасыщения во влажной атмосфере на рис. 5–7 были использованы реальные данные летних исследований и экспериментов, а именно, данные высотного радиозондирования атмосферы для регионов Москва и Омск, для высот полета $9 \div 11$ км, для временных периодов 1978–1980 и 2015–2017 гг.

Все распределения были посчитаны лично авторами и получены собственноручно в программе Microsoft Excel с использованием данных высотного радиозондирования атмосферы для регионов Москва и Омск, для высот и временных периодов, указанных выше, атмосферные данные для которых, в свою очередь, были получены из источника [9].

6. Обсуждение результатов

Полученные результаты на основе обработки данных зондирования атмосферы в регионах Омск и Москва дают возможность отметить следующее. В обоих регионах проявляется эффект глобального потепления между 1978–1980 гг. и 2015–2017 гг. Этот фактор в основном определяет снижение относительной влажности атмосферы за счет роста температуры.

Снижение относительной влажности на $\sim 10\%$ обуславливает сокращение временных периодов, в течение которых возможно существование перистых облаков. Количество пара в атмосфере, локально характеризуемое удельной влажностью, оказалось менее подверженным климатическим изменениям. При этом выявилась разница – в регионе Москва значимых изменений удельной влажности практически не произошло, тогда, как в регионе Омск произошло снижение во второй половине года. Этот момент требует более глубокого анализа климатических изменений. Пиковые значения удельной влажности в обоих регионах наблюдаются в июле, минимальные в январе, как и для относительной влажности. В настоящей работе данные радиозондовых наблюдений усреднены также по времени суток, хотя имеется существенная разница между ночными и дневными условиями, которая может учитываться при планировании полетов при использовании локальных текущих данных.

На крейсерских высотах $H = 9, 10$ и 11 км с 1978–1980 гг. по 2015–2017 гг. также заметно изменились условия образования устойчивых КСС в сторону сокращения периода существования благоприятных атмосферных условий. Тем не менее, в регионе Омск по-прежнему с ноября по март-апрель устойчивые КСС могут образовываться и приводить к инициированию перистой облачности. В регионе Москва этот период сократился до зимних месяцев.

Учет представленных региональных особенностей может помочь снизить негативное влияние авиации на окружающую среду при интеллектуальном планировании полетов [8, 19, 20].

7. Заключение

Представленный анализ показывает заметное (на $2 \div 3^\circ\text{C}$) потепление верхней тропосферы между 1978–1980 гг. и 2015–2017 гг. в регионах Омск и Москва. Этот фактор определяет существенное снижение относительной влажности атмосферы (на $\sim 10\%$) и сокращение периодов, в течение которых возможно существование перистых облаков и образование устойчивых КСС. Разница в результатах исследования для регионов Омск и Москва частично объясняется различием климатических зон – умеренно континентальным климатом Москвы и резко континентальным климатом Омска.

Показана возможность использования осредненных данных радиозондовых наблюдений в регионе для определения условий образования устойчивых КСС. Методика расчета условий образования КСС использует количественный критерий теоретически возможного максимального перенасыщения водяного пара в струе авиационного двигателя h_Σ . Данные измерений φ_H, t_H и P_H могут использоваться также и в оперативном режиме для планирования полетов (для выбора времени суток и высоты полета).

Роль авиации при выяснении вопроса образования устойчивых КСС и инициирования ими перистой облачности в регионе должна также уточняться с помощью данных гиперспектральных наблюдений атмосферы с искусственных спутников Земли [10, 15, 19, 20].

Литература

1. Апраксин Д. В. О методике моделирования условий образования конденсационных следов самолетов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Т.26, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2025-26-3/articles/1183/>
2. Иванова А. Р. Влияние авиации на окружающую среду и меры по ослаблению негативного воздействия // Труды Гидрометцентра России. 2017, вып. 365. С. 5–14.
3. Приложение 16 к Конвенции о Международной гражданской авиации // Охрана окружающей среды // Эмиссия авиационных двигателей. ИКАО. 2023. Т. 2, вып. 5.

4. ICAO Engine Exhaust Emissions Databank // ICAO Doc. № 9646-AN/943. First Edition. 1995. (Implementation of Issue №30, 23 July 2023).
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
5. Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M. R., Burkhardt U., Chen Q. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018 // *Atmos. Environ.* 2021. Vol. 1, 244 p.
6. Dischl R., Kaufmann S., Voigt C. Regional and Seasonal Dependence of the Potential Contrail Cover and the Potential Contrail Cirrus Cover over Europe // *Aerospace*. 2022. Vol. 9, 485 p.
7. Dedesh V. T., Grigoriev M. A., Zamyatin A. N., Zhelannikov A. I. Calculation assessment of formation, existence and destruction of aircraft condensation trails with account of interaction with wake vortices // *Int. Conference on Environmental Science and Biological Engineering (ESBE)*. 2014. Beijing. Pp. 17–23.
8. Vid V. I., Dedesh V. T., Kiose S. N., et al. Ecological Optimization of Jet Aircraft Flights in View of Contrails and Contrails Cirrus formation // *ICASE Paper 2014_0400*.
9. Weather Maps and Soundings // University of Wyoming, College of Engineering, Department of Atmospheric Science. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
10. Meyer R., Mannstein H., Meerkötter R., Wendling P. Contrail and Cirrus Observations over Europe from 6 Years of NOAA-AVHRR Data // *Scientific conference paper*. 2002.
<https://elib.dlr.de/9809/1/Meyer2002c.pdf>
11. Sfîcă L., Beck C., Nita A.I., Voiculescu M., Birsan M.V., Philipp A. Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades // *Int. J. Climatology* №41 (Suppl. 1). 2021. Pp. 2211–2230.
12. Chernokulsky A., Mokhov I., and Nikitina N. Winter cloudiness variability over Northern Eurasia related to the Siberian High during 1966–2010 // *Environmental research letters*. 2013. Vol. 8. № 4. Pp. 12–45.
13. Schneider E., Czech H., Popovicheva O., et al. Mass spectrometric analysis of unprecedented high levels of carbonaceous aerosol particles long-range transported from wildfires in the Siberian Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2024. № 24. Pp. 553–576.
14. Саенко А. Г. Прозрачность конденсационных следов и перистых облаков: ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Санкт-Петербург, Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, 2006.
15. Schumann U. Formation, properties and climatic effects of contrails // *Comptes Rendus. Physique*. 2005. Vol. 6. № 4–5. Pp. 549–565.
16. Schumann U. A Contrail Cirrus Prediction Model // *Geoscientific Model Development*. 2012. Vol. 5. № 3. Pp. 543–580.
17. Huang J. A Simple Accurate Formula for Calculating Saturation Vapor Pressure of Water and Ice // *J. Applied Meteorology and Climatology*. 2018. Vol. 57. № 6. Pp. 1265–1272.
18. Алдухов О. А., Черных И. В. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. 2013. Т.1. Обнинск.
19. Noppel F., Singh R. Overview on Contrail and Cirrus Cloud Avoidance Technology // *Journal of Aircraft*. 2007. Vol. 44. № 5. Pp. 1721–1726.
20. Дедеш В. Т., Кiose С. Н., Вид В. И., Кагарманов Р. Л., Воронич И. В., Павлова Э. Г., Тенишев Р. Х., Румянцева Г. П., Степанова С. Ю. Патент RU 2532995 С1 от 20.11.2014. Правообладатель ЛИИ им. М.М. Громова.

References

1. Apraksin D. V., On the methodology of modeling the conditions of formation of condensation trails of aircraft, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2025, Vol. 26, issue 3 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2025-26-3/articles/1183/>
2. Ivanova A. R., The impact of aviation on the environment and measures to mitigate the negative impact, *Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia*, 2017, no. 365, pp. 5–14 [in Russian].
3. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, *Environmental protection, Aircraft Engine Emissions*, ICAO, 2023, vol. 2, no. 5 [in Russian].
4. ICAO Engine Exhaust Emissions Databank, ICAO Doc. № 9646-AN/943, First Edition, 1995, (Implementation of Issue №30, 23 July 2023), <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>
5. Lee D. S., Fahey D. W., Skowron A., Allen M. R., Burkhardt U., Chen Q., et al., The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018, *Atmos. Environ*, 2021, vol. 1, 244 p.
6. Dischl R., Kaufmann S., Voigt C., Regional and Seasonal Dependence of the Potential Contrail Cover and the Potential Contrail Cirrus Cover over Europe, *Aerospace*, 2022, vol. 9, 485 p.
7. Dedesh V. T., Grigoriev M. A., Zamyatin A. N., Zhelannikov A. I., Calculation assessment of formation, existence and destruction of aircraft condensation trails with account of interaction with wake vortices, *Int. Conference on Environmental Science and Biological Engineering (ESBE)*, 2014, Beijing, pp. 17–23.
8. Vid V. I., Dedesh V. T., Kiose S. N., et al., Ecological Optimization of Jet Aircraft Flights in View of Contrails and Contrails Cirrus formation, ICASE Paper 2014_0400.
9. *Weather Maps and Soundings*, University of Wyoming, College of Engineering, Department of Atmospheric Science. <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
10. Meyer R., Mannstein H., Meerkötter R., Wendling P., Contrail and Cirrus Observations over Europe from 6 Years of NOAA-AVHRR Data, *Scientific conference paper*, 2002. <https://elib.dlr.de/9809/1/Meyer2002c.pdf>
11. Sfiică L., Beck C., Nita A.I., Voiculescu M., Birsan M. V., Philipp A., Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades, *Int. J. Climatology no. 41 (Suppl. 1)*, 2021, pp. 2211–2230.
12. Chernokulsky A., Mokhov I. and Nikitina N., Winter cloudiness variability over Northern Eurasia related to the Siberian High during 1966–2010, *Environmental research letters*, 2013, vol. 8, no. 4, pp. 12–45.
13. Schneider E., Czech H., Popovicheva O., et al., Mass spectrometric analysis of unprecedented high levels of carbonaceous aerosol particles long-range transported from wildfires in the Siberian Arctic, *Atmos. Chem. Phys.*, 2024, no. 24, pp. 553–576.
14. Saenko A. G., *Transparency of condensation trails and cirrus clouds*. Ph. Doctor's thesis, St. Petersburg, Russian State Hydrometeorological University, 2006 [in Russian].
15. Schumann U., Formation, properties and climatic effects of contrails, *Comptes Rendus. Physique*, 2005, vol. 6, no. 4–5, pp. 549–565.
16. Schumann U., A Contrail Cirrus Prediction Model, *Geoscientific Model Development*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 543–580. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-543-2012>
17. Huang J., A Simple Accurate Formula for Calculating Saturation Vapor Pressure of Water and Ice, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2018, vol. 57, no. 6, pp. 1265–1272. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0334.1>
18. Aldukhov O. A., Chernykh I. V., Methods of analysis and interpretation of atmospheric radiosonde data, 2013, vol. 1, Obninsk [in Russian].
19. Noppel F., Singh R., Overview on Contrail and Cirrus Cloud Avoidance Technology, *Journal of Aircraft*, 2007, vol. 44, no. 5, pp. 1721–1726. DOI: 10.2514/1.28655

20. Dedesh V. T., Kiose S. N., Vid V. I., Kagarmanov R. L., Voronich I. V., Pavlova E. G., Tenishev R. H., Rumyantseva G. P., Stepanova S. Y., Patent RU 2532995 C1 dated 11/20/2014, The copyright holder is OJSC "LII named after M.M. Gromov".

Статья поступила в редакцию 16 июля 2025 г.