

*А.И. Рыженко д-р техн. наук, профессор, НАКУ «ХАИ»,
Е.Ю. Бетина преподаватель, УГЗУ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСШТАБОВ ПОДОБИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ ПОЛЁТА НАТУРНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ЗОНЕ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

(представлено д-ром техн. наук В.М. Комяк)

Разработан теоретический аппарат определения основных масштабов и высот подобия для моделирования на полигоне в стандартных условиях с помощью экспериментального воздушного судна полёта натурального летательного аппарата в зоне лесного пожара.

Ключевые слова: масштабы подобия, экспериментальное воздушное судно, лесной пожар.

Постановка проблемы. Одними из зон с усложнёнными природно-климатическими условиями, в которых часто возникает необходимость в использовании авиационной техники, являются зоны лесных пожаров.

Лесной пожар оказывает заметное влияние на пограничный слой атмосферы, вызывая усиление вертикальной и горизонтальной составляющих скорости воздушного потока, создавая значительные перепады температуры воздуха и зоны повышенной турбулентности. В связи с этим существующие инструкции разрешают выполнять полёты над очагами пожаров на самолёте не ниже 200 м над кронами деревьев, а на вертолёте – не ниже 100 м. Однако, как показали испытания специально оборудованного для тушения лесных пожаров гидросамолёта Ан-2, полёты необходимо выполнять на значительно меньших высотах и как можно ближе к очагу пожара. Только при этих условиях операция по тушению пожара приносит желаемых эффект [3].

Очевидно, что в столь опасных условиях рациональным является максимально возможное использование беспилотной техники. При тушении лесного пожара беспилотные самолёты (БС) могут быть использованы для разведки контуров пожара, для проведения научно-исследовательских работ и для тушения пожаров, если будет доказана экономическая эффективность создания БС достаточной грузоподъёмности.

Так как в зоне пожара наблюдается заметное увеличение скорости ветра и атмосферной турбулентности, то возрастает вероятность выхода летательных аппаратов (ЛА) на критические и закрити-

ческие углы атаки, приводящие к сваливанию и штопору. Наиболее эффективным методом исследования режимов сваливания и штопора является их моделирование с помощью экспериментального воздушного судна (ЭВС).

Летные исследования сваливания и штопора на динамически подобных ЭВС позволяют определить характеристики сваливания и штопора ЛА, выявить наиболее характерные признаки скорого их начала, провести настройку системы сигнализации без завышения гарантийных запасов по углу атаки и индикаторной скорости. Для беспилотного летательного аппарата (БЛА) - разработать эффективные приемы дистанционного и автономного управления, предотвращающие развитие аварийной ситуации, провести отработку САУ в полете и обеспечить подготовку операторов по действию в критическом режиме полета. Для пилотируемого – выработать методики вывода ЛА на основании правильных действий летчика [4].

Но существующая методика создания динамически подобных ЭВС и проведения на них лётных исследований была разработана для случая, когда полёты натурного ЛА и его ЭВС происходят в условиях стандартной атмосферы, или в условиях, приводимых к стандартным известными методами [5].

Моделирование динамики полёта ЛА, предназначенного для эксплуатации в зонах лесных пожаров, с помощью ЭВС на полигоне вне зоны пожара с использованием существующей методики некорректно.

Анализ последних достижений и публикаций. К сожалению, в известной нам литературе отсутствуют подробные статистические данные о составе газовой смеси над зонами лесных пожаров различных типов, так же как и обоснованная осреднённая модель атмосферы в зоне лесного пожара.

Основным препятствием для создания такой модели является большое разнообразие лесных горючих материалов (ЛГМ). Характеристики газовой смеси над зоной пожара зависят от видового состава лесной растительности, от количества представителей того или иного вида, от влажности ЛГМ, что в свою очередь зависит от климатических и метеорологических условий конкретного района, и от многих других факторов. Отсутствие исчерпывающей информации о составе воздуха над пожарами, несомненно, обусловлено как большим разнообразием лесных пожаров, так и сложностью сбора статистических данных в естественных условиях. А с помощью экспериментальных исследований можно проследить только общие тенденции развития пожаров: зависимость скорости распространения пожара от влажности ЛГМ, от наклона подстилающей поверхности и др., так как пол-

ное физическое моделирование лесных пожаров невозможно без полного совпадения характеристик природы и модели [1].

В литературе по вопросам лесной пирологии представлены описания различных попыток исследования характеристик атмосферы в зонах лесных пожаров, как на натуральных пожарах, так и экспериментально. Наиболее полное описание процессов, происходящих в зоне пожара, представлено в работах учёных Томского государственного университета.

Согласно [1], газовая фаза в зоне лесного пожара состоит из O_2 , N_2 , CO , CH_4 , H_2 , CO_2 , H_2O , C_2H_4 . Но в [1,2,6] для упрощения расчётов рекомендуется принять допущение о том, что газовая фаза состоит из кислорода, летучих горючих продуктов пиролиза, продуктов реакции горения летучих горючих продуктов пиролиза (CO_2) и инертных компонентов газовой фазы. Причём летучие горючие продукты пиролиза считаются одним эффективным газом типа CO , а инертные компоненты газовой фазы – газом типа N_2 .

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является разработка теоретического аппарата определения основных масштабов и высот подобию для моделирования на полигоне в условиях СА с помощью ЭВС полёта натурального ЛА в зоне лесного пожара.

Как уже отмечалось ранее, течение воздуха в зоне пожара является турбулентным. Но при определении масштабов подобию турбулентностью пренебрегаем так как, скорость случайных порывов ветра много меньше собственной скорости ЛА. Для расчёта основных масштабов подобию используем соотношения из [5], записанные без учёта турбулентности.

Для определения масштабов и высот подобию по соотношениям из [5] необходимо знать характеристики воздуха в зоне лесного пожара. Как уже отмечалось выше, воздух в зоне пожара существенно отличается от атмосферного. Согласно рекомендациям в [1,2,6] представляем воздух в зоне лесного пожара как смесь четырёх основных газов: кислорода (O_2), азота (N_2), оксида и диоксида углерода (CO и CO_2).

Относительная массовая концентрация компонентов газовой фазы задаётся соотношением

$$\varphi_i = \frac{\rho_i}{\rho_{см}}, \quad (1)$$

где ρ_i - парциальная плотность i – того компонента; $\rho_{см}$ - плотность газовой смеси (фазы).

Согласно [7], уравнение состояния для смеси идеальных газов

$$p_{\text{см}} = \frac{\rho_{\text{см}} \cdot R \cdot T}{M_{\text{см}}}, \quad (2)$$

где $p_{\text{см}}$ - давление смеси газов; T - температура; $M_{\text{см}}$ - молекулярный (молярный) вес смеси; R - универсальная газовая постоянная.

Молекулярный вес смеси можно определить из соотношения [7]

$$\frac{1}{M_{\text{см}}} = \sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i}{M_i}, \quad (3)$$

где M_i - молекулярный (молярный) вес i – того компонента смеси.

Подставив выражение (3) в (2), получим

$$p_{\text{см}} = \rho_{\text{см}} \cdot R \cdot T \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i}{M_i}. \quad (4)$$

Преобразовав (4), получим выражение для определения плотности газовой смеси:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{p_{\text{см}}}{R \cdot T \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i}{M_i}}. \quad (5)$$

Давление в зоне пожара считаем равным атмосферному давлению на той же высоте в невозмущённой области [6].

Удельную газовую постоянную определяем по выражению из [8]

$$R_{\text{см}} = \frac{R}{M_{\text{см}}}. \quad (6)$$

Подставим в (6) формулу для определения молекулярного веса смеси (3) и получим

$$R_{\text{см}} = R \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{\varphi_i}{M_i}. \quad (7)$$

Согласно [7], удельная изобарная теплоёмкость смеси газов определяется по формуле

$$c_{p_{см}} = \sum_{i=1}^4 \varphi_i \cdot c_{p_i}, \quad (8)$$

где c_{p_i} - удельная изобарная теплоёмкость i – того компонента смеси.

Удельная изохорная теплоёмкость смеси газов рассчитывается аналогично [7]

$$c_{\vartheta_{см}} = \sum_{i=1}^4 \varphi_i \cdot c_{\vartheta_i}, \quad (9)$$

где c_{ϑ_i} - удельная изохорная теплоёмкость i – того компонента смеси.

Показатель адиабаты смеси газов определяем по формуле [8]

$$\chi_{см} = \frac{c_{p_{см}}}{c_{\vartheta_{см}}}. \quad (10)$$

Скорость звука в газовой смеси определяется соотношением [8]

$$a_{см} = \sqrt{\chi_{см} \cdot R_{см} \cdot T}. \quad (11)$$

Для определения коэффициента динамической вязкости газовой смеси используем выражение из [9]

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^4 \frac{\mu_i}{1 + \frac{M_i}{\varphi_i} \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^4 \frac{\varphi_j}{M_j} \cdot A_{ij}}; \quad (12)$$

$$A_{ij} = \frac{\left(1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right)^2}{\frac{4}{\sqrt{2}} \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (13)$$

где μ_i - вязкость i – того компонента смеси.

Для определения коэффициента кинематической вязкости газовой смеси используем выражение из [5]

$$v_{\text{см}} = \frac{\mu_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}}}. \quad (14)$$

Основные масштабы подобия для случая, когда натурный ЛА эксплуатируется в зоне лесного пожара, а лётные исследования с использованием динамически подобного ЭВС проводятся на полигоне в условиях близких к стандартным, рассчитываем по формулам, приведённым в [5]. При этом для определения параметров атмосферы на полигоне используем СА, а для определения характеристик в зоне пожара – выражения (1) – (14).

Согласно [5] существует четыре комбинации соблюдаемых критериев подобия.

Первый вариант. Соблюдается подобие по критерию Фруда Fr , Рейнольдса Re и Маха M . Основные масштабы подобия определяются по формулам [5]

$$k_{\ell} = \sqrt{\frac{a_1 \cdot v_1}{g_1} \cdot \frac{g_2}{a_2 \cdot v_2}}; \quad (15)$$

$$k_m = k_p \cdot k_{\ell}^3; \quad (16)$$

$$k_I = k_p \cdot k_{\ell}^5; \quad (17)$$

$$k_p = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (18)$$

где k_{ℓ} – масштаб линейных размеров; k_m – масштаб масс; k_I – масштаб моментов инерции; k_p – масштаб плотностей; g – ускорение силы тяжести. Здесь и далее индекс «1» определяет отношение критерия или показателя к потоку, обтекающему натурный ЛА, а индекс «2» – к потоку, обтекающему ЭВС.

Второй вариант. Удовлетворяется только критерий Фруда Fr . Это единственный вариант, когда выбор масштаба линейных размеров k_{ℓ} не зависит от высот аэродинамического подобия (высот проведения экспериментов). Но после выбора масштаба k_{ℓ} и назначения высот аэродинамического подобия, масштаб масс k_m и масштаб моментов инерции k_I однозначно определяются соотношениями (16) и (17) [5].

Третий вариант. Соблюдаются условия подобия по критериям Фруда Fr и Рейнольдса Re . Масштаб линейных размеров определяется по формуле [5]

$$k_{\ell} = \sqrt[3]{\frac{v_1^2}{g_1} \cdot \frac{g_2}{v_2^2}}. \quad (19)$$

Четвёртый вариант. Соблюдаются критерии Фруда (Fr) и Маха (M) [5]. Масштаб линейных размеров находим из соотношения

$$k_{\ell} = \frac{a_1^2}{g_1} \cdot \frac{g_2}{a_2^2}. \quad (20)$$

Для третьего и четвёртого вариантов масштабы масс и моментов инерции так же определяются выражениями (16) и (17) [5].

Выводы. Разработан теоретический аппарат определения основных масштабов и высот подобия для моделирования на полигоне в стандартных условиях с помощью ЭВС полёта натурального ЛА в зоне лесного пожара. Разработанный аппарат может быть использован как для вычисления масштабов подобия по данным о состоянии атмосферы над конкретным типом лесных пожаров, так и для создания номограмм для оперативного определения масштабов и высот подобия по осреднённым данным о температуре и составе газовой смеси для всех типов лесных пожаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1981, 277 с.
2. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики: сб. науч. тр. Томского гос. ун-та. – Т. 1, №4. – Томск., 2003. – С. 41 – 89.
3. Коновалов Д.А. Некоторые результаты исследований пограничного слоя атмосферы и условий полёта самолёта АН-2 в зоне лесных пожаров. Метеорология и гидрология, 1972, №9, с. 47 – 52.
4. Обоснование необходимости и возможности физического моделирования критических режимов полета беспилотных самолетов в усложненных природно-климатических условиях. Тутубалин В.А., Бетина Е.Ю., Бондарева Н.В. – Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. трудов Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Вып. 12. Харьков: НАКУ, 2007, с.

5. Бетин А.В., Рыженко А.И., Рябков В.И., Черановский О.Р. Определение размеров и массово-инерционных параметров свободнолетающих динамически подобных моделей самолетов. – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 101 с.

6. Двумерная неустойчивость фронта верхового лесного пожара. А.М. Гришин, Е.Е. Зеленский, С.В. Шевелев - Физика горения и взрыва 1990, №3, с. 7 - 17.

7. Гинзбург И.П. Трение и теплопередача при движении смеси газов. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. 278 с.

8. Хейфец М.И. Обработка результатов испытаний: Алгоритмы, номограммы, таблицы. – М.: Машиностроение, 1988. – 168с.

9. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей. Справочное руководство. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 376с.
puszu.edu.ua

Рыженко А.И. Бетина О.Ю.

Визначення масштабів подібності для випадку польоту натурного літального апарату в зоні лісової пожежі.

Розроблено теоретичний апарат визначення основних масштабів та висот подібності для моделювання на полігоні в стандартних умовах за допомогою експериментального повітряного судна польоту натурного літального апарату в зоні лісової пожежі.

Ключові слова: масштаби подібності, експериментальне повітряне судно, лісова пожежа.

A.I. Ryzhenko, Y.U. Betina

Determination of similarity scales for case when working aircraft flight's in forest fire zone.

Theoretical apparatus for determination of basic similarity scales and altitudes when flight of full-scale aircraft in forest fire is simulated with experimental aircraft in standard conditions were found.

Key terms: similarity scales, experimental aircraft, forest fire.