

*А.И. Рыженко, д.т.н., профессор, НАКУ «ХАИ»,
Е.Ю. Бетина, преподаватель, НУГЗУ*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЁТА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ЗОНЕ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Исследована принципиальная возможность моделирования полёта беспилотного летательного аппарата в зоне лесного пожара с помощью свободнолетающей динамически подобной модели в условиях Стандартной атмосферы. Определены высоты аэродинамического подобия. Рассчитаны значения основных масштабов.

Ключевые слова: свободнолетающая динамически подобная модель, лесной пожар, Стандартная атмосфера, беспилотный летательный аппарат, масштабы подобия.

Постановка проблемы. Исследования динамики полёта летательных аппаратов (ЛА) (как беспилотных, так и пилотируемых) в зонах лесных пожаров методом моделирования с помощью свободнолетающих динамически подобных моделей (СДПМ) в условиях стандартной атмосферы (СА) представляется наиболее оптимальным. Так как два других метода: продувки в аэродинамических трубах и проведение испытаний на натурном ЛА непосредственно в зоне эксплуатации, – либо не дают полной информации о сложном пространственном движении аппарата, либо сопряжены с повышенным риском и большим материальными затратами.

Анализ последних достижений и публикаций. Представленный в работах [1, 2] математический аппарат показывает теоретическую возможность проведения такого рода исследований. При этом отличия реальной атмосферы в зоне лесного пожара от СА должны быть учтены и при проектировании СДПМ, и при определении условий проведения экспериментов.

Однако существенные отличия параметров атмосферы в зоне лесного пожара от СА, такие как экстремальные температуры и изменение состава воздуха, учтённые при проектировании и определении условий проведения исследований, могут привести к тому, что либо СДПМ с потребными параметрами не может быть получена при существующих технологиях производства, либо условия проведения не достижимы в СА.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является исследование возможности моделирования полёта БЛА в зоне лесного пожара с помощью СДПМ в условиях СА на примере решения реальной проектно-конструкторской задачи.

Исходные данные на физическое моделирование динамики полёта натурального ЛА в зоне возможного верхового лесного пожара

Харьковской области: для определенности будем считать, что высота крон деревьев составляет 20 м, высота местности над уровнем моря – 150 м (выбрана, как средняя высота над уровнем моря Харьковской области), температура невозмущенной среды вне зоны пожара – 20°C (средняя суточная температура пожароопасного периода в Харьковской области). Полет натурального ЛА в рассматриваемом случае происходит на высоте от 10 до 60 м над кронами деревьев, что с учетом высоты местности над уровнем моря и высоты деревьев составит от 180 до 230 м над уровнем моря.

При выполнении расчетов используем приведенные в работе [3] данные о состоянии атмосферы над зоной максимальных температур фронта вершинного верхового лесного пожара.

В табл. 1 и 2 приведены значения параметров воздуха в СА [4] и расчетные значения параметров газовой смеси в зоне верхового лесного пожара на геометрических высотах $H=180\dots 230$ м.

Таблица 1 – Температура T , плотность ρ , давление p , скорость звука a и коэффициент кинематической вязкости ν воздуха в СА на геометрических высотах $H=180\dots 230$ м

H, м	Параметры воздуха в СА				
	T, К	ρ , кг/м ³	p, Па	a, м/с	ν , (м ³ /с)·10 ⁵
180	286,980	1,20398	99181,23	339,602	1,4815
190	286,915	1,20232	99063,22	339,564	1,4827
200	286,850	1,20165	98945,33	339,526	1,4839
210	286,795	1,20049	98827,54	339,487	1,4851
220	286,730	1,19933	98709,87	339,448	1,4863
230	286,665	1,19917	98592,31	339,411	1,4875

В качестве прототипа натурального ЛА примем БЛА "ХАИ-112-3", разработанный и изготовленный в НИИ ПФМ Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт" (рис. 1).

Таблица 2 – Температура T , плотность $\rho_{см}$, давление $p_{см}$, скорость звука $a_{см}$ и коэффициент кинематической вязкости $\nu_{см}$ газовой смеси в зоне верхового лесного пожара на геометрических высотах $H=180\dots 230$ м

H, м	Параметры газовой смеси				
	T, К	$\rho_{см}$, кг/м ³	$p_{см}$, Па	$a_{см}$, м/с	$\nu_{см}$, (м ³ /с)·10 ⁵
180	1249,405	0,2801	99181,23	689,09	16,638
190	870,656	0,4135	99063,22	574,08	9,279
200	540,275	0,6499	98945,33	456,76	4,231
210	422,136	0,8402	98827,54	405,01	2,786
220	350,607	1,0001	98709,87	369,67	2,0267
230	302,238	1,1823	98592,31	343,58	1,568

БЛА "ХАИ-112-3" входит в состав беспилотного авиационного

комплекса "Сапсан" для решения широкого круга военных и гражданских задач, включающих разведку контуров пожара в широком диапазоне высот полета.

Запуск в полет БЛА "ХАИ-112-3" осуществляют по самолетному с полосы, а посадку – либо по самолетному, либо с помощью парашютно-амортизационной системы.

БЛА "ХАИ-112-3" оснащен видеоаппаратурой для круглосуточного наблюдения. Видеоинформация с борта БЛА, вместе с телеметрической информацией об основных параметрах полета и состоянии бортовых систем, передается по радиолинии в реальном масштабе времени на наземную станцию управления, где отображается и регистрируется средствами станции.



Рис. 1 – Беспилотный летательный аппарат "ХАИ-112-3" на стартовой позиции (а) и в полете (б)

Каркасы агрегатов БЛА "ХАИ-112-3" выполнены из металлических сплавов Д16 и сталь 45, а панели обшивки – из стеклопластика холодного отверждения на основе стеклоткани Т10-80 со связующим из эпоксидной смолы ЭД-20, отвердителя ПЭПА и пластификатора ДБФ (компоненты связующего применены в следующем соотношении: ЭД-20/ ПЭПА/ ДБФ = 1/ 0,12...0,16/ 0,1...0,12). При этом необходимо иметь в виду, что в конструкции БЛА "ХАИ-112-3" около половины массы составляет указанный стеклопластик.

Упруго-геометрические и прочностные характеристики конструкционных материалов БЛА "ХАИ-112-3" зависят от температуры, причем в наибольшей степени это касается материала обшивки – стеклопластика. Так, уже при температуре в 70 С указанный стеклопластик теряет половину своих несущих свойств и его использование для решения целого ряда задач, связанных с нагревом конструкции БЛА "ХАИ-112-3", является проблематичным [5, 6].

Поэтому для разведки контуров пожара на некотором удалении от зоны верхового лесного пожара БЛА "ХАИ-112-3" в его существ-

вующем виде вполне пригоден. Однако для выполнения полетов в зоне верхового лесного пожара на планируемых высотах от 10 до 60 м над кронами деревьев необходима определенная модификация БЛА "ХАИ-112-3". В первую очередь это касается используемых конструкционных материалов, двигателя и бортового оборудования.

Заменяя в проектировочных расчетах стеклопластиковые элементы обшивки и каркаса БЛА "ХАИ-112-3" на металлические (из дюралюминиевого сплава Д16Т – обшивку, стенки, пояса нервюр и шпангоутов, а из стали 45 – пояса лонжеронов в первом приближении получаем следующие параметры моделируемого натурального ЛА: масса $m_n=81$ кг, осевые моменты инерции $I_{xH}=4,52$ кг·м², $I_{yH}=9,76$ кг·м², $I_{zH}=7,13$ кг·м², коэффициент безопасности $f_n=1,5$ и максимальная эксплуатационная перегрузка $n_{y_{maxH}}^3=4$. При выполнении расчетов использованы формулы и методические рекомендации, приведенные в работах [7, 8].

Анализ результатов расчётов и построения высотно-скоростных ограничений области режимов полёта модификации БЛА "ХАИ-112-3" показал, что представляющие наибольший интерес режимы полета модификации БЛА "ХАИ-112-3" находятся в зоне автомодельности по критерию М, то есть существует необходимость в удовлетворении условий подобия по критериям Fr и Re.

В этом случае масштаб линейных размеров определяется соотношением [1]

$$k_\ell = 3 \sqrt{\frac{v_{H,CM}^2 \cdot g_M}{g_H \cdot v_M^2}}, \quad (1)$$

а масштабы масс и моментов инерции

$$k_m = k_p k_\ell^3; \quad k_I = k_p k_\ell^5 \quad (2)$$

Эти соотношения в неявном виде связывают масштабы k_ℓ , k_m и k_I с высотами аэродинамического подобия H_n и H_m .

В этом варианте заданной для моделирования высоте полета натурального ЛА (при фиксированном значении масштаба линейных размеров k_ℓ) соответствует единственное значение высоты полета СДПМ, т.е. существует лишь одна пара (H_n , H_m) высот аэродинамического подобия. Немаловажно и то, что в пределах зоны автомодельности по критерию М представляется возможным моделировать либо определенный режим полета ($V_n = \text{Const}$ при $H_n = \text{Const}$), либо заданный маневр с изменением скорости ($V_n = \text{Var}$ при $H_n = \text{Const}$) [8].

Используя соотношение (1), для исследования зависимости вы-

соты полёта СДПМ H_m от высоты полёта натурального ЛА H_n , а также для определения характера изменения масштабов масс k_m и моментов инерции k_I от высот аэродинамического подобия выполним необходимые расчеты для случая, когда СДПМ и натуральный ЛА имеют одинаковые размеры (масштаб $k_\ell=1$). Результаты расчёта зависимости высот аэродинамического подобия H_m от H_n представлены на рис. 1. Их использование для возможных пар (H_n, H_m) позволяет определить значения масштаба k_p , а, в соответствии с (2) и значения масштабов $k_m=k_I=k_p$ (табл. 3).

Таблица 3 – Высоты аэродинамического подобия и масштабы k_p, k_m, k_I при $k_\ell=1$ и удовлетворении условий подобия по критериям F_r и Re (при автомодельности по критерию M)

$H_n, \text{ м}$	$H_m, \text{ м}$	k_p, k_m, k_I
210	7536	1,5007
215	5622	1,34
220	3986	1,2214
225	2353	1,117
230	892	1,0339

Равенство масштаба линейных размеров k_ℓ единице экономически наиболее выгодно, так как в этом случае в качестве СДПМ может быть использован один из образцов БЛА "ХАИ-112-3". Результаты расчётов, приведённые на рис. 2 и в табл. 3, а также дополнительных расчетов по [8] показывают, что это технически осуществимо, но требует незначительной корректировки и перекомпоновки оборудования и комплектующих для доводки моментов инерции.

Например, при $H_n=220$ м потребная высота полета СДПМ равна $H_m=3986$ м, что на 4 м ниже практического потолка БЛА "ХАИ-112-3". Для этой пары высот $k_m=k_I=k_p=1,2214$ и при исходных данных на натуральный ЛА (масса $m_n=81$ кг и осевые моменты инерции $I_{x_n}=4,52$ кг·м², $I_{y_n}=9,76$ кг·м², $I_{z_n}=7,13$ кг·м²) не трудно получить, что потребные масса и моменты инерции СДПМ имеют следующие значения: $m_m=66,32$ кг, $I_{x_m}=3,7$ кг·м², $I_{y_m}=7,99$ кг·м², $I_{z_m}=5,836$ кг·м².

Для пары $H_n=215$ м и $H_m=5622$ м масштабы $k_m=k_I=k_p=1,34$. При этом потребные значения массы СДПМ $m_m=60,45$ кг и моментов инерции $I_{x_m}=3,37$ кг·м², $I_{y_m}=7,28$ кг·м², $I_{z_m}=5,32$ кг·м² близки к значениям аналогичных параметров БЛА "ХАИ-112-3". Однако для достижения высоты полета $H_m=5622$ м БЛА "ХАИ-112-3" необходимо

предусмотреть одно из возможных решений: использование носителя или другой силовой установки.

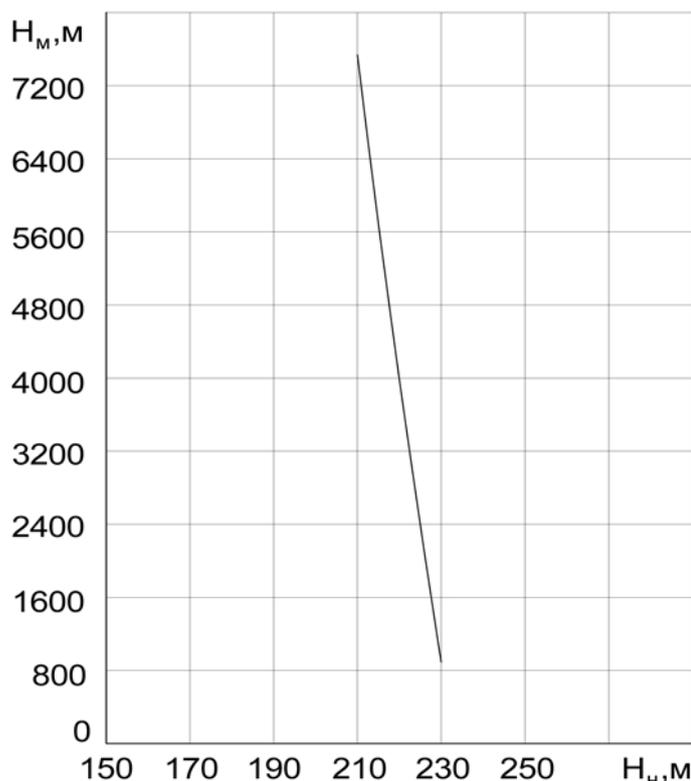


Рис. 2 – График зависимости высоты аэродинамического подобия H_m от H_n при $k_\ell=1$ и удовлетворении условий подобия по критериям Fr и Re (при автомодельности по критерию M)

Дальнейшее уменьшение исследуемой высоты полёта натурного ЛА обуславливает такое снижение потребной по условиям аэродинамического подобия массы СДПМ, что использовать в качестве СДПМ образец БЛА "ХАИ-112-3" становится проблематичным. При этом потребная высота полёта СДПМ может быть достигнута только сбрасыванием ее с пилотируемого носителя.

Выводы. На примере решения реальной проектно-конструкторской задачи показано, что моделирование динамики полёта ЛА в зоне лесного пожара с помощью СДПМ в условиях СА возможно, то есть может быть создана модель с потребными значениями параметров способная выполнять полёт на высоте аэродинамического подобия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетина, Е.Ю. Влияние лесных пожаров с различным типом контура на определение масштабов подобия [Текст] / Е.Ю. Бетина // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. УГЗУ – Харьков, 2010. – Вып. 27. – С. 18 – 25.

2. Бетина, Е.Ю. Масштабы подобия основных параметров экспериментального воздушного судна для моделирования полёта натурного летательного аппарата в зоне лесного пожара [Текст] / Е.Ю. Бетина // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. – Вып. 1 (57). – Х., 2009. – С. 94 – 101.

3. Гришин, А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения [Текст] / А.М. Гришин // Успехи механики: сб. науч. тр. Томского гос. ун-та. – Т. 1, №4. – Томск., 2003. – С. 41 – 89.

4. ГОСТ 4401-81. Стандартная атмосфера. Параметры. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 107 с.

5. Конструкционные материалы [Текст]: справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше, Ю.А. Быков. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

6. Панин, В.Ф. Конструкции с заполнителем [Текст]: справочник / В.Ф. Панин, Ю.А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.

7. Авиационные правила: нормы летной годности гражданских самолетов [Текст]. – М.: Международный авиационный комитет, 1992. – Ч. 23. – 531 с.

8. Определение размеров и массово-инерционных параметров свободнолетающих динамически подобных моделей самолетов [Текст]: учеб. пособие / А.И. Рыженко, А.В. Бетин, В.И. Рябков, О.Р. Черановский; Мин-во просвещения Украины, Харьк. авиац. ин-т. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1992. – 101 с.
nuczu.edu.ua

О.І. Риженко, О.Ю. Бетіна

Моделювання польоту літального апарату в зоні лісової пожежі

Досліджено принципову можливість моделювання польоту безпілотного літального апарату в зоні лісової пожежі за допомогою вільно літаючої динамічно подібної моделі в умовах Стандартної атмосфери. Визначено висоти аеродинамічної подібності. Розраховано значення основних масштабів

Ключові слова: вільно літаюча динамічно подібна модель, лісова пожежа, Стандартна атмосфера безпілотний літальний апарат, масштаби подібності.

O.I. Rizhenko, Y.U. Betina

Modeling the flight of the aircraft in the forest fire zone

Investigated the principal possibility of modeling the flight of an unmanned aerial vehicle in the area of forest fire with the help of free flying dynamically similar model in the conditions of the Standard atmosphere. Defines the height of the aerodynamic similarity. Calculated values of the main scale.

Keywords: free flying dynamically similar model, forest fire, Standard atmosphere, unmanned aerial vehicle, scale of similarity.