

Определение масштабов подобия для моделирования полёта натурного летательного аппарата в зоне лесного пожара

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Характерной особенностью последнего времени стали участившиеся лесные пожары, при которых возникает необходимость использования авиационной техники.

Согласно [1, 2] лесной пожар – явление неуправляемого многостадийного горения в открытом пространстве на покрытой лесом площади, в рамках которого происходят взаимосвязанные процессы нагревания, сушки и пиролиза лесных горючих материалов (ЛГМ), горения газообразных и догорание конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ, а также переноса энергии и веществ из зоны пожара в результате конвекции, излучения и кондукции.

К ЛГМ относят следующие природные углеводородные топлива: тонкие веточки, хвоинки или листья в кронах деревьев и опавшие на землю, а также напочвенный покров в виде трав, кустарников, мхов и лишайников [2].

Зона пожара – это часть природной среды, внутри которой термодинамические параметры отличаются от равновесных значений, определяемых погодными условиями и типом растительности, в результате изменения температуры и состава окружающей среды вследствие физико-химических превращений во фронте пожара. Под фронтом пожара понимают зону, в которой горят ЛГМ и продуктов пиролиза [1].

Таким образом, зону лесного пожара можно охарактеризовать как зону с усложнёнными природно-климатическими условиями.

По степени вовлечения фитомассы леса в процесс горения обычные лесные пожары (т.е. те, которые в природе инициируются точечным источником зажигания: молнией, непогашенным костром, окурком и др.) подразделяют на низовые, повальные верховые, вершинные верховые и массовые. При низовых лесных пожарах сгорают опад (опавшие веточки, хвоинки и листья), напочвенный покров (травы, кустарники, мхи и лишайники). При повальном верховом пожаре сгорают перечисленные выше ЛГМ, а также ЛГМ в пологе леса, которые представляют собой совокупность крон деревьев. При вершинном верховом пожаре сгорают ЛГМ только в пологе леса [1, 2].

В работе [10] приведены результаты исследования распространения двумерного фронта верхового лесного пожара, инициируемого очагом конечных размеров. При этом характеристики и распределение ЛГМ осреднены по высоте полога леса. Авторами проанализирована динамика распространения фронта пожара в зависимости от скорости ветра.

На рис. 1 и 2 показаны два существенно различающихся типа контуров лесных пожаров (выпуклый и выпукло-вогнутый) в виде изотерм T / T_e со значениями уровней 1,5; 3 и 4, отсчитываемыми снаружи вовнутрь (T – температура в зоне пожара; T_e – температура окружающей среды). Изотермы изображены в горизонтальной плоскости OXY (координата OX совпадает с направлением ветра, а координата OY перпендикулярна ему) для лесного массива, расположенного на вы-

соте $H = 0$ м над уровнем моря при давлении в зоне пожара, соответствующему Стандартной атмосфере (СА). Контур пожара на рис. 1 соответствует скорости ветра 2 м/с, а на рис. 2 – 5 м/с [10].

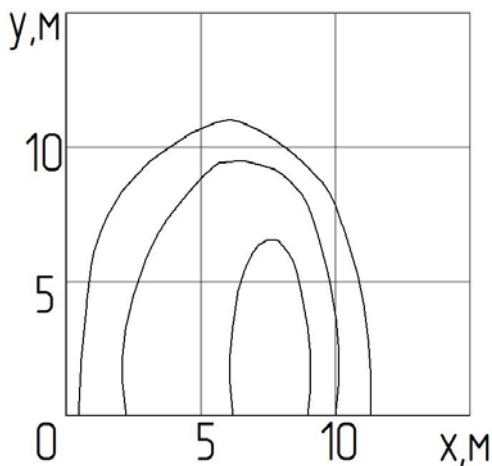


Рис. 1. Изотермы во фронте выпуклого пожара



Рис. 2. Изотермы во фронте выпукло-вогнутого пожара

Существование двух различных типов контуров лесных пожаров обусловлено различным распределением окислителя и горючего газа в высокотемпературной зоне при различных скоростях ветра. На рис. 3 и 4 изображены изолинии относительной массовой концентрации окислителя φ_1 и горючего газа φ_2 .

Рис. 3 соответствует режиму с выпуклым контуром. Видно, что перед фронтом пожара в направлении оси Ox образуется зона максимальных градиентов окислителя, поэтому центральная часть контура пожара опережает фланги [10].

На рис. 4 показаны изолинии окислителя и горючего, которые соответствуют изотермам на рис. 2. Сравнив изотермы и изолинии на этих рисунках, легко видеть, что перед центром высокотемпературной зоны в направлении оси Ox образуется область пониженной концентрации окислителя. Она возникает за счёт сноса ветром продуктов горения из фронта пожара и вытеснения ими окислителя. Поэтому фланги пожара распространяются быстрее центральной части фронта [10].

В результате горения ЛГМ образуются конечные продукты горения – зола и недожог – совокупность недогоревших ЛГМ, которые имеют чёрно-бурый цвет и обогащены углеродом. Над очагом лесного пожара возникает конвективная колонка – струя нагретых продуктов полного и неполного сгорания ЛГМ (частицы сажи и

зола в виде дыма). Высота конвективной колонки тем больше, чем большее количество тепла выделяется при горении [2].

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 пилотируемом 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 тушения пожара приносит желаемый эффект [3].

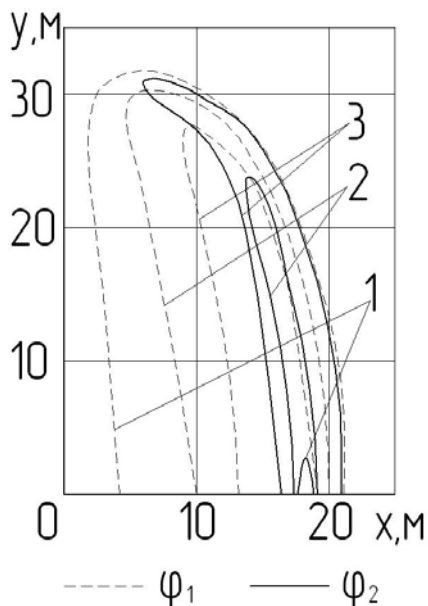


Рис. 3. Линии равных концентраций кислорода и горючего газа во фронте выпуклого пожара:
1 – φ_1 , $\varphi_2=0,15$; 2 – 0,1; 3 – 0,05

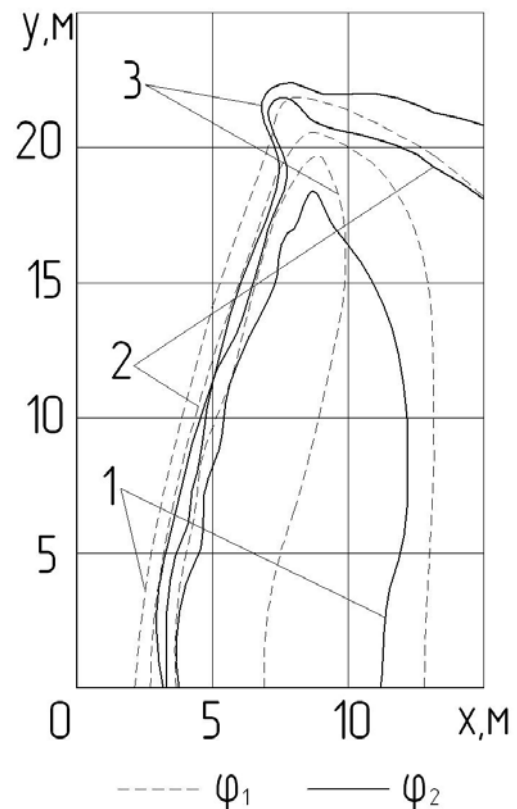


Рис. 4. Линии равных концентраций кислорода и горючего газа во фронте выпукло-вогнутого пожара: 1 – φ_1 , $\varphi_2=0,1$; 2 – 0,05; 3 – 0,02

Очевидно, что в столь опасных условиях рациональным является максимально возможное применение беспилотной техники. При возникновении лесного пожара беспилотные самолёты могут быть использованы для разведки контуров пожара, проведения научно-исследовательских работ и, собственно, тушения пожара (если будет доказана экономическая эффективность создания беспилотных самолётов 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 закритические углы атаки, приводящие к развитию неустановившихся движений и попаданию ЛА в критические режимы полета (например, сваливание и штопор). Наиболее эффективным методом исследования таких режимов полета является их физическое моделирование с помощью экспериментальных воздушных судов (ЭВС).

Исследования на динамически подобных ЭВС позволяют определять летные характеристики как пилотируемых ЛА, так и беспилотных самолётов. В отношении последних можно сказать, что летные исследования на ЭВС дают возможность разработать эффективные приемы дистанционного и автономного управления беспилотных самолётов (предотвращающие развитие аварийной ситуации), провести отработку системы автоматического управления в полете и обеспечить подготовку операторов [4].

Существующие теоретические основы создания динамически подобных ЭВС базируются на предположении, что полёты натурального ЛА и его ЭВС происходят в условиях стандартной атмосферы (СА) [5].

Однако это предположение не совсем корректно для случая моделирования динамики полёта натурального ЛА, предназначенного к эксплуатации в зонах лесных пожаров, с помощью ЭВС на полигоне вне зоны пожара.

Поэтому целью данной работы является исследование условий подобия для моделирования на полигоне в условиях СА с помощью ЭВС полёта натурального ЛА в зоне лесного пожара, а также определение масштабов подобия натурального ЛА и его ЭВС для моделирования режимов полета натурального ЛА в зонах пожаров с выпуклым и выпукло-вогнутым типом контура.

Как уже отмечалось ранее, течение воздуха в зоне пожара является турбулентным. Но при определении масштабов подобия турбулентностью можно пренебречь, поскольку скорость случайных порывов ветра много меньше собственной скорости ЛА.

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 . Вместе с тем в работах [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) и инертных компонентов газовой фазы. Причем летучие горючие продукты пиролиза считают одним эффективным газом типа CO , а инертные компоненты газовой фазы – газом типа N_2 . Согласно этим рекомендациям представим воздух в зоне лесного пожара как смесь четырёх основных газов: кислорода O_2 , азота N_2 , оксида CO и диоксида углерода CO_2 .

Для расчетов, выполняемых в данном исследовании, используем следующие выражения, формулы и уравнения.

Относительная массовая концентрация компонентов газовой фазы: кислорода ($i = 1$), азота ($i = 2$), оксида и диоксида углерода ($i = 3$ и $i = 4$), задаётся соотношением [7]

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

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

Согласно [7], уравнение состояния для смеси идеальных газов имеет следующий вид:

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

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

Молекулярный вес смеси можно определить из соотношения [7]

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

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

Подставив выражение (3) в (2), получим

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

а после его преобразования выражение для определения плотности газовой смеси примет вид

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

Давление смеси газов $p_{см}$ в зоне лесного пожара можно считать равным атмосферному давлению на той же высоте в невозмущённой области [6].

Удельную газовую постоянную смеси газов найдем из выражения [8]

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

Подставив в (6) формулу для определения молекулярного веса смеси (3), получим

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

Согласно [7] удельная изобарная теплоёмкость смеси газов

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

а удельная изохорная теплоёмкость смеси газов

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

где c_{p_i} – удельная изобарная теплоёмкость i -го компонента смеси, c_{ϑ_i} – удельная изохорная теплоёмкость i -го компонента смеси.

Показатель адиабаты смеси газов и скорость звука в ней можно определить по формулам [8]

$$\chi_{см} = \frac{C_{pсм}}{C_{\vartheta см}}; \quad (10)$$

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

Для расчета коэффициента динамической вязкости смеси газов используем выражения [9]

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

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

где μ_i – вязкость i -го компонента смеси; φ_j , M_j , μ_j – относительная массовая концентрация; молекулярный (молярный) вес и коэффициент динамической вязкости j -го компонента смеси.

Для расчета коэффициента кинематической вязкости смеси газов используем выражение [5]

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

Масштабы подобия устанавливают взаимосвязь соответствующих параметров натурального ЛА, ЭВС и характеристик обтекающих их потоков. Поэтому определение масштабов подобия является наиболее ответственной задачей проектирования ЭВС. Масштабами подобия основных параметров натурального ЛА и его ЭВС являются [5]:

$$k_\ell = \frac{l_1}{l_2}; \quad k_m = \frac{m_1}{m_2}; \quad k_I = \frac{I_{i1}}{I_{i2}} \quad (15)$$

где k_ℓ – масштаб линейных размеров; k_m – масштаб масс; k_I – масштаб моментов инерции; l_1 , l_2 – сходственные номинальные размеры натурального ЛА и

его ЭВС; m_1, m_2 – массы натурального ЛА и его ЭВС; I_{j1}, I_{j2} – моменты инерции (осевые и центробежные) натурального ЛА и ЭВС относительно осей сходственных систем координат (здесь и далее индекс “1” определяет отношение критерия или показателя к потоку, обтекающему натуральный ЛА, а индекс “2” – к потоку, обтекающему ЭВС).

Масштаб линейных размеров k_ℓ является первичным масштабом. В то же время масштабы масс k_m и моментов инерции k_I связаны с масштабом линейных размеров k_ℓ следующими соотношениями [5]:

$$k_m = k_\rho \cdot k_\ell^3; \quad k_I = k_\rho \cdot k_\ell^5, \quad (16)$$

где $k_\rho = \rho_1 / \rho_2$ – масштаб плотностей воздуха; ρ_1 – плотность воздуха на высоте полёта натурального ЛА; ρ_2 – плотность воздуха на высоте проведения модельного эксперимента на ЭВС.

Согласно [5] существует возможность разделения общей задачи моделирования с помощью ЭВС на четыре частные задачи, каждой из которых соответствует определённая комбинация удовлетворяемых критериев подобия.

Первый случай: удовлетворяются критерии Фруда Fr , Рейнольдса Re и Маха M . В этом случае масштаб линейных размеров

$$k_\ell = \sqrt{\frac{a_1 \cdot v_1}{g_1} \cdot \frac{g_2}{a_2 \cdot v_2}}, \quad (17)$$

где g_1 – ускорение силы тяжести на высоте полёта натурального ЛА; g_2 – ускорение силы тяжести на высоте проведения модельного эксперимента на ЭВС.

Второй случай: удовлетворяется только критерий Фруда Fr (при автомодельности по критериям Рейнольдса Re и Маха M).

Это единственный вариант, когда выбор масштаба линейных размеров k_ℓ не зависит от высот аэродинамического подобия (высот проведения экспериментов).

Третий случай: удовлетворяются критерии Фруда Fr и Рейнольдса Re (при автомодельности по критерию Маха M). В этом случае масштаб

$$k_\ell = 3 \sqrt{\frac{v_1^2}{g_1} \cdot \frac{g_2}{v_2^2}}. \quad (18)$$

Четвёртый случай: удовлетворяются критерии Фруда Fr и Маха M (при автомодельности по критерию Рейнольдса Re). В этом случае масштаб

$$k_\ell = \frac{a_1^2}{g_1} \cdot \frac{g_2}{a_2^2}. \quad (19)$$

Во всех случаях после определения (или выбора) масштаба линейных размеров k_ℓ и высот аэродинамического подобия масштабы масс k_m и моментов

инерции k_I однозначно определяются соотношениями (16).

По полученным зависимостям рассчитаны масштабы подобия основных параметров натурального ЛА и его ЭВС для моделирования режимов полета натурального ЛА в зонах пожаров с выпуклым и выпукло-вогнутым типом контура в следующих случаях обеспечения подобия: по критерию Фруда Fr ; по критериям Фруда Fr и Рейнольдса Re ; по критериям Фруда Fr и Маха M . При этом для определения параметров атмосферы на полигоне использованы данные СА, а для определения характеристик в зоне пожара – выражения (1) - (14).

Полученные результаты показывают, что в зоне пожара плотность воздуха меньше, чем в СА на той же высоте, что обусловлено существенным повышением температуры. На границах высокотемпературных зон масштаб плотностей k_ρ достигает значения единицы и даже превышает его. Это вызвано тем, что при температуре, равной стандартной, состав воздуха, а следовательно, и его плотность в зоне пожара отличаются от СА.

Для примера на рис. 5 – 10 показаны распределения масштабов подобия основных параметров в случае удовлетворения подобия по критериям Фруда Fr и Рейнольдса Re . В этом случае масштаб линейных размеров k_ℓ при учёте процессов, происходящих в зоне лесного пожара, увеличивается до значения 4,5 по сравнению с масштабом, рассчитанным по СА. Масштаб масс k_m увеличивается до 20, а масштаб моментов инерции k_I – до 500. Отмеченные тенденции одинаковы для пожаров обоих рассматриваемых типов контуров.

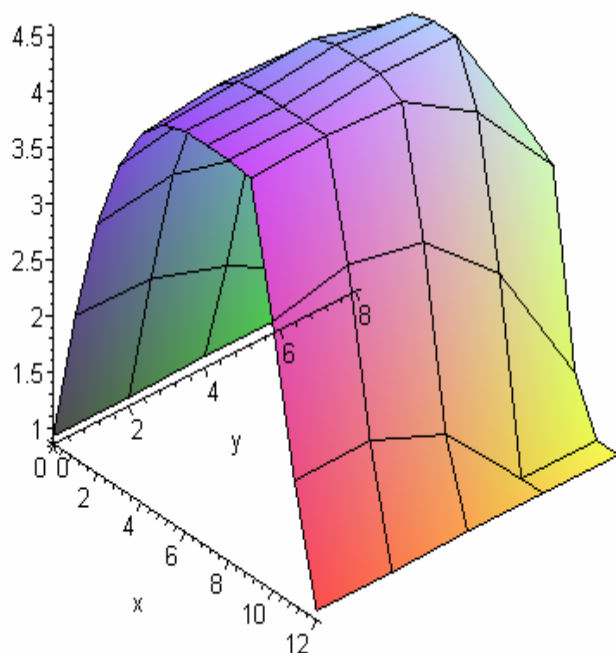


Рис. 5. Масштабы линейных размеров для выпуклого пожара при удовлетворении критериев Фруда Fr и Рейнольдса Re

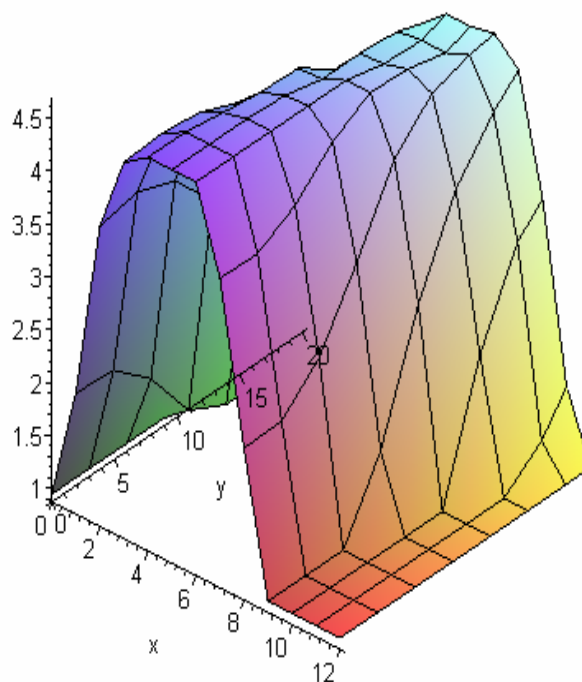


Рис. 6. Масштабы линейных размеров для выпукло-вогнутого пожара при удовлетворении критериев Фруда Fr и Рейнольдса Re

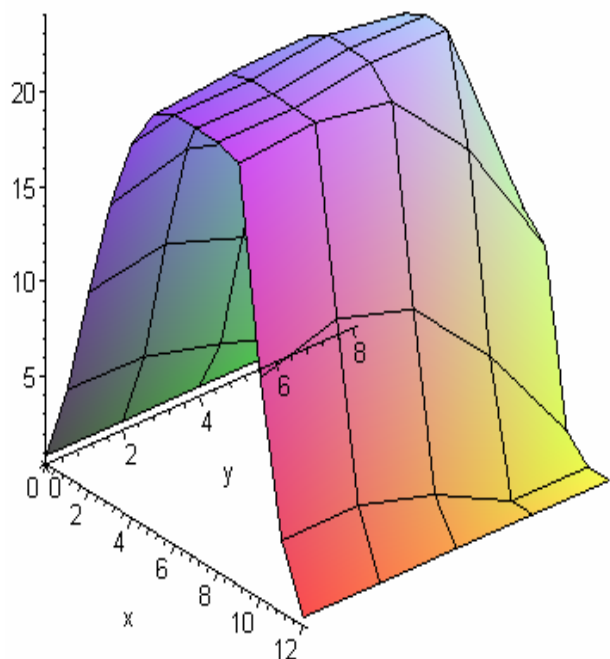


Рис. 7. Масштабы масс для выпуклого пожара при удовлетворении критериев Фруда Fr и Рейнольдса Re

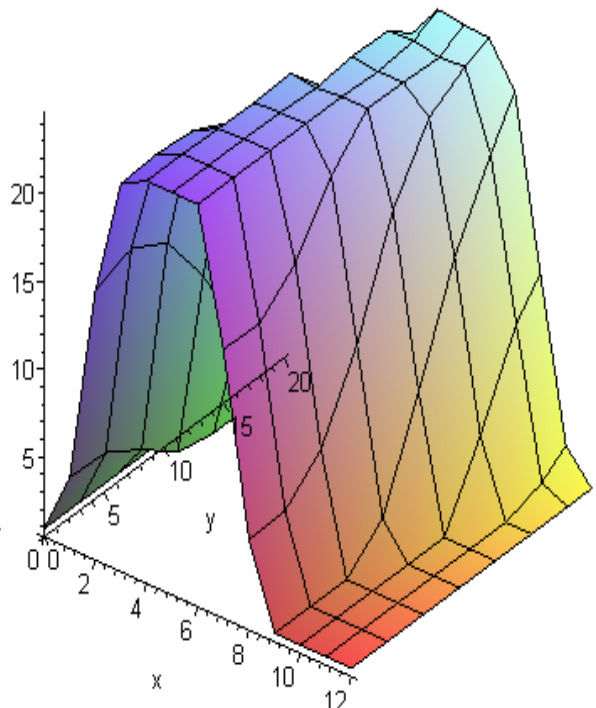


Рис. 8. Масштабы масс для выпукло-вогнутого пожара при удовлетворении критериев Фруда Fr и Рейнольдса Re

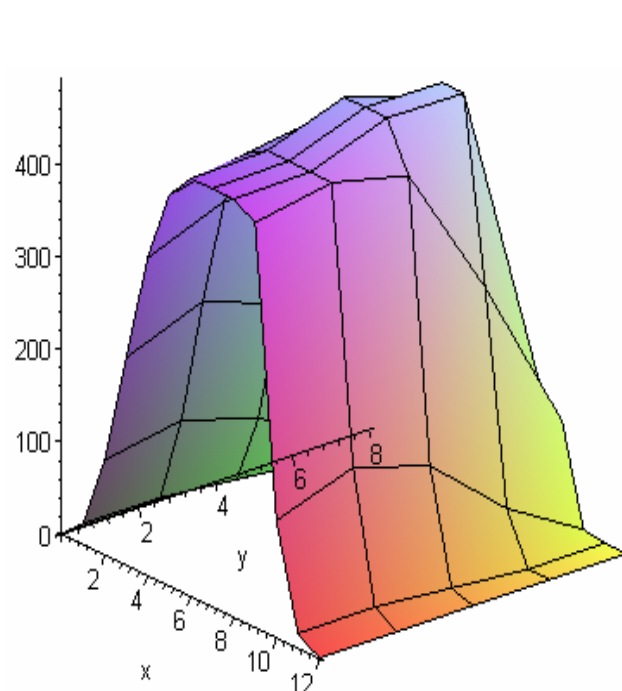


Рис. 9. Масштабы моментов инерции для выпуклого пожара при удовлетворении критериев Фруда Fr и Рейнольдса Re

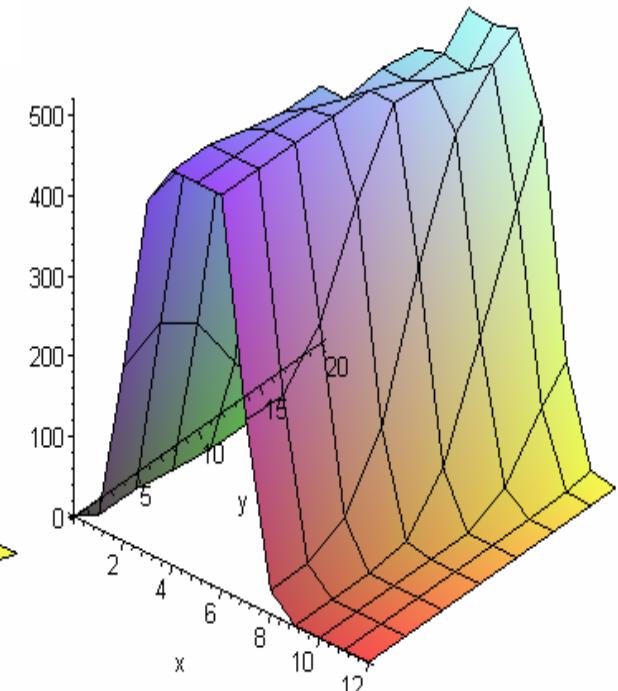


Рис. 10. Масштабы моментов инерции для выпукло-вогнутого пожара при удовлетворении критериев Фруда Fr и Рейнольдса Re

В случае удовлетворения подобия по критериям Фруда Fr и Маха M (при автомодельности по критерию Рейнольдса Re) масштабы подобия, определённые по характеристикам атмосферы в зоне пожара, возрастают по сравнению с масштабами, рассчитанными по СА. Масштаб линейных размеров K_ℓ увеличивается до 3,5, масштаб масс K_m – до 14, а масштаб моментов инерции K_I – до 200.

Выводы

1. Зоны лесных пожаров являются зонами с усложнёнными природно-климатическими условиями, в которых регулярно эксплуатируется авиационная техника. При этом они являются зонами повышенной аварийности.

2. Атмосфера в зоне лесного пожара существенно отличается от стандартной, как температурой, так и составом. Основные компоненты газовой смеси над зоной пожара: кислород (O_2), летучие горючие продукты пиролиза (CO), продукты реакции горения летучих горючих продуктов пиролиза (CO_2), инертные компоненты газовой фазы (N_2).

3. Разработан математический аппарат определения основных масштабов и высот подобия для моделирования на полигоне в стандартных условиях с помощью ЭВС полёта натурального ЛА в зоне лесного пожара. Этот 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.

4. При выполнении исследований на основе данных о состоянии атмосферы в зонах лесных пожаров различных типов контуров (выпуклого и выпукловогнутого) рассчитаны значения масштабов подобия основных параметров натурального ЛА и его ЭВС. Масштабы рассчитаны для следующих случаев обеспечения подобия: по критерию Фруда Fr ; по критериям Фруда Fr и Рейнольдса Re ; по критериям Фруда Fr и Маха M .

5. Анализ полученных результатов показывает, что масштабы подобия, рассчитанные с учётом процессов, происходящих в зоне пожара, существенно отличаются от масштабов, рассчитанных по СА. Для рассматриваемых случаев при равенстве высот полета натурального ЛА и его ЭВС, с использованием характеристик атмосферы согласно СА, все масштабы подобия должны были быть равны единице. В случае же определения характеристик атмосферы в зоне полёта натурального ЛА как характеристик в зоне лесного пожара масштаб плотностей уменьшается до 0,1; масштаб линейных размеров возрастает до 3,5...4,5; масштаб масс – до 14...20; а масштаб моментов инерции – до 200...500 в зависимости от комбинации удовлетворяемых критериев подобия.

6. Максимальные отклонения значений масштабов для лесных пожаров обоих типов контуров для всех рассмотренных комбинаций критериев подобия наблюдались в местах максимальных температур. Это свидетельствует о том, что изменение температуры в зоне пожара оказывает большее влияние на масштабы подобия, чем изменение состава воздуха.

7. Изменение состава воздуха также влияет на значения масштабов подобия. Это доказывают следующие наблюдения. Для пожаров различных типов контура при одинаковых температурах, но различном содержании компонентов газо-

вой смеси получены различные величины масштабов подобия. Для моделирования режимов полета натурального ЛА на границах высокотемпературных зон (где температура приближается к стандартной, а состав газовой смеси отличается от СА) масштабы подобия изменяют свои значения на принципиально отличные: от значений больше единицы на значения меньше единицы и наоборот.

8. Исследована проблема моделирования полёта ЛА в зоне пожара с помощью ЭВС в нормальных условиях в случае одновременного соблюдения подобия по критериям Фруда Fr , Рейнольдса Re и Маха M . Доказано, что это возможно на высотах СА от 0 до 3 км в зависимости от рассматриваемой части зоны пожара.

Список литературы

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров / А.М. Гришин. - Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1981. - 277 с.
2. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения / А.М. Гришин // Успехи механики: сб. науч. тр. Томск. 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 / Д.А. Коновалов // Метеорология и гидрология. – №9. – М.: Наука, 1972. – С. 47 – 52.
4. Тутубалин В.А. Обоснование необходимости и возможности физического моделирования критических режимов полета беспилотных самолетов в усложненных природно-климатических условиях / В.А. Тутубалин, Е.Ю. Бетина, Н.В. Бондарева // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 48(1). – Х., 2007. С. 113 – 118.
5. Определение размеров и массово-инерционных параметров свободнолетающих динамически подобных моделей самолетов: 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.
6. Гришин А.М. Двумерная неустойчивость фронта верхового лесного пожара / А.М. Гришин, Е.Е. Зеленский, С.В. Шевелев // Физика горения и взрыва; АН СССР. Сиб. отд-ние. – №3. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 7 – 17.
7. Гинзбург И.П. Трение и теплопередача при движении смеси газов / И.П. Гинзбург. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1975. - 278 с.
8. Хейфец М.И. Обработка результатов испытаний / М.И. Хейфец. – М.: Машиностроение, 1988. –168 с.
9. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей. Справочное руководство / И.Ф. Голубев. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. – 376 с.
10. Гришин А.М. Исследование распространения двумерного фронта верхового лесного пожара, инициируемого очагом конечных размеров / А.М. Гришин, А.Д. Грузин, С.В. Шевелев // Физика горения и взрыва; АН СССР. Сиб. отд-ние. – №4. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 9 – 14.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Рыженко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.