МЕХАНИКА

Челябинский физико-математический журнал. 2019. Т. 4, вып. 3. С. 345–354.

УДК 533.601.1, 629.7 DOI: 10.24411/2500-0101-2019-14307

ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ ПРОИЗВОДНЫХ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО МОМЕНТА КРЕНА ПО УГЛАМ АТАКИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ С МАЛЫМИ СЛУЧАЙНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

Ю. А. Мокин[1,2,3], С. Т. Калашников[1,2], Р. К. Швалева[1,2]

[1] *Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия*
[2] *АО«Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», г. Миасс, Челябинская обл., Россия*
[3] *Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия*
src@makeyev.ru

Рассматривается один из проблемных вопросов определения аэродинамических характеристик скоростных спускаемых летательных аппаратов (СЛА), имеющих форму тела вращения с малыми случайными вариациями поверхности композитного теплозащитного покрытия — вопрос оценки масштаба дисперсии $D\{m_x^\alpha\}$, $D\{m_x^\beta\}$ производных коэффициента аэродинамического возмущающего момента крена m_x по углам атаки и скольжения в зависимости от определяющих параметров. На основе использования разложения вариации поверхности в ряд Фурье и метода дифференциальной гипотезы локальности (для расчёта вариаций давления) получено аналитическое интегральное решение поставленной задачи для тела вращения с заданной автокорреляционной функцией случайных вариаций его поверхности. Проведён качественный анализ полученного решения. Представлен график, иллюстрирующий зависимость практически предельных значений величин m_x^α, m_x^β на уровне $3\sigma\{m_x^\alpha\}$ от степени корреляционной зависимости для модельной автокорреляционной функции случайных искажений поверхности острого $\sim 10^o$ конуса.

Ключевые слова: *сверхзвуковое обтекание, тело вращения, острый конус, композитный теплозащитный материал, слабая случайная вариация поверхности, малый угол атаки, аэродинамический момент крена.*

В числе проблемных вопросов, относящихся к определению аэродинамических характеристик тел вращения с малыми случайными пространственными искажениями внешней поверхности композитных теплозащитных материалов при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании под малым углом атаки, рассмотренных в работе [1], отмечен, как один из наиболее сложных, вопрос оценки величин возмущающего аэродинамического момента крена.

Проблемный характер указанного вопроса усугубляется в условиях неопределённости, отсутствия полной априорной информации о возможном качественном виде искажений поверхности, обусловленных многочисленностью влияющих факторов, в том числе случайного характера. Практическая значимость получения рациональных оценок величин возмущающего аэродинамического момента крена, а также величин и других возмущающих аэродинамических сил и моментов для задач динамики СЛА отражена в [2–4].

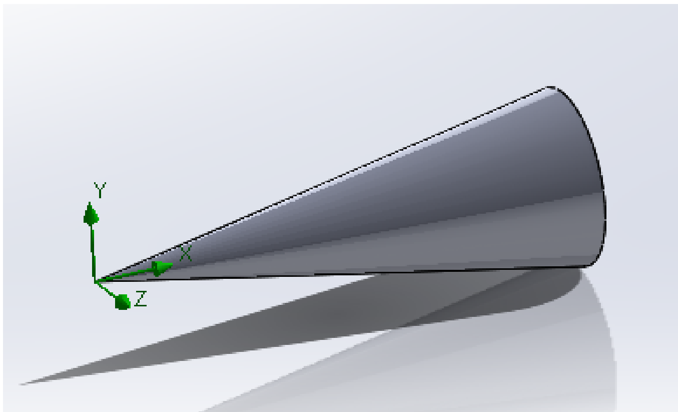

Рис. 1. Схема острого конуса

В настоящей работе рассмотрена задача оценки дисперсии $D\{m_x^\alpha\}$, $D\{m_x^\beta\}$ производных коэффициента возмущающего аэродинамического момента крена тела вращения с малыми случайными искажениями поверхности, характеризуемыми заданной автокорреляционной функцией. Модельный характер иллюстративного примера обусловлен не только выбором простейшей геометрии СЛА — в форме острого конуса, но и априорным выбором качественного вида конкретно использованной стационарной автокорреляционной функции, отражающего лишь общую тенденцию к ослаблению корреляционной зависимости с увеличением расстояния между рассматриваемыми точками поверхности.

Представим уравнение поверхности тела вращения, затупленного или типа острого конуса (рис. 1), с малыми искажениями поверхности в цилиндрической системе координат $(x,\, r,\, \varphi)$, ось OX направлена от носка к торцу, в виде

$$r(x,\varphi) = y(x) + \varepsilon \cdot \delta r(x,\varphi), \quad 0 \le x \le L, \quad 0 \le \varphi \le 2\pi, \tag{1}$$

где $y(x)$ — уравнение образующей исходного тела, $\delta r(x,\varphi)$ — слабая случайная вариация поверхности, L — длина тела, ε — параметр малости. Обозначим через $R_{\text{м}}$ и $S_{\text{м}} = \pi R_{\text{м}}^2$ радиус и площадь миделевого сечения тела; $p = y'(x) = \tan\theta_s$; θ_s — угол наклона образующей тела к оси OX.

Предполагается, что случайная функция (СФ) двух переменных $\delta r(x,\varphi)$ удовлетворяет следующим условиям:

а) $\delta r(x,\varphi) \ll R_{\text{м}}$;

б) $\partial[\delta r(x,\varphi)]/\partial x = \delta p \ll 1, \partial[\delta r(x,\varphi)]/\partial\varphi = \delta q \ll 1$;

в) $M\{\delta r(x,\varphi)\} = 0$ (математическое ожидание);

г) предполагается известной автокорреляционная функция вариаций поверхности
$$K_{\delta r}(x_1,x_2,\varphi_1,\varphi_2) = M\{\delta r(x_1,\varphi_1)\cdot\delta r(x_2,\varphi_2)\};$$

д) предполагается инвариантность любой статистической характеристики St вариаций поверхности относительно операций их поворота на произвольный угол $\Delta\varphi$ и зеркального отражения: $St\{\delta r(x,\varphi\pm\Delta\varphi)\} = St\{\delta r(x,\varphi)\}$; $St\{\delta r(x,-\varphi\pm\Delta\varphi)\} = St\{\delta r(x,\varphi)\}$.

Условия (а) и (б) определяют слабость вариаций $\delta r(x,\varphi)$, предполагающую малость не только самих вариаций, но и их частных производных. Условие (в) исключает из рассмотрения заранее определённые, «не совсем случайные» вариации поверхности. Условие (д) постулирует статистическое «равноправие» всех меридиональных сечений ($\varphi = \text{const}$) и отсутствие априорного различия в окружных направлениях, по часовой стрелке и против часовой стрелки, относительно оси OX.

Условие (д) имеет следствия. Во-первых, математическое ожидание производных m_x^α, m_x^β в этом случае из соображений симметрии равно нулю, $M\{m_x^\alpha\} = M\{m_x^\beta\} = 0$, и их дисперсии равны $D\{m_x^\alpha\} = D\{m_x^\beta\}$. Таким образом, из основных статистических характеристик случайных величин (СВ) m_x^α, m_x^β подлежит дальнейшей оценке только дисперсия $D\{m_x^\alpha\}$. Во-вторых, в этом случае автокорреляционная функция (г) стационарна по окружной координате φ, т.е. является функцией трёх аргументов, одним из которых является чётная функция разности $\omega = \varphi_2 - \varphi_1$:

$$K_{\delta r}(x_1, x_2, \varphi_1, \varphi_2) = K_{\delta r}(x_1, x_2, \omega). \tag{2}$$

Заметим, что в этом случае $K_{\delta r}(x_1, x_2, 0) = D\{\delta r(x, \varphi)\} = D_0(x)$ определяет дисперсию вариаций поверхности в сечении $x = \text{const}$.

Будем рассматривать обтекание тела вращения с малыми искажениями поверхности (1) потоком идеального газа с заданным числом Маха M_∞ под малыми углами атаки α и скольжения β. В случае острого конуса с углом полураствора θ предполагается реализация случая присоединённого скачка уплотнения, гарантированно имеющего место при $\theta \leq 50^o$. Для расчёта коэффициента возмущающего момента крена m_x используем методологию работы [5], основанной на методе дифференциальной гипотезы локальности (ДГЛ) [6], особенности применения которого для острого конуса описаны в [7].

Расчёт коэффициента давления Φ на поверхности тела (1) в рамках метода [6] при малых углах атаки производится на основе зависимости типа формулы Тейлора

$$\Phi(x, \varphi) \approx \Phi(x) + \Phi_t(x)\Delta t + \frac{1}{2}\Phi_{tt}(x)\Delta t^2, \tag{3}$$

где $t = \tan(\alpha_{\text{м}})$ — тангенс местного угла атаки, $\Delta t = t(x, \varphi) - p(x)$, $\Phi(x)$, $\Phi_t(x)$, $\Phi_{tt}(x)$ — коэффициенты-функции (3), вычисляемые при заданных условиях обтекания для исходного контура тела с использованием «точных» методов и программ.

Зависимость коэффициента давления Φ на поверхности острого конуса исходной формы для заданных условий обтекания от угла θ предполагается известной и заданной в виде дважды дифференцируемой функции $\Phi = \Phi(p)$. Расчёт коэффициента давления на искажённой поверхности конуса (1) при малых углах атаки проводится в рамках метода касательных конусов с использованием её в форме $\Phi = \Phi(t)$. Последнее позволяет использовать для расчёта коэффициента давления на поверхности острого конуса (1) приближённую зависимость в формате метода [6]

$$\Phi(x, \varphi) \approx \Phi(p) + \Phi_t(p)\Delta t + \frac{1}{2}\Phi_{tt}(p)\Delta t^2,$$

где $\Phi_t = \Phi_p$; $\Phi_{tt} = \Phi_{pp}$. При гиперзвуковых скоростях в качестве основы для расчёта коэффициента давления $\Phi(p)$ на поверхности острого конуса может быть использована зависимость [8]

$$\Phi(\theta) = \left[\frac{2(k+1)(k+7)}{(k+3)^2}\right] \sin^2\theta, \tag{4}$$

где k — показатель адиабаты, называемая усовершенствованной формулой Ньютона для конуса. При сверхзвуковом обтекании известна приближённая аппроксимация [8]

$$\Phi(\theta, M_\infty) = (0.0016 + 0.002M_\infty^{-2})\theta^{1.7},$$

где θ — угол конуса в градусах; M_∞ — число Маха набегающего потока. Для острого конуса с фиксированным углом θ для заданных условий обтекания производные Φ_t, Φ_{tt} не зависят от продольной координаты x, т. е. являются постоянными величинами.

Стандартным технологическим приёмом при вычислении изменения коэффициентов аэродинамических сил и моментов тел вращения с малыми искажениями поверхности является представление вариации поверхности тригонометрическим рядом Фурье

$$\delta r(x,\varphi) = \varepsilon \left\{ \frac{a_0(x)}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n(x)\cos nx + b_n(x)\sin nx] \right\}. \tag{5}$$

Коэффициент аэродинамического момента крена тела вращения с образующей $y(x)$ и искажением поверхности (5) при малых углах атаки и скольжения в линейном приближении может быть представлен выражением [5]

$$m_x(\alpha,\beta) = m_{x0}(\alpha_{\text{п}} = 0) + m_x^\alpha \cdot \alpha + m_x^\beta \cdot \beta, \tag{6}$$

где [3]

$$m_x^\alpha \approx \left(\frac{-\pi\varepsilon}{S_{\text{м}} \cdot L}\right) \int_0^L \Phi_t(x) y(x) \left(1 + y'^2(x)\right) b_1(x)\,dx, \tag{7}$$

$$m_x^\beta \approx \left(\frac{\pi\varepsilon}{S_{\text{м}} \cdot L}\right) \int_0^L \Phi_t(x) y(x) \left(1 + y'^2(x)\right) a_1(x)\,dx,$$

Т. е. производные m_x^α, m_x^β зависят только от членов суммы (5) с номером $n = 1$.

Левая часть (5) есть СФ двух аргументов, аналогично и коэффициенты-функции $a_n(x)$, $b_n(x)$ в правой части (5) являются СФ. Коэффициент $a_0(x)$ в (5) определяет «отклонение размера» — осесимметричную составляющую искажения поверхности тела, не влияющую на главную часть момента крена (6), далее предполагается, что

$$a_0(x) = 0. \tag{8}$$

Представим автокорреляционную функцию (2) с учётом её чётности по ω и условия (8) рядом Фурье вида

$$K_{\delta r}(x,u,\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n(x,u)\cos n\omega, \quad x,u \in [0,L]. \tag{9}$$

Можно показать [9], что при условиях (в), (г), (д) для коэффициентов-функций в (5) справедливы следующие соотношения:

$$\left.\begin{aligned} &M\{a_n(x)\} = M\{b_n(x)\} = 0, \quad x \in [0,L], \quad n = 1,2,\ldots; \\ &M\{a_n(x)\cdot b_k(u)\} = 0, \quad x,u \in [0,L], \quad n,k = 1,2,\ldots; \\ &M\{a_n(x)\cdot a_k(u)\} = M\{b_n(x)\cdot b_k(u)\} = \begin{cases} 0, & \text{если } n \neq k; \\ \lambda_n(x,u), & \text{если } n = k. \end{cases} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

Таким образом, указанные коэффициенты — корреляционно независимые СФ с автокорреляционными функциями $\lambda_n(x,u)$ из разложения (9). Математическое ожидание квадрата правой части (7) определяет искомую дисперсию $D\{m_x^\alpha\}$. После ряда выкладок с учётом (10) на основе рекомендаций [10] получено следующее интегральное соотношение:

$$D\{m_x^\alpha\} = \frac{\varepsilon^2}{R_{\text{м}}^4 \cdot L^2} \int_0^L \int_0^L \Phi_t(x)\Phi_t(u)y(x)y(u)\big[1+y'^2(x)\big]\big[1+y'^2(u)\big]\lambda_1(x,u)\,dudx. \quad (11)$$

Двойной интеграл (11) определяет общее аналитическое решение поставленной задачи. Для частного случая обтекания острого конуса (1) соотношение (11) запишется в виде

$$D\{m_x^\alpha\} = \frac{\varepsilon^2 p^2 [1+p^2]^2 \Phi_t^2}{R_{\text{м}}^4 \cdot L^2} \int_0^L \int_0^L xu\lambda_1(x,u)\,dudx. \quad (12)$$

Для цилиндрических и цилиндроконических деталей величины $a_1(x)$, $b_1(x)$ определяют смещения центров нормальных круговых сечений относительно продольной оси по длине детали [11]. Механическая интерпретация смысла производных m_x^α, m_x^β, их косвенная связь с производной c_y^α и способ получения их экстремальных оценок в детерминированной постановке описаны и приведены в [3].

Используем (12) для оценки $D\{m_x^\alpha\}$ острого конуса с углом $\theta = 10^o$ со случайными смещениями центров круговых сечений поверхности ($n = 1$) с постоянной по длине конуса дисперсией $D\{\delta r(x,\varphi)\} = D_0(x) = \sigma_0^2 = \text{const}$. Предполагается, что корреляционная зависимость искажений поверхности в различных сечениях стационарна также и по продольной координате и убывает с увеличением расстояния между ними по экспоненциальному закону

$$\lambda_1(x,u) = \sigma_0^2 \epsilon^{-\frac{(x-u)^2}{(\tau L)^2}}, \quad x,u \in [0,L]. \quad (13)$$

Зависимость (13) содержит два параметра. Линейный параметр σ_0 выберем постоянным из условия $3\sigma_0 = 0.01R_{\text{м}}$, при этом практически предельная величина искажений поверхности составляет 1% радиуса миделевого сечения. Второй безразмерный параметр $0 < \tau < \infty$ определяет скорость уменьшения корреляционной зависимости вариаций поверхности с увеличением расстояния между сечениями по длине конуса. Из (12) с учётом (13) получаем аналитическое решение рассматриваемой задачи, содержащее двойной интеграл, зависящий от параметра:

$$D\{m_x^\alpha\} = \frac{\varepsilon^2 p^2 [1+p^2]^2 \Phi_t^2}{R_{\text{м}}^4 \cdot L^2} \int_0^L \int_0^L xu\epsilon^{-\frac{(x-u)^2}{(\tau L)^2}}\,dudx. \quad (14)$$

Значения производной Φ_t у острого конуса с углом $\theta = 10^o$ при числе Маха $M_\infty = 10$ согласно (3), (4) равно $\Phi_t \cong 0.77$. Результаты вычислений по формуле (14) представим с использованием средних квадратических отклонений в форме $3\sigma\{m_x^\alpha\} = 3\sqrt{D\{m_x^\alpha\}}$, характеризующей практически предельный диапазон изменения СВ m_x^α при определённом выше практически предельном диапазоне вариаций поверхности, в зависимости от параметра τ (рис. 2).

Приведённый график количественно характеризует качественно ожидаемый результат: чем слабее корреляционная зависимость случайных вариаций поверхности по длине конуса ($\tau \to +0$), тем меньшие по модулю СВ m_x^α могут быть реализованы. С другой стороны, с усилением корреляционной зависимости ($\tau \to \infty$) величина $3\sigma\{m_x^\alpha\}$ быстро приближается к предельному асимптотическому значению

$$\lim_{\tau\to\infty} 3\sigma\{m_x^\alpha\} = \frac{3\sigma_0}{L} c_y^\alpha, \quad (15)$$

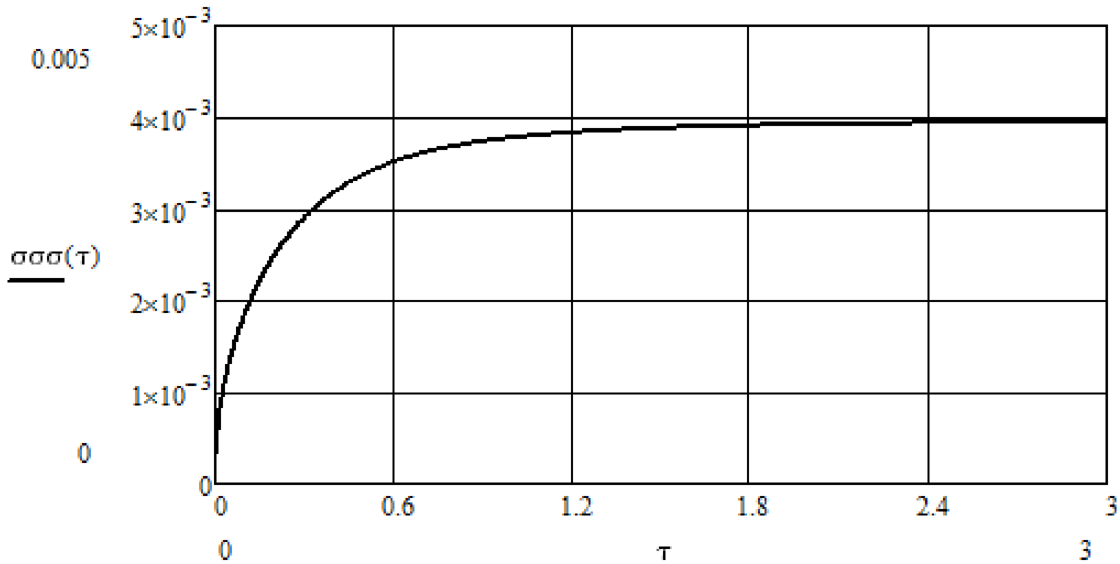

Рис. 2. График $3\sigma\{m_x^\alpha\}(\tau)$ практически предельного уровня производной коэффициента возмущающего момента крена для острого конуса $\theta = 10^o$ при $M_\infty = 10$ для случайных вариаций поверхности с практически предельным уровнем смещений центров сечений $\sim 1\%(R_{\text{м}})$ в зависимости от параметра автокорреляции τ

где c_y^α — производная коэффициента нормальной силы исходного тела по углу атаки. Для рассматриваемого случая обтекания острого 10^o конуса с $M_\infty = 10$: $c_y^\alpha \cong 2.251$. При $\tau > 2$ искажение поверхности конуса фактически реализуется в виде его малого смещения как жёсткого тела в случайном радиальном направлении, что и отражено в соотношении (15) и на рис. 3, где результаты расчёта приведены в нормированном виде.

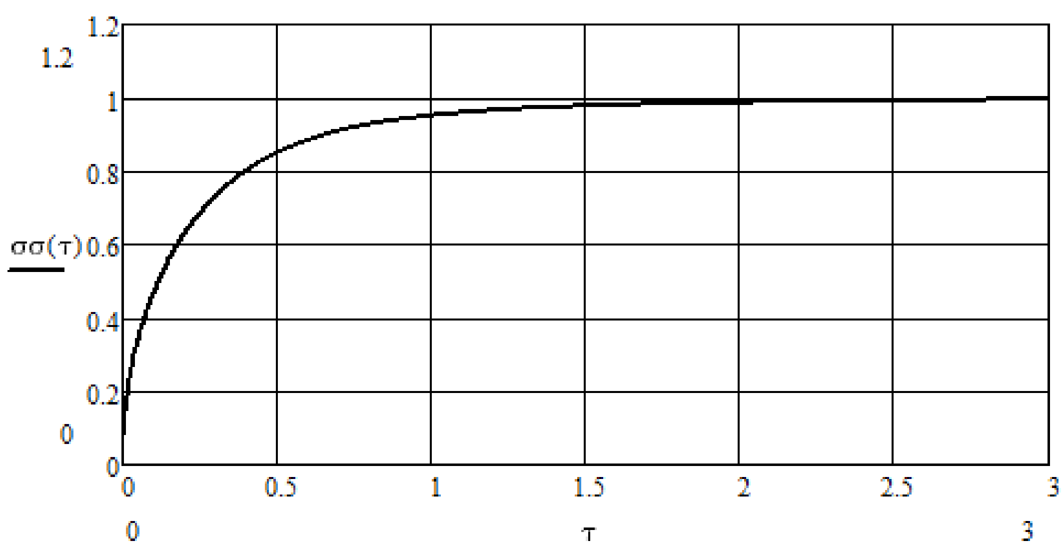

Рис. 3. График $\frac{3\sigma\{m_x^\alpha\}(\tau)}{(3\sigma_0/L)c_y^\alpha}$ для острого конуса $\theta = 10^o$ при $M_\infty = 10$, для случайных вариаций поверхности с практически предельным уровнем смещений центров сечений $\sim 1\%$ $(R_{\text{м}})$ в зависимости от параметра автокорреляции τ

Выводы

1. Представлено в аналитической интегральной форме общее решение задачи определения дисперсии производных $D\{m_x^\alpha\}$, $D\{m_x^\beta\}$ коэффициента аэродинамического момента крена по углам атаки и скольжения тел вращения с ма-

лыми случайными искажениями поверхности при сверхзвуковом обтекании.

2. Получены численные оценки дисперсии производных $D\{m_x^\alpha\}$, $D\{m_x^\beta\}$ для острого 10^o конуса при числе Маха $M_\infty = 10$ для модельной автокорреляционной функции случайных вариаций его поверхности.
3. Проведён качественный анализ зависимости дисперсии, средних квадратичных отклонений, производных $D\{m_x^\alpha\}$, $D\{m_x^\beta\}$ от степени корреляционной зависимости случайных вариаций поверхности тела.

Список литературы

1. **Degtyar, V. G.** On problem of analyzing aerodynamic properties of blunted rotary bodies with small random sur-face distortions under supersonic and hypersonic flows / V. G. Degtyar, S. T. Kalaschnikov, Yu. A. Mokin // AIP Conference Proceedings. — 2017. — Vol. 1893. — P. 020004-1–020004-6.
2. **Ярошевский, В. А.** Движение неуправляемого тела в атмосфере / В. А. Ярошевский. — М. : Машиностроение, 1978. — 168 с.
3. **Мокин, Ю. А.** Влияние малых углов атаки и скольжения на момент крена при гиперзвуковом обтекании тел вращения / Ю. А. Мокин // Теплофизика и аэромеханика. — 2009. — Т. 16, № 1. — С. 37–42.
4. **Дегтярь, В. Г.** Влияние структуры углерод-углеродных композиционных материалов на обгарные формы и аэродинамические характеристики гиперзвуковых летательных аппаратов / В. Г. Дегтярь, Г. Ф. Костин, В. Н. Савельев, В. А. Тюменцев, В. И. Хлыбов // Конструкции из композиционных материалов. — 2014. — № 4. — С. 15–26.
5. **Мокин, Ю. А.** О моделировании коэффициента аэродинамического момента крена затупленных тел вращения с малой вариацией поверхности при сверхзвуковом их обтекании / Ю. А. Мокин // Космонавтика и ракетостроение. — 2012. — Вып. 1 (66). — С. 38–44.
6. **Мокин, Ю. А.** О возможностях решения задач гиперзвуковой аэродинамики на основе дифференциальной формы представления обобщённой гипотезы локальности и ее композиции с точными численными методами / Ю. А. Мокин // Космонавтика и ракетостроение. — 2008. — Вып. 2 (51). — С. 136–145.
7. **Мокин, Ю. А.** Об изменении положения центра давления острого конуса с малыми вариациями поверхности при гиперзвуковом обтекании / Ю. А. Мокин, С. Т. Калашников, Р. К. Швалева // Труды МАИ. — 2017. — URL: http://trudymai.ru/pulished.php?ID=85668.
8. **Краснов, Н. Ф.** Аэродинамика ракет / Н. Ф. Краснов, В. Н. Кошевой, А. Н. Данилов, В. Ф. Захарченко. — М. : Высш. шк., 1968. — 772 с.
9. **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — М. : Наука, 1964. — 464 с.
10. **Абузгауз, Г. Г.** Справочник по вероятностным расчётам / Г. Г. Абузгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. — М. : Воениздат, 1970. — 536 с.
11. **Бородачев, Н. А.** Точность производства в машиностроении и приборостроении / Н. А. Бородачев, Р. М. Абдрашитов, И. М. Веселова [и др.]. — М. : Машиностроение, 1973. — 567 с.

Поступила в редакцию 28.08.2019
После переработки 12.09.2019

Сведения об авторах

Мокин Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент; старший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; главный научный сотрудник, АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», г. Миасс, Челябинская обл., Россия; профессор, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; e-mail: src@makeyev.ru.

Калашников Сергей Тимофеевич, кандидат технических наук; начальник отдела фундаментальных проблем аэрокосмических технологий, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; главный ученый секретарь, АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», г. Миасс, Челябинская обл., Россия; e-mail: src@makeyev.ru.

Швалева Роза Камиловна, младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; инженер I категории, АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева», г. Миасс, Челябинская обл., Россия; e-mail: src@makeyev.ru.

Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal. 2019. Vol. 4, iss. 3. P. 345–354.

DOI: 10.24411/2500-0101-2019-14307

ESTIMATE OF DERIVATIVES VARIANCE OF AN AERODYNAMIC ROLLING MOMENT COEFFICIENT WITH RESPECT TO ATTACK AND YAW ANGLES OF A ROTARY BODY WITH SMALL IRREGULAR SURFACE DISTORTIONS AT SUPERSONIC FLOW

Yu.A. Mokin[1,2,3], **S.T. Kalashnikov**[1,2], **R.K. Shvaleva**[1,2]

[1] *South Ural Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of RAS, Miass, Chelyabinsk Region, Russia*
[2] *Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk Region, Russia*
[3] *Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia*
src@makeyev.ru

The paper is devoted to one of acute issues of determination of aerodynamic coefficients of high-speed re-entry vehicles (RVs) of the rotary-body shape with small irregular surface distortions of a composite thermal protection coating, i. e. an issue of assessment of a scale of variance $D\{m_x^\alpha\}$, $D\{m_x^\beta\}$ of derivatives of disturbing aerodynamic rolling moment coefficient m_x with respect to attack and yaw angles versus governing parameters. An analytical integral solution of a set modeled problem for a rotary body with a given autocorrelated function of irregular distortions of its surface is obtained on the basis of Fourier expansion of the surface distortion and a method of differential locality hypothesis used to evaluate pressure variations. The obtained solution is qualitatively analyzed. A curve of practically ultimate values of m_x^α, m_x^β at $3\sigma\{m_x^\alpha\}$ versus a degree of correlation dependence for the modeled autocorrelated function of irregular surface distortions of a sharp $\sim 10^o$-cone is provided.

Keywords: *supersonic flow, rotary body, sharp cone, composite thermal protection material, small random surface distortion, small attack angle, aerodynamic rolling moment coefficient.*

References

1. **Degtiar V.G., Kalaschnikov S.T., Mokin Yu.A.** On problem of analyzing aerodynamic properties of blunted rotary bodies with small random surface distortions under supersonic and hypersonic flows. *AIP Conference Proceedings*, vol. 1893l, pp. 020004-1–020004-6.
2. **Yaroshevsky V.A.** *Dvizhenie neupravlyayemogo tela v atmosfere* [Motion of an unguided body in atmosphere]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 168 p. (In Russ.).
3. **Mokin Yu.A.** Vliyanie malykh uglov ataki i skol'zheniya na moment krena pri giperzvukovom obtekanii tel vrashcheniya [Influence of small attack and yaw angles on rolling moment at hypersonic flow of rotary bodies]. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and aeromechanics], 2009, vol. 16, no. 1, pp. 37–42. (In Russ.).
4. **Degtiar V.G., Kostin G.F., Saveliev V.N., Tyumentsev V.A., Khlybov V.I.** Vliyaniye struktury uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov na obgarnye formy i aerodinamicheskiye kharakteristiki giperzvukovykh letatel'nykh apparatov [Influence of structures of C-C composites on ablated shapes and aerodynamic characteristics of hypersonic aircraft]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Structures from composite materials], 2014, no. 4, pp. 15–26. (In Russ.).
5. **Mokin Yu.A.** O modelirovanii koeffitsienta aerodinamicheckogo momenta krena zatuplennykh tel vrashcheniya s maloy variatsiey poverkhnosti pri sverkhzvukovom ikh obtekanii [On modeling the aerodynamic rolling moment coefficient of blunt-nosed

rotary bodies with small surface variations at their hypersonic flow]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket engineering], 2012, no. 1, pp. 38–44. (In Russ.).

6. **Mokin Yu.A.** O vozmozhnostyakh resheniya zadach giperzvukovoy aerodinamiki na osnove differintsial'noy formy predstavleniya obobshchyonnoy gipotezy lokal'nosti i eyo kompozitsii s tochnymi chislennymi metodami [About possibility to solve the hypersonic aerodynamics problems resting on differential form for presenting generalized locality hypothesis and its composition applying precise numerical methods]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and rocket engineering], 2008, no. 2, pp. 136–145. (In Russ.).
7. **Kalashnikov S.T., Mokin Yu.A., Shvaleva R.K.** Ob izmenenii polozheniya tsentra davleniya ostrogo konusa s malymi variatsiyami poverkhnosti pri giperzvukovom obtekanii [On shifting of the pressure center of a sharp cone with small surface distortions under hypersonic flow]. *Trudy MAI* [Trudy of Moscow Aviation Istitute], 2017, no. 96, http://trudymai.ru/pulished.php?ID=85668. (In Russ.).
8. **Krasnov N.F., Koshevoy V.N., Danilov A.N., Zakharchenko V.F.** *Aerodinamika raket* [Rocket Aerodynamics]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1968. 772 p. (In Russ.).
9. **Ventsel Ye.S.** *Teoriya veroyatnostey* [Theory of probabilities]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 464 p. (In Russ.).
10. **Abuzgayz G.G., Tron A.P, Kopenkin Yu.N., Korovina I.A.** *Spravochnik po veroyatnostnym raschyotam* [Reference book on probability calculation]. Moscow, Voenizdat Publ., 1970. 536 p. (In Russ.).
11. **Borodachev N.A., Abdrashitov R.M., Veselova I.M. [et al.]** *Tochnost' proizvodstva v mashinostroyenii i priborostroyenii* [Production accuracy in machine and instrumentation engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 567 p. (In Russ.).

Accepted article received 28.08.2019
Corrections received 12.09.2019