

УДК 629.7.025.64:[533.6.013.416+533.6.011.55]

Об изменении положения центра давления острого конуса с малыми вариациями поверхности при гиперзвуковом обтекании

Калашников С.Т.*, Мокин Ю.А., Швалева Р.К.*****

Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева,

Тургоякское шоссе, 1, Миасс, Челябинская обл., 456300, Россия

**e-mail: src@makeyev.ru*

Аннотация

Задача оценки максимально возможных величин изменения положения центра давления при малом угле атаки при заданном ограничении величин искажений поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов, имеющих форму острого конуса, путем линеаризации сведена к математической задаче определения нормы линейного оператора-функционала. Приведено интегральное выражение линейного функционала, определяющего изменение положения центра давления для заданного изменения формы конуса. Получено интегральное выражение нормы указанного оператора-функционала для заданной ограничительной функции вариаций поверхности. Приведены численные оценки возможного изменения положения центра давления для острого конуса. Проведено сравнение результатов определения величин приращений Δx_f положения центра давления для острого конуса с $\theta_k = 10^\circ$ при заданном ограничении допустимых вариаций поверхности на основе различных

подходов. Показано, что предложенная в работе методика позволяет получать существенно большие величины вариаций δx_f .

Ключевые слова: гиперзвуковой летательный аппарат, тело вращения, острый конус, малые углы атаки, слабые вариации поверхности, центр давления.

Введение

Определение положения центра давления летательных аппаратов (ЛА) различной формы при различных условиях обтекания является одной из классических задач аэродинамики [1 – 7], имеющей важное практическое значение. Возможные пути и известные различающиеся методические подходы к решению указанной задачи кратко охарактеризованы в работе [8].

В [8] физическая задача оценки максимально возможных величин вариаций положения центра давления при малых углах атаки и заданном ограничении величин вариаций поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов, имеющих форму тела вращения, путем линеаризации по малому параметру сведена к математической задаче определения нормы линейного оператора-функционала. На основе использования полуаналитического метода ДГЛ (дифференциальная форма представления гипотезы локальности) [9] получено интегральное выражение линейного функционала, определяющего изменение положения центра давления для заданного изменения формы тела. Получено общее интегральное выражение нормы указанного оператора-функционала в линейном пространстве слабых вариаций поверхности для заданной ограничительной функции, применимое к достаточно

широкому классу форм гиперзвуковых ЛА, конкретный выбор из которого может проводиться на основе различных критериев [10, 11].

На основе общего решения [8] в [12] получены численные оценки возможных изменений положения центра давления для исходной сферической формы ЛА. В настоящей работе в продолжение тематики работ [8, 12, 13] и на основе методов [8, 9] рассмотрен еще один представляющий практический интерес частный случай задачи – для классической исходной формы гиперзвукового ЛА в виде острого конуса. Практическая ценность полученного точного решения для модельной задачи острого конуса обусловлена также возможностью его приближенного использования и для ЛА, имеющих форму слабо притупленных конусов.

Постановка задачи

Рассмотрим сверхзвуковое обтекание идеальным газом острого конического тела вращения с малыми вариациями поверхности под малым углом атаки. Уравнение, описывающее поверхность конуса в цилиндрической системе координат (x, r, φ) , продольная ось Ox направлена от носка к торцу, запишем в виде

$$r(x, \varphi) = p \cdot x + \varepsilon_r \cdot \delta y(x); \quad \{0 \leq x \leq L; 0 \leq \varphi \leq 2\pi\}, \quad (1)$$

где $p = \tan(\theta_\kappa)$ – тангенс угла полураствора конуса, $y(x) = p \cdot x$ – уравнение образующей конуса; L – длина конуса; ε_r – параметр малости (по радиальному направлению); $\delta y(x)$ – слабая вариация образующей.

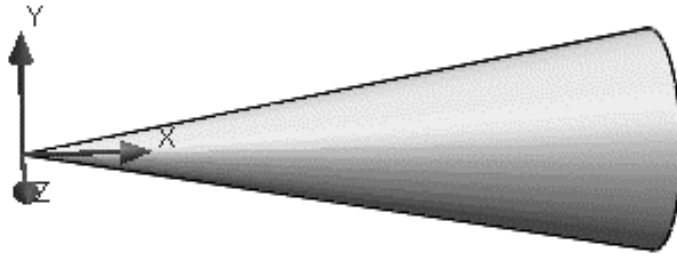


Рисунок 1 – Схема острого конуса с используемой системой координат

Совместно с цилиндрической используется декартова система координат с общим началом, совпадающим с вершиной конуса, и продольной осью симметрии Ox ($y = r \cdot \cos \varphi$, $z = r \cdot \sin \varphi$) (рисунок 1). Будем рассматривать конусы с углами полураствора θ_κ до $\sim 50^\circ$, обеспечивающими реализацию присоединенного скачка уплотнения при малых углах атаки. Для исходной образующей $y(x) = p \cdot x$ справедливы равенства

$$y(0) = 0; \quad y(L) = R_m; \quad y'(x) = p = \tan(\theta_\kappa); \quad y''(x) = 0, \quad (2)$$

где $R_m = p \cdot L$ – радиус миделевого сечения. Слабость вариации $\delta y(x)$ предполагает малость не только ее самой, но и производной $\delta y'(x)$.

С помощью произвольно выбранной кусочно-непрерывной ограничительно-нормирующей функции $0 \leq \psi(x) \leq \varepsilon_r \cdot 1$, $x \in [0, L]$ с носителем $\Psi \subset [0, L]$ на множестве вариаций $\delta y(x)$, равных нулю при $x \notin \Psi$, определим норму

$$\|\delta y(x)\|_\psi = \sup_{x \in \Psi} |\delta y(x) / \psi(x)|. \quad (3)$$

Множество вариаций $\delta y(x)$ с нормой (3) образуют линейное нормированное пространство Δ , в котором условие $\|\delta y(x)\|_\psi \leq 1$ тождественно ограничению величины вариации неравенством

$$|\delta y(x)| \leq \psi(x). \quad (4)$$

Выбор ограничительно-нормирующей функции $\psi(x)$ рекомендуется [8] проводить с учетом наличия (или отсутствия) априорной информации о фактических, возможных или допустимых вариациях поверхности ЛА заданной исходной формы. На промежутках или в точках $x \notin \Psi$, где $\psi(x) = 0$, поверхность тела не варьируется. В случае $\psi(x) = 1$ равномерно ограничиваются величины радиальных вариаций поверхности ЛА. Произвол выбора $\psi(x)$ и ее носителя Ψ можно, наряду с возможностями, указанными в [8], использовать, например, при $0 \notin \Psi$ (или $L \notin \Psi$) для задания вариаций $\delta y(x)$ с закрепленными концами.

Физическую суть рассматриваемой задачи можно сформулировать так: на множестве вариаций образующей $\delta y(x) \in \Delta$, удовлетворяющих ограничению (4), для заданных условий обтекания требуется получить оценку максимально возможного изменения положения центра давления – приращения Δx_f . Для получения указанной оценки должна быть решена, естественно, и задача расчета положения центра давления для произвольной слабой вариации поверхности $\delta y(x)$.

В предположении наличия инструмента (метода, программы расчета; реально существующего, или даже потенциально) для численного решения прямой задачи аэродинамики, позволяющего получить для заданных условий обтекания стационарные аэродинамические коэффициенты рассматриваемого тела исходной формы, включая производные по углу атаки коэффициентов нормальной силы c_y^α и момента тангажа m_z^α , а также распределение давления по его поверхности, в [8]

физическая задача оценки максимально возможного изменения коэффициента центра давления на множестве вариаций образующей Δ отождествлена с математической задачей нахождения нормы линейного оператора-функционала δx_f , представляющего главную линейную часть, по малому параметру ε_r , полного приращения $\Delta x_f[\varepsilon_r \cdot \delta y(x)]$, то есть первой вариации δx_f

$$\|\delta x_f\|_{\psi} \stackrel{def}{=} \sup_{\delta y(x) \in \Delta} \frac{|\delta x_f|}{\|\delta y(x)\|_{\psi}}. \quad (5)$$

Сформулированная математическая задача решена в [8] на основе использования метода ДГЛ [9], в рамках которого величина коэффициента давления на поверхности обтекаемого потоком газа тела при малых вариациях его поверхности и малых углах атаки определяется приближенной зависимостью

$$\Phi(x, t) \approx \Phi_0(x) + \Phi_t(x) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \Phi_{tt}(x) \cdot \Delta t^2, \quad (6)$$

где $0 \leq x \leq L$ – продольная координата точки поверхности; $t = \tan(\alpha_m)$ – тангенс местного угла атаки в точке; $\Phi(x, t) = 2(p - p_{\infty}) / \rho_{\infty} \cdot V_{\infty}^2$ – коэффициент давления в рассматриваемой точке; $\Phi_0(x)$ – коэффициент давления по длине исходного тела при $\alpha = 0$; $\Phi_t(x)$, $\Phi_{tt}(x)$ – производные функции давления по t , вычисленные с использованием величин давления на наветренной и подветренной образующих исходного тела при малом угле атаки; $\Delta t = t(x, \varphi) - t_0(x)$ – приращение тангенса местного угла атаки, $t_0(x) = y'(x)$.

В соответствии с общим решением [8] линейный оператор-функционал, отображающий элементы линейного нормированного пространства $\delta y(x) \in \Delta$ на числовую прямую, первая вариация δx_f – определяется выражением

$$\delta x_f = \frac{1}{I_1} \left\{ - \int_0^L F(x) \cdot \delta y(x) dx + G(L) \cdot \delta y(L) \right\}, \quad (7)$$

где:
$$I_1 = \int_0^L \Phi_t \cdot (1 + p^2) \cdot r dr, \quad (8)$$

$$G(x) = \Phi_{tt} (1 + p^2) (x - x_f + pr)r + 2\Phi_{tp} p (x - x_f + pr)r + \Phi_t \cdot (1 + p^2) r^2, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} F(x) = & \Phi_{tx} \cdot (1 + p^2) \cdot r \cdot (x - x_f + r \cdot p) + \\ & \Phi_{tt} \cdot [p \cdot (x - x_f + r \cdot p) \cdot (1 + p^2 + 2r \cdot y'') + r \cdot (1 + p^2) \cdot (1 + p^2 + r \cdot y'')] + \\ & \Phi_{tx} \cdot [2r \cdot p \cdot (x - x_f + r \cdot p) \cdot p + r^2 \cdot (1 + p^2)] + \\ & \Phi_t \cdot [2r \cdot y'' \cdot (x - x_f + 3r \cdot p) + 2r \cdot p \cdot (1 + 2p^2) - (1 - p^2) \cdot (x - x_f)]. \end{aligned} \quad (10)$$

В выражениях (7 – 10): $r = y(x)$, $p = y'(x)$, $y'' = y''(x)$; $\Phi_t(x)$, $\Phi_{tt}(x)$ – коэффициенты-функции формулы Тейлора (6); $\Phi_{tx}(x)$, $\Phi_{ttx}(x)$ – их производные по аргументу x .

Норма функционала (7) для заданной ограничительно-нормирующей функции $\psi(x)$ определяется выражением

$$\|\delta x_f\|_{\psi} = \frac{1}{I_1} \left\{ \int_0^L |F(x)| \cdot \psi(x) dx + |G(L)| \cdot \psi(L) \right\}. \quad (11)$$

В [8] также показано, что малая вариация поверхности вида

$$\delta y(x) \cong \begin{cases} -\psi(x) \cdot \text{sign} F(x), & \text{при } 0 < x < L; \\ \psi(x) \cdot \text{sign} G(x), & \text{при } x = L, \end{cases} \quad (12)$$

со сглаженными до непрерывности точками разрыва первого рода обеспечивает близкое максимально возможному, при ограничении (4), положительное приращение координаты центра давления δx_f . Для сглаживания точек разрыва вариации поверхности ступенчатой формы может быть использована, например, методика работы [14].

Оценка δx_f для острого конуса

Возможность использования общего решения работы [8], полученного с использованием метода ДГЛ, разработанного, вообще говоря, применительно к притупленным формам ЛА, для анализа аэродинамических характеристик острого конуса, обусловлена, тем не менее, основными результатами классической теории сверхзвукового и гиперзвукового обтекания острых конусов [4 – 6].

При гиперзвуковых скоростях для расчета коэффициента давления на поверхности острого конуса получена приближенная зависимость

$$\Phi(\theta_k) = \frac{2(k+1)(k+7)}{(k+3)^2} \sin^2 \theta_k, \quad (13)$$

где k – показатель адиабаты, называемая усовершенствованной формулой Ньютона для конуса [4].

Зависимость (13) может использоваться, в рамках метода местных (касательных) конусов [4 – 6], также и для оценки величины коэффициента давления на поверхности тел, близких по форме острому конусу, при малых углах атаки

путем замены в ней угла конуса θ_k на местный угол атаки α_m , что соответствует представлению (6) коэффициента давления в [9].

При использовании метода ДГЛ для расчета коэффициента давления на поверхности острого конуса справедливы следующие, упрощающие решение по сравнению с общим случаем, соотношения для функций $\Phi_0(x)$, $\Phi_t(x)$, $\Phi_{tt}(x)$ в (6) и их производных при фиксированном угле θ_k

$$\Phi_0(x) = \Phi_0 = const, \quad \Phi_t(x) = \Phi_t = const, \quad \Phi_{tt}(x) = \Phi_{tt} = const, \quad (14)$$

$$\Phi_{tx}(x) = 0, \quad \Phi_{ttt}(x) = 0. \quad (15)$$

При условии постоянства Φ_t положение центра давления острого конуса исходной формы при малых углах атаки определяется соотношением [5]

$$x_f = (2/3) \cdot (1 + p^2) \cdot L. \quad (16)$$

С учетом (14) интеграл (8) для острого конуса равен

$$I_1 = (1/2p)\Phi_t \cdot (1 + p^2) \cdot R_m^2 \quad (17)$$

а с учетом (2), (9), (14), (16), (17) получаем соотношение

$$G^* \equiv G(L)/I_1 = (2/3 \cos^2 \theta_k) \cdot \left[\left(\frac{\Phi_{tt}}{\Phi_t} \right) + 5 \sin \theta_k \cdot \cos \theta_k \right] \quad (18)$$

где G^* – безразмерный коэффициент пропорциональности между величинами изменения радиуса миделевого сечения $\delta y(L)$ и смещения центра давления δx_f в случае равенства нулю вариации поверхности $\delta y(x)$ везде, за исключением малой левосторонней окрестности миделевого сечения $x = L$. В этом частном случае имеет место приближенное равенство

$$\delta x_f \approx G^* \cdot \delta y(L). \quad (19)$$

В общем случае с учетом (2), (10), (14), (16), (17), и обозначая $\bar{x} = x/L$, получаем соотношения

$$F^*(x) = 2 \left[2p(1+p^2) \frac{\Phi_{tt}}{\Phi_t} + 4p^2 - 1 \right] \cdot \bar{x} - \frac{4}{3} \left[p(1+p^2) \frac{\Phi_{tt}}{\Phi_t} + p^2 - 1 \right], \quad (20)$$

$$\delta x_f = - \int_0^L F^*(x) \cdot [\delta y(x)/R_m] dx + G^* \cdot \delta y(L), \quad (21)$$

где: $F^*(x) = F(x) \cdot R_m / I_1$ – безразмерная, линейная по x , весовая подинтегральная функция, определяющая вклад локальных вариаций поверхности конуса в интегральное смещение центра давления.

Интеграл (21), линейный оператор-функционал, определяет главную линейную часть полного приращения координаты центра давления конуса за счет вариации поверхности $\delta y(x)$. Норма этого оператора для произвольной ограничительно-нормирующей функции $\psi(x)$ согласно (11) равна

$$\left\| \delta x_f \right\|_{\psi} = \int_0^L |F^*(x)| \cdot [\psi(x)/R_m] dx + |G^*| \cdot \psi(L). \quad (22)$$

Численное значение нормы (22) определяет верхнюю грань значений коэффициента пропорциональности между линейными величинами допустимых вариаций поверхности конуса и соответствующих им смещений центра давления.

Допустимая вариация поверхности $\delta y(x)$, реализующая увеличение δx_f , близкое предельному, может быть определена по схеме [8]: почти везде ее абсолютная величина должна быть равна (или пропорциональна) $\psi(x)$, а знак

определяться знаками $F^*(x)$ (при $x < L$ – противоположные) и G^* (при $x = L$ – одинаковые) в соответствии с (21). В окрестности точек разрыва (смены знака) вариация $\delta y(x)$ (12) должна быть сглажена до непрерывности.

Вид выражений (18), (20), (21), (22) позволяет сделать важный вывод: решение рассматриваемой задачи зависит только от двух безразмерных параметров, которые можно рассматривать в качестве ее критериев подобия. Первый параметр, угол конуса θ_κ – геометрический. Второй, отношение производных (Φ_{tt}/Φ_t) – характеризует зависимость изменения коэффициента давления на поверхности острого конуса от изменения угла θ_κ . Если зависимость коэффициента давления на поверхности конуса от угла его полураствора при заданных условиях обтекания описывается функцией $\Phi = \Phi(p)$, то численное значение второго параметра, обозначим его $\tilde{\Phi}$, равно

$$\tilde{\Phi} = \left(\frac{\Phi_{tt}}{\Phi_t} \right) = \frac{d}{dp} \ln \Phi'(p) = \left(\frac{\Phi_{pp}}{\Phi_p} \right). \quad (23)$$

При использовании для расчета давления на поверхности острого конуса гиперзвуковой зависимости (13) величина $\tilde{\Phi}$ определяется соотношением

$$\tilde{\Phi} = (\cos \theta_\kappa / \sin \theta_\kappa)(1 - 4 \sin^2 \theta_\kappa) = \frac{(1 - 3p^2)}{p(1 + p^2)}. \quad (24)$$

Подстановкой (24) в (18) и (20) получаем

$$G^* = \frac{2(1 + \sin^2 \theta_\kappa)}{3 \sin \theta_\kappa \cos \theta_\kappa} = \frac{2(1 + 2p^2)}{3p}, \quad (25)$$

$$F^*(x) = 2(1 - 2p^2) \cdot \bar{x} + (8/3)p^2. \quad (26)$$

Знак G^* (25) всегда положителен, а знак линейной функции (26), положительной в носовой точке конуса при $\bar{x} = 0$, изменяется при переходе через точку

$$\bar{x}^* = \frac{4}{3} \cdot \frac{p^2}{(2p^2 - 1)}, \quad (27)$$

которая, с учетом требования $0 \leq \bar{x} \leq 1$, реально существует только при условии $p \geq \sqrt{3/2}$, то есть только для конусов с $\theta_\kappa > \theta_\kappa^* \cong 50,768^\circ$.

Если не учитывать условия существования присоединенного скачка уплотнения для острых конусов, а зависимость (13) рассматривать как чисто ньютоновскую, применимую для всех углов θ_κ до $\pi/2$, то из (25), (26), (27) следует, что для получения близкой максимально возможной положительной вариации δx_f для конусов с $\theta_\kappa < \theta_\kappa^*$ вариация поверхности $\delta y(x)$ на полуинтервале $[0, L)$ должна быть минимально возможной (отрицательной), а в кормовом сечении, в окрестности точки $x = L$, максимально возможной (положительной).

Для конусов с $\theta_\kappa > \theta_\kappa^*$ вариация $\delta y(x)$ на полуинтервале $[0, \bar{x}^* \cdot L)$ должна быть минимальной, а на полуинтервале $(\bar{x}^* \cdot L, L]$ максимальной. В окрестности точек разрыва $x = L$ или $x = \bar{x}^* \cdot L$ вариация $\delta y(x)$ должна быть сглажена до непрерывности. Так, например, для конуса $\theta_\kappa = 60^\circ$ $\bar{x}^* = 4/5$. Правильность этих утверждений и зависимости (21) с использованием (25), (26) подтверждена результатами прямых расчетов с использованием теории Ньютона. При изменении

знака вариации $\delta y(x)$ реализуется максимальное по величине отрицательное смещение центра давления.

Норма функционала (21) для конусов с $\theta_\kappa < \theta_\kappa^*$ для, одного из наиболее показательных, частного случая ограничительно-нормирующей функции $\psi(x) = 1$ с учетом (22), (25), (26) определяется выражением

$$\|\delta x_f\|_{\psi=1} = \frac{5 + \sin^2 \theta_\kappa}{3 \sin \theta_\kappa \cos \theta_\kappa} = \frac{5 + 6p^2}{3p}, \quad (28)$$

суть которого можно сформулировать в виде двух утверждений.

А) Для любой слабой вариации поверхности острого конуса, удовлетворяющей ограничению $|\delta y(x)/R_m| \leq \bar{\varepsilon}_r$, величина изменения положения центра давления ограничена неравенством

$$|\delta x_f| \leq \bar{\varepsilon}_r \left\{ \frac{5 + \sin^2 \theta_\kappa}{3 \cos^2 \theta_\kappa} \right\} L = \bar{\varepsilon}_r \left\{ \frac{5 + 6p^2}{3} \right\} L, \quad (29)$$

Б) приближенное равенство в (29) может быть реализовано только для вариации $\delta y(x)$, описанной выше: почти везде максимальной по величине одного знака, и максимальной по величине противоположного знака в окрестности $x = L$.

Из (29) следует, что для небольших углов θ_κ при ограничении радиальной вариации поверхности в пределах $\pm 1\%$ (R_m) величина изменения положения центра давления δx_f может достигать (и не более) $\approx \pm 1,67\%$ (L). С увеличением θ_κ возможное относительное изменение δx_f (29) также возрастает, например, для $\theta_\kappa = 20^\circ$ до $\approx \pm 1,93\%$ (L).

Обсуждение, проверка и сравнение результатов

Корректность полученных аналитических выражений (18), (20), (21), (25), (26) строго в классе острых конусов подтверждена путем анализа тестовых примеров для двух возможных типов линейных вариаций поверхности

а) $\delta y(x) = \varepsilon_r = const$;

б) $\delta y(x) = \varepsilon_\theta \cdot x$;

и их линейной комбинации. Первая сводится к изменению линейного масштаба, вторая – к изменению угла конуса. В качестве критерия использована степень соответствия результатов аналитических оценок δx_f зависимости (16). Для вариаций типа (а) в пределах 1% (R_m) соответствие абсолютное, для (б) – до 3 – 4 значащих цифр.

Оценка корректности полученных аналитических результатов для тел близких по форме острому конусу проводилась путем сравнения с результатами численных расчетов по методике и программе [15], на основе решения невязких уравнений Эйлера для моделей совершенного и равновесно диссоциированного воздуха. В таблице 1 приведены полученные численные значения параметра $\tilde{\Phi}$ для совершенного газа с показателем адиабаты $k = 1,4$ для числа Маха $M_\infty = 30$ для нескольких значений угла острого конуса θ_κ .

Таблица 1 – Значения параметра $\tilde{\Phi}$

$\theta_\kappa \setminus M_\infty$	30	Формулы (13), (24)
5°	11,05	11,08
10°	5,00	4,99

20°	1,53	1,46
-----	------	------

Соответствие значений параметра $\tilde{\Phi}$, полученных на основе прямого численного расчета и с использованием (13), приведенных в таблице 1, следует рассматривать как вполне удовлетворительное.

Погрешность оценок максимально-возможных смещений положения центра давления острых конусов с использованием параметра $\tilde{\Phi}$ из таблицы 1 и формул (18 – 22) относительно прямого численного расчета, для малых вариаций поверхности описанного выше вида, для ограничительной функции $\psi(x) = 1$, не превышает $\sim 5\%$ (δx_f).

Полученные оценки, по-видимому, можно использовать в качестве характерного линейного масштаба при определении возможных изменений положения центра давления при малых углах атаки не только для острого конуса с малыми вариациями поверхности произвольного вида, но и для слабо затупленных конусов с отношением радиуса притупления к полной длине порядка $\sim 0,01$ и менее.

С целью иллюстрации эффективности разработанной методики получения оценок вариаций положения центра давления острого конуса с малыми вариациями поверхности приведем сравнение полученных результатов на основе различных подходов для конуса с $\theta_{\kappa} = 10^{\circ}$. Ограничим радиальные вариации его поверхности величиной $\pm 1\%$ текущего радиуса, то есть выберем ограничительную функцию в виде

$$\psi(x) = 0,01 \cdot x \cdot \tan \theta_{\kappa}, \quad (30)$$

исходное положение центра давления в соответствии с (16) равно $x_f = 0,68739(L)$.

Если задача увеличения x_f с учетом (16) решается только за счет увеличения θ_k в допустимых пределах (30) [16], то приращение $\Delta x_f = 0,00042(L)$; если же допустимая вариация поверхности построена как описано выше, то приращение $\Delta x_f \approx 0,0137(L)$, то есть \sim в 30 раз больше.

Выводы

1. Показано, что первая вариация смещения центра давления δx_f острого конуса при заданной слабой вариации его поверхности при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании под малыми углами атаки зависит от двух безразмерных параметров: угла конуса θ_k и отношения производных $\tilde{\Phi} = \left(\frac{\Phi_{tt}}{\Phi_t} \right)$ коэффициента давления на его поверхности.

2. Получена интегральная зависимость вариации δx_f острого конуса от вариации поверхности $\delta y(x)$ и указанных выше параметров.

3. Получена интегральная зависимость нормы вариации δx_f острого конуса при заданной ограничительно-нормирующей функции $\psi(x)$ множества допустимых вариаций поверхности конуса $\delta y(x)$, позволяющей оценивать масштаб возможных вариаций δx_f в условиях неопределенности вида $\delta y(x)$.

4. Указан способ определения качественного вида вариации поверхности острого конуса, обеспечивающей реализацию близкой максимально-возможной вариации δx_f при заданном ограничении вариации $\delta y(x)$.

5. Проведено сравнение результатов определения величин приращений Δx_f для острого конуса с $\theta_k = 10^\circ$ при заданном ограничении допустимых вариаций поверхности на основе различных подходов. Показано, что предложенная в работе методика позволяет получать существенно большие величины вариаций δx_f .

Библиографический список

1. Липницкий Ю.М., Красильников А.В., Покровский А.Н., Шманенков В.Н. Нестационарная аэродинамика баллистического полета. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 176 с.
2. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. – М.: Высшая школа, 1976. Ч. I. – 384 с.
3. Лунев В.В. Гиперзвуковая аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
4. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Данилов А.Н., Захарченко В.Ф. Аэродинамика ракет. – М.: Высшая школа, 1968. – 772 с.
5. Голубев А.Г., Калугин В.Т., Луценко А.Ю. и др. Аэродинамика. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 687 с.
6. Аржанников Н.С., Садекова Г.С. Аэродинамика летательных аппаратов. – М.: Высшая школа, 1983. – 359 с.

7. Швец А.И. Аэродинамика сверхзвуковых форм. - М.: Изд-во Московского университета, 1987. – 208 с.
8. Мокин Ю.А., Киселев В.И. Оценка вариаций положения центра давления за счет малого изменения формы затупленных тел вращения при их гиперзвуковом обтекании // Материалы 66-й научной конференции «Наука ЮУрГУ», Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2014. С. 1719 – 1727.
9. Мокин Ю.А. О возможностях решения задач гиперзвуковой аэродинамики на основе дифференциальной формы представления обобщенной гипотезы локальности и ее композиции с точными численными методами // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 2 (51). С. 136 – 145.
10. Васильев Л.М., Галактионов А.Ю. Об одном подходе к количественной и качественной оценке реализуемости проектов создания гиперзвуковых летательных аппаратов в части аэромеханики // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69597>
11. Ерохин А.П., Денискин Ю.И. Общие подходы к мультипликации по теоретическому контуру параметрических моделей авиационных конструкций // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41472>
12. Мокин Ю.А. Оценка изменения положения центра давления сферы за счет малого изменения формы ее передней части при сверхзвуковом и гиперзвуковом обтекании // Материалы 67-й научной конференции «Наука ЮУрГУ», Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2015. С. 1691 - 1700.
13. Мокин Ю.А. Оценка возможных изменений положения центра давления острого конуса за счет малого изменения формы при сверхзвуковом и

гиперзвуковом обтекании. // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПП'2017), Алушта, 24-31 мая 2017, С. 513 – 515.

14. Никольский А.А. О параметризации контура аэродинамического профиля сплайном // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40253>

15. Пахомов Ф.М., Булыгин М.Г., Гольдин В.Д., Мокин Ю.А. Аэродинамика длинных тонких конусов с асимметричной формой затупления // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 4 (9). С. 85 - 92.

16. Дегтярь В.Г., Пегов В.И. Аналитическое представление аэродинамических характеристик летательных аппаратов сложной формы. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. - 52 с.