

Исследования устойчивости движения геофизической капсулы на тросовой подвеске

© С.Д. Саленко, Ю.А. Гостеев, Д.А. Красноруцкий

НГТУ, Новосибирск, 630073, Россия

Применены экспериментальные, аналитические и численные методы при исследовании устойчивости бокового движения геофизической капсулы на тросовой подвеске. Для стабилизации капсулы использовалось вертикальное оперение (ВО) варьируемой площади. При этом также изменяли длину троса. В физическом эксперименте и численным моделированием выявлены две зоны устойчивого движения на плоскости параметров «скорость — относительная площадь ВО», соответствующие низким и высоким скоростям движения. Границы этих зон находятся в хорошем количественном соответствии, а левая граница, соответствующая низким скоростям движения капсулы, достаточно точно предсказывается и аналитической моделью. Аналитическим методом исследована устойчивость капсулы на плоскости параметров «скорость — длина троса». Установлено, что зона устойчивого движения сокращается при увеличении длины троса. Показано, что с увеличением относительной площади вертикального оперения в 4 раза критическая скорость капсулы снижается в 3 раза.

Ключевые слова: динамика груза на подвеске, устойчивость по Ляпунову, стержневая система, численные расчеты, эксперимент

Введение. При проведении аэрогеофизических исследований часто возникает необходимость выноса датчиков из зоны сильного электромагнитного влияния самолета- или вертолета-носителя. Для этого используют капсулы в виде оперенного тела вращения, подвешенные под носителем на тросе. Такие системы подвержены автоколебаниям при неблагоприятных комбинациях геометрических, аэродинамических и массовых параметров [1–5]. В статье [6] предложен достаточно универсальный подход к построению общей математической модели системы «вертолет—груз на внешней подвеске» как не свободной системы двух тел со связью, которую обеспечивает система подвески груза к вертолету. В работе [7] изложено математическое описание движения груза на внешней подвеске вертолета с учетом сил инерции, возникающих при ускоренном перемещении точки подвеса. Статья [8] посвящена особенностям численного интегрирования дифференциальных уравнений динамики груза на внешней подвеске вертолета при условии, что груз и трос рассматриваются как отдельные тела с помощью упругой связи. В этом случае могут появляться паразитные (нефизичные) ускорения, для устранения которых в [8] предложен итерационный алгоритм.

По результатам проведенных динамических и весовых испытаний контейнеров на внешней подвеске летательных аппаратов (ЛА)

при дозвуковых скоростях движения выбрана система стабилизации, обеспечивающая устойчивое обтекание [9]. Получены аэродинамические характеристики моделей контейнеров в широком диапазоне изменения углов атаки и скольжения. В статье [10] рассмотрена математическая модель динамики и аэродинамики контейнера на внешней подвеске ЛА, позволяющая моделировать его движение в пространстве. Численное моделирование дозвукового отрывного обтекания контейнера проведено с помощью метода контрольных объемов. Выбрана система стабилизации, позволяющая уменьшить амплитуду раскачки контейнера до допустимого предела. В работах [11, 12] устойчивость капсулы исследована на основе динамики системы тонких упругих стержней.

Задача данной работы — комплексное исследование устойчивости движения капсулы аналитическим, численным и экспериментальными методами, сравнение результатов.

Эксперименты со схематизированной моделью капсулы проводились в аэродинамической трубе Т-503 кафедры аэрогидродинамики НГТУ.

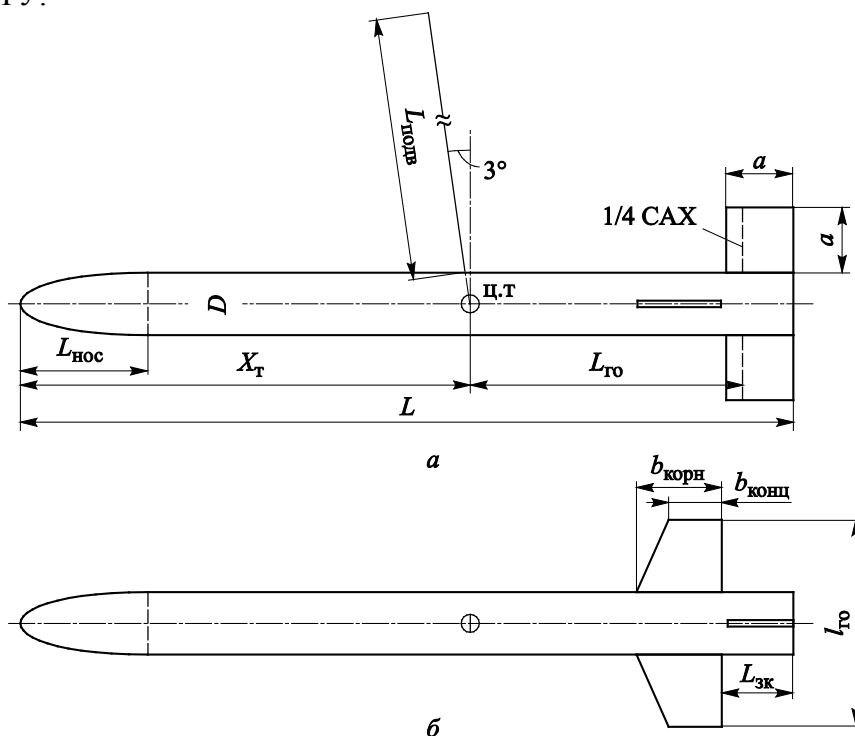


Рис. 1. Геометрическая схема модели:
a — вид сбоку; *b* — вид сверху; ц.т. — центр тяжести модели

Модель капсулы, геометрическая схема которой показана на рис. 1, имела длину $L = L_{ref} = 920$ мм, диаметр $D = 80$ мм, массу $m = 1,65$ кг. За характерную площадь принималась площадь миделевого сечения

корпуса ($S_{ref} = \pi D^2 / 4 = 0,00503 \text{ м}^2$). Для стабилизации капсулы использовались вертикальное оперение (ВО) — квадратные в плане консоли с хордой $a = 40$ мм (ВО № 1), 60 мм (ВО № 2) и 80 мм (ВО № 3), относительная площадь $\bar{S}_{BO} = S_{BO} / S_{ref} = 0,637, 1,44$ и $2,55$ соответственно.

Модель подвешивалась в центре рабочей части (РЧ) трубы на тросе длиной $L_{тр} = 0,6 \dots 1,8$ м и могла совершать колебания под воздействием внешних начальных возмущений и потока (рис. 2). Колебания модели фиксировались кинокамерой и подвергались цифровой обработке.

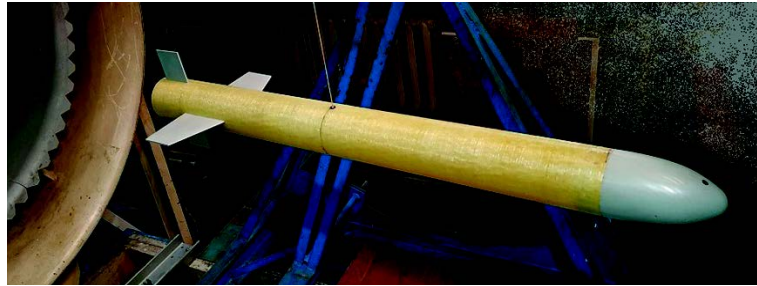


Рис. 2. Общий вид модели капсулы в рабочей части трубы Т-503

Аналитическое исследование устойчивости. Оценка устойчивости по Ляпунову бокового движения капсулы осуществлялась с использованием гипотезы о разделении продольного и бокового движений на основе следующей линеаризованной системы уравнений:

$$m \frac{dV_z}{dt} = Z_a(\beta) + Z_a(\omega_y) - X_a \psi_c + G\gamma; \quad (1)$$

$$J_y \frac{d\omega_y}{dt} = M(\beta) + M(\omega_y); \quad (2)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_x = -\frac{V_z}{L_{mp}}; \quad (3)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega_y. \quad (4)$$

Здесь m и J_y — масса и момент инерции капсулы; обозначения кинематических параметров общепринятые;

$$\beta = \psi - \psi_c; \quad \psi_c = -V_z / V; \quad \gamma = -\frac{z}{L_{тр}};$$

$$\begin{aligned}
 Z_a(\beta) &= Z_a^\beta \beta; & Z_a^\beta &= c_{za}^\beta q S_{ref}; & q &= \frac{\rho V^2}{2}; \\
 Z_a(\omega_y) &= Z_a^{\omega_y} \omega_y; & Z_a^{\omega_y} &= c_{za}^{\omega_y} \frac{L_{ref}}{V} q S_{ref}; & \bar{\omega}_y &= \frac{\omega_y L_{ref}}{V}; \\
 X_a &= c_{xa} q S_{ref}; & G &= mg; & M(\beta) &= M_y^\beta \beta; & M_y^\beta &= m_y^\beta q S_{ref} L_{ref}; \\
 M(\omega_y) &= M_y^{\omega_y} \omega_y; & M_y^{\omega_y} &= m_y^{\omega_y} \frac{L_{ref}}{V} q S_{ref} L_{ref}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

С учетом кинематических связей (3), (4) и выражений для аэродинамических сил и моментов (5), уравнения (1) и (2) приводятся к виду

$$\ddot{\gamma} + C_1 \dot{\gamma} + C_2 \gamma + C_3 \dot{\psi} + C_4 \psi = 0; \tag{6}$$

$$J_y \ddot{\psi} + C_5 \dot{\psi} + C_6 \psi + C_7 \dot{\gamma} = 0, \tag{7}$$

где точкой сверху отмечено дифференцирование по времени; C_1, \dots, C_7 — коэффициенты, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{-X_a - Z_a^\beta}{mV}; & C_2 &= \frac{g}{L_{тр}}; & C_3 &= \frac{Z_a^{\omega_y}}{mL_{тр}}; \\
 C_4 &= \frac{Z_a^\beta}{mL_{тр}}; & C_5 &= -M_y^{\omega_y}; \\
 C_6 &= -M_y^\beta; & C_7 &= M_y^\beta \frac{L_{тр}}{V}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Характеристическое уравнение системы (6)–(7)

$$b_0 \lambda^4 + b_1 \lambda^3 + b_2 \lambda^2 + b_3 \lambda + b_4 = 0 \tag{9}$$

будет иметь все корни с отрицательной вещественной частью, если выполняются неравенства (критерий Гурвица для системы 4-го порядка):

$$\begin{cases} b_0 > 0, b_1 > 0, b_2 > 0, b_3 > 0; \\ b_3 b_2 b_1 - b_3^2 b_0 - b_1^2 b_4 > 0. \end{cases} \tag{10}$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 b_0 &= J_y; & b_1 &= C_5 + C_1 J_y; \\
 b_2 &= C_6 + C_1 C_5 + C_2 J_y - C_3 C_7; \\
 b_3 &= C_1 C_6 + C_2 C_5 - C_4 C_7; & b_4 &= C_2 C_6.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Условия (10) являются условиями устойчивости по Ляпунову бокового движения капсулы. Для оценки границ устойчивости проводился расчет корней характеристического многочлена λ_i и их максимальной вещественной части $\text{Re}(\lambda)_{\max} = \max_{1 \leq i \leq 4} \text{Re}(\lambda_i)$, строились изолинии и графики этой величины как функции скорости V полета ЛА, длины троса $L_{\text{тр}}$ и других параметров. Границей устойчивости является нулевая изолиния $\text{Re}(\lambda)_{\max} = 0$.

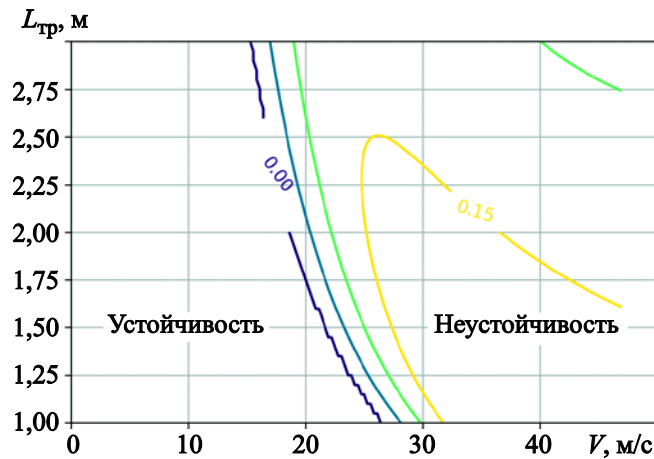


Рис. 3. Изолинии $\text{Re}(\lambda)_{\max}$ для случая ВО № 1

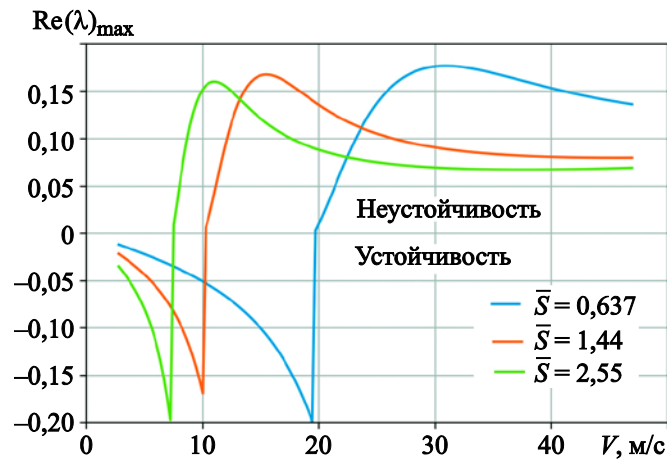


Рис. 4. Влияние относительной площади ВО на зависимость $\text{Re}(\lambda)_{\max}$ от скорости капсулы ($L_{\text{тр}} = 1,8$ м)

Изолинии $\text{Re}(\lambda)_{\max}$ как функции скорости капсулы и длины троса для случая ВО № 1 представлены на рис. 3. Увеличение относительной

площади ВО $\bar{S}_{\text{ВО}}$ приводит к смещению нулевой изолинии влево и к сокращению области устойчивости.

Влияние $\bar{S}_{\text{ВО}}$ на $\text{Re}(\lambda)_{\text{max}}$ как функцию скорости капсулы при длине троса $L_{\text{тр}} = 1,8$ м представлено на рис. 4, где видно, что оснащение ВО № 3 приводит к снижению критической скорости капсулы в 3 раза по сравнению с ВО № 1.

Численное исследование устойчивости. Для моделирования динамики движения схематизированной модели капсулы на гибкой сцепке использовалась модель тонкого упругого стержня [12, 13], система дифференциальных уравнений движения которого имеет следующий вид:

$$U_{i,\xi} = (1 + \varepsilon)x_{j,\xi}\lambda_{ji} - x_{i,\xi}; \quad \frac{\partial \lambda_{mn}}{\partial \omega_j} \frac{d\omega_j}{d\xi} \beta_{2m}\lambda_{kn}\beta_{3k} = \frac{M_p\beta_{1k}\lambda_{kp}}{EJ_1} s_{,\xi};$$

$$\frac{\partial \lambda_{mn}}{\partial \omega_j} \frac{d\omega_j}{d\xi} \beta_{3m}\lambda_{kn}\beta_{1k} = \frac{M_p\beta_{2k}\lambda_{kp}}{EJ_2} s_{,\xi};$$

$$\frac{\partial \lambda_{mn}}{\partial \omega_j} \frac{d\omega_j}{d\xi} \beta_{1m}\lambda_{kn}\beta_{2k} = \frac{M_p\beta_{3k}\lambda_{kp}}{GJ_k} s_{,\xi};$$

$$Q_{i,\xi} = \rho F(\xi)\ddot{U}_i s_{,\xi} - q_i(\xi, t)s_{,\xi}(1 + \varepsilon); \quad \varepsilon = \frac{x_{j,s}\lambda_{jk}Q_k}{EF}; \quad (12)$$

$$M_{i,\xi} = \rho J_n(\xi)\dot{\Omega}_n\beta_{nk}\lambda_{ki}s_{,\xi} + \left(-m_i(\xi, t)s_{,\xi} + \begin{matrix} +x_{j,\xi}\lambda_{jr}Q_r - x_{j,\xi}\lambda_{jp}Q_p \end{matrix} \right) (1 + \varepsilon), \quad \begin{cases} i = 1, 2, 3; \\ p = 2, 3, 1; \\ r = 3, 1, 2, \end{cases}$$

где ξ — безразмерный параметр, связанный с естественной координатой стержня s ; $U_{1,2,3}(\xi, t)$ — проекции перемещения каждой точки стержня на оси глобальной системы координат; $\omega_{1,2,3}(\xi, t)$ — глобальные проекции вектора конечного поворота (вектора Эйлера), который задает матрицу поворота $\lambda(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, описывающую ориентацию ортов главных осей поперечных сечений при деформировании, начальная позиция которых задана матрицами $\beta(\xi)$, а положение в пространстве — координатами $x_{1,2,3}(\xi)$; $Q_{1,2,3}(\xi, t)$, $M_{1,2,3}(\xi, t)$ — глобальные проекции вектора внутренних усилий и внутренних моментов; $q_{1,2,3}(\xi, t)$, $m_{1,2,3}(\xi, t)$ — распределенные нагрузки и моменты, действующие на стержень (в том числе аэродинамические силы);

точки означают дифференцирование по времени t ; ξ в нижнем индексе после запятой означает дифференцирование по этой переменной; EJ_1, EJ_2, GJ_k, EF — жесткости стержня на изгиб, кручение и растяжение—сжатие, $\rho J_{1,2,3}(\xi)$ — массовые моменты инерции; $\Omega_{1,2,3}$ — угловые скорости вокруг главных осей инерции, выражаются через λ и β .

В матричном виде система (12) записывается следующим образом:

$$\frac{d\mathbf{X}}{d\xi} = \mathbf{F}(\xi, \mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}), \quad (13)$$

где $\mathbf{X}(\xi, t) = \{U_{1,2,3}(\xi, t), \omega_{1,2,3}(\xi, t), Q_{1,2,3}(\xi, t), M_{1,2,3}(\xi, t)\}^T$ — вектор, состоящий из 12 функций, описывающих напряженно-деформированное состояние.

Матричное уравнение (13) является системой дифференциальных уравнений в частных производных. Для решения применяется метод прямого интегрирования Парка [14]: производные по времени аппроксимируются выражениями, содержащими саму функцию и несколько значений в предыдущие моменты времени. В итоге, в случае задачи статики и нелинейной динамики уравнение (13) сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка. Уравнение (13) совместно с краевыми условиями образуют нелинейную краевую задачу. Для получения численного решения применяется методика [15] в авторской имплементации [13], которая основана на методе конечных разностей (МКР) и итерационном методе Ньютона. По сравнению с методом пристрелки при решении краевой задачи МКР более устойчив к ошибкам, связанным с округлением чисел в ЭВМ. Такие проблемы, например, возникают в задачах деформирования весьма длинных стержней (проводов, тросов).

Для оценки устойчивости движения модели капсулы при разных скоростях полета применяется динамический метод, заключающийся в оценке вещественной и мнимой составляющей частоты малых колебаний относительно достигнутого состояния равновесия. Уравнения таких колебаний получаются путем линеаризации уравнений для близкого к (13) равновесного состояния и имеют следующий вид:

$$\frac{d\Delta\mathbf{X}}{d\xi} = \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}\Delta\mathbf{X} + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\dot{\mathbf{X}}}\Delta\dot{\mathbf{X}} + \frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\ddot{\mathbf{X}}}\Delta\ddot{\mathbf{X}}, \quad (14)$$

где $\Delta\mathbf{X}(\xi, t) = \{\Delta U_{1,2,3}(\xi, t), \Delta\omega_{1,2,3}(\xi, t), \Delta Q_{1,2,3}(\xi, t), \Delta M_{1,2,3}(\xi, t)\}^T$, $\Delta U_{1,2,3}$, $\Delta\omega_{1,2,3}$, $\Delta Q_{1,2,3}$, $\Delta M_{1,2,3}$ — глобальные проекции векторов приращений перемещений, поворотов, внутренних усилий и моментов при малых колебаниях.

В задаче о малых колебаниях относительно достигнутого статического состояния равновесия решение отыскивается в экспоненциальном виде:

$$\Delta \mathbf{X}(\xi, t) = \Delta \mathbf{X}^A(\xi) \cdot \exp(i\omega t). \quad (15)$$

Форма решения (15) предполагает, что частота собственных колебаний в общем случае представляется как комплексное число $\omega = \alpha + i\beta$, тогда

$$\Delta \mathbf{X}(\xi, t) = \Delta \mathbf{X}^A(\xi) \cdot \exp(i\alpha t) \exp(-\beta t), \quad (16)$$

где α — частота гармонических колебаний; β обеспечивает рост или демпфирование колебаний.

В литературе по динамике часто используется другое обозначение множителя перед временем t в решении (15):

$$\lambda = i\omega,$$

тогда $\operatorname{Re}(\lambda) < 0$ соответствует затуханию малых возмущений (устойчивость), $\operatorname{Re}(\lambda) > 0$ — росту малых колебаний (неустойчивость), $\operatorname{Re}(\lambda) = 0$ — безразличному состоянию. Неустойчивость при $\operatorname{Re}(\lambda) > 0$ подразделяется на два типа: при $\operatorname{Im}(\lambda) \neq 0$ — динамическая типа «флаттер», $\operatorname{Im}(\lambda) = 0$ — апериодическая статическая неустойчивость типа «дивергенция».

Подставив (15) в (14), для амплитуд сохраним прежнее обозначение без верхнего индекса «А»:

$$\frac{d\Delta \mathbf{X}}{d\xi} = \left[\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} + i\omega \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \dot{\mathbf{X}}} - \omega^2 \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \ddot{\mathbf{X}}} \right] \Delta \mathbf{X}. \quad (17)$$

Для замыкания системы (17) необходимо добавить краевые условия в начале и конце стержня:

$$\mathbf{G}_1(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{G}_2(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}) = \mathbf{0}. \quad (18)$$

Для решения применяется МКР, уравнения (17) совместно с краевыми условиями (18) записываются в виде квадратичной обобщенной проблемы собственных значений:

$$(\mathbf{A} + i\omega \mathbf{B} - \omega^2 \mathbf{C}) \mathbf{x} = \mathbf{0}. \quad (19)$$

Для решения (19) введем тождественное обозначение

$$\omega \mathbf{x} = \tilde{\mathbf{x}}. \quad (20)$$

После подстановки обозначения (20), умноженного слева на матрицу \mathbf{C} в (19), получим:

$$\{\mathbf{Ax} + i\omega\mathbf{Bx} - \omega\mathbf{Cx}\} = \mathbf{0}; \quad \omega\mathbf{Ix} = \mathbf{I}\dot{\mathbf{x}}, \quad (21)$$

где \mathbf{I} — единичная матрица.

Запишем уравнения (21) в матричной форме:

$$\left(\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{array} \right] - \omega \left[\begin{array}{c|c} -i\mathbf{B} & \mathbf{C} \\ \hline \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{array} \right] \right) \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix} = \mathbf{0}, \quad \text{или} \quad (\bar{\mathbf{A}} - \omega\bar{\mathbf{B}})\mathbf{Z} = \mathbf{0}, \quad (22)$$

где $\bar{\mathbf{B}}$ — комплексная матрица.

Полученная комплексная обобщенная проблема решается с помощью пакета подпрограмм с открытым исходным кодом ARPACK, процедура `znaupd`.

Результаты решения обобщаются на случай нескольких стержней. Рассмотрим систему n стержней, для i -го стержня будем иметь обобщенную проблему типа (19):

$$(\mathbf{A}_{ii} + i\omega_i\mathbf{B}_{ii} - \omega_i^2\mathbf{C}_{ii})\mathbf{x}_i = \mathbf{0}. \quad (23)$$

Условия сочленения стержней сформируют матрицы \mathbf{A}_{ij} , \mathbf{B}_{ij} , \mathbf{C}_{ij} , $i \neq j$, тогда можно записать обобщенную проблему для системы стержней:

$$\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}} + i\omega\tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{x}} - \omega^2\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{0}, \quad (24)$$

где $\tilde{\mathbf{A}}$, $\tilde{\mathbf{B}}$, $\tilde{\mathbf{C}}$ — блочные матрицы, состоящие из \mathbf{A}_{ij} , \mathbf{B}_{ij} и \mathbf{C}_{ij} соответственно; $\tilde{\mathbf{x}}$ — вектор, состоящий из \mathbf{x}_i .

Квадратичная проблема (24), аналогично (22), приводится к матричной обобщенной проблеме собственных значений.

Используемая математическая модель позволяет учитывать широкий спектр нагрузок различной природы: инерционные (в том числе от протекающей внутри шланга жидкости, сосредоточенные и распределенные массы с эксцентриситетом), распределенные и сосредоточенные силы и моменты, «мертвые» и следящие нагрузки, аэродинамические, силы внутреннего и внешнего трения, температурное деформирование, динамическое взаимодействие с внешними редуцированными конечно-элементными моделями [12]. Для учета внутреннего трения реализована модель гистерезисных потерь [16]. Перемещения и повороты при деформировании и движении не ограничены, могут быть более 2π .

Модель капсулы представляет собой стержневую систему, внешний вид которой в постпроцессоре программы DARSYS [12] имеет вид, изображенный на рис. 5 (внешние аэродинамические обводы в рамках данной работы служат только для визуализации).

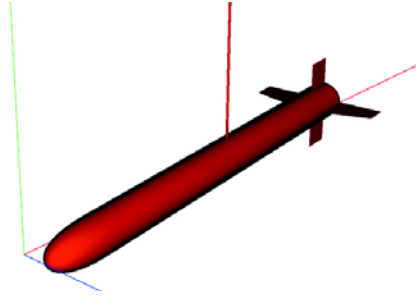


Рис. 5. Внешний вид стержневой модели капсулы

Для расчета сопряженной задачи деформирования (движения) стержневой системы (представляющей капсулу) в потоке воздуха использовались следующие формулы для аэродинамических сил и моментов, приведенных к центрам масс:

$$\begin{aligned} X_a &= \left[c_{x0} + \sqrt{(A \cdot \alpha^2)^2 + (B \cdot \beta^2)^2} \right] q S_{ref}; \\ Y_a &= \left[c_{ya0} + c_{ya}^\alpha \alpha \right] q S_{ref}; \\ Z_a &= \left[c_{za}^\beta \beta + c_{za}^{\bar{\omega}_y} \left(\omega_y \frac{L_{ref}}{V} \right) \right] q S_{ref}; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} M_x &= \left[m_x^\beta \beta + m_x^{\bar{\omega}_x} \left(\omega_x \frac{L_{ref}}{V} \right) + m_x^{\bar{\omega}_y} \left(\omega_y \frac{L_{ref}}{V} \right) \right] q L_{ref} S_{ref}; \\ M_y &= \left[m_y^\beta (\alpha) \beta + m_y^{\bar{\omega}_x} \left(\omega_x \frac{L_{ref}}{V} \right) + m_y^{\bar{\omega}_y} \left(\omega_y \frac{L_{ref}}{V} \right) \right] q L_{ref} S_{ref}; \\ M_z &= \left[m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\bar{\omega}_z} \left(\omega_z \frac{b_{cax}}{V} \right) + m_z^{\bar{\alpha}} \left(\dot{\alpha} \frac{b_{cax}}{V} \right) \right] q b_{cax} S_{ref}, \end{aligned} \quad (26)$$

где $q = \frac{\rho V^2}{2}$ — скоростной напор; S_{ref} — характерная площадь; L_{ref} — характерный размер (размах крыла); b_{cax} — средняя аэродинамическая хорда; α — угол атаки; β — угол скольжения; ω_x , ω_y , ω_z — угловые скорости крена, рыскания и тангажа, соответственно.

Результаты численного исследования устойчивости капсулы по формулам (15)–(24) (при длине троса $L_{тр} = 1,8$ м) для сравнения с опытными данными и теоретическим расчетом приведены на рис. 6, на котором видно, что область устойчивости капсулы двухсвязная — состоит из двух зон, разделенных зоной неустойчивости.

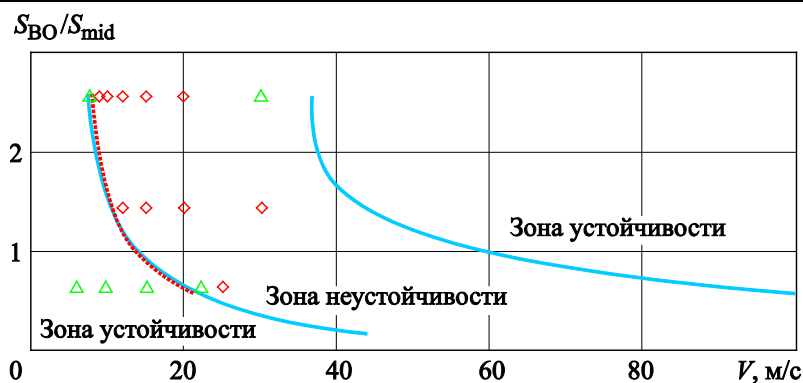


Рис. 6. Зоны устойчивости и неустойчивости капсулы в потоке:
 — граница зон (расчет); \triangle — устойчивость (эксперимент);
 \diamond — неустойчивость (эксперимент); — граница зоны (аналитика)

Заключение. Проведено исследование устойчивости движения геофизической капсулы на тросовой подвеске аналитическим, численным и экспериментальным методами. Численным моделированием выявлена двухсвязность области устойчивости, состоящей из двух зон (низких и высоких скоростей полета), разделенных зоной неустойчивости. Границы области устойчивости находятся в хорошем количественном соответствии с экспериментальными данными.

Левая граница области устойчивости, соответствующая низким скоростям движения капсулы, достаточно точно предсказывается аналитической моделью. При уменьшении относительной площади ВО зона неустойчивости расширяется вправо, в область высоких скоростей полета капсулы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Володко А.М., Серов А.Я. Движение несущего тела с грузом на внешней подвеске. *Известия АН СССР. Механика твердого тела* 1988, № 1, с. 12–15.
- [2] Козловский В.Б., Кубланов М.С. Математическая модель полета вертолета с грузом на внешней подвеске. *Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность*, 2004, № 72, с. 5–9.
- [3] Козловский В.Б., Паршенцев С.А., Ефимов В.В. *Вертолет с грузом на внешней подвеске*. Москва, Машиностроение / Машиностроение–Полет, 2008, 304 с.
- [4] Ефимов В.В. Динамическая устойчивость груза на тросовой внешней подвеске вертолета. *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*, 2011, № 3, с. 26–32.
- [5] Серебряков П.Н. *Исследование возможностей повышения стабилизации характерных грузов, транспортируемых вертолетами на внешней подвеске*. Дис. ... канд. техн. наук. Рига, 1985, 163 с.
- [6] Свириденко А.Н. Математическая модель системы «вертолет–груз на внешней подвеске». *Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность*, 2007, № 111, с. 129–134.

- [7] Ефимов В.В. Математическое описание движения груза на внешней подвеске вертолета. *Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность*, 2007, № 111, с. 121–128.
- [8] Ефимов В.В. Особенности интегрирования дифференциальных уравнений движения груза на внешней подвеске вертолета. *Научный вестник МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность*, 2009, № 138, с. 134–141.
- [9] Калугин В.Т., Киндяков Е.Б., Луценко А.Ю., Столярова Е.Г. Аэродинамическая стабилизация грузов на внешней подвеске летательных аппаратов. *Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Аэромеханика и прочность»*, 2007, № 111, с. 100–104.
- [10] Калугин В.Т., Киндяков Е. Б., Столярова Е.Г. Обтекание и стабилизация контейнерных устройств на внешней подвеске летательных аппаратов. *Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Аэромеханика и прочность»*, 2007, № 111, с. 105–109.
- [11] Пустовой Н.В., Левин В.Е., Саленко С.Д., Красноруцкий Д.А. О задаче устойчивости движения капсулы магнитометра на тросе в потоке воздуха. *Решетневские чтения: материалы 15-й Междунар. науч. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракет.-косм. систем акад. М.Ф. Решетнева: в 2 ч.* Красноярск, Сиб. гос. аэрокосм. ун-т им. М.Ф. Решетнева, 2011, ч. 1, 427 с.
- [12] Красноруцкий Д.А., Лакиза П.А., Шелевая Д.Р. Программный комплекс для моделирования механики системы тонких упругих стержней. *Краевые задачи и математическое моделирование: темат. сб. науч. ст.* Новокузнецк, Изд-во КГПИ КемГУ, 2023, с. 57–60.
- [13] Пустовой Н.В., Левин В.Е., Красноруцкий Д.А. Алгоритм численного решения нелинейной краевой задачи динамического деформирования тонкого стержня. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*, 2014, № 2, с. 168–199.
- [14] Park K.C. An improved stiffly stable method for direct integration of nonlinear structural dynamic equations. *ASME J. of Applied Mechanics*, 1975, vol. 42 (2), pp. 464–470. DOI:10.1115/1.3423600
- [15] Pereyra V. High Order Finite Difference Solution of Differential Equations. *Stanford Univ. Comp. Sci. Report STAN-CS-73-348*, 1973, 86 p.
- [16] Гоздек В.С. О модели материала с внутренним трением. *Ученые записки ЦАГИ*, 1982, том XIII, № 2, с.142–146.

Статья поступила в редакцию 20.10.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Саленко С.Д., Гостеев Ю.А., Красноруцкий Д.А. Исследования устойчивости движения геофизической капсулы на тросовой подвеске. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2318>

Саленко Сергей Дмитриевич — д-р техн. наук, заведующий кафедрой аэрогидродинамики, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), профессор. Область научных интересов: динамика полета, аэроупругость мостов и промышленных конструкций. e-mail: salenko@corp.nstu.ru

Гостеев Юрий Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра аэрогидродинамики, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: математическое моделирование в механике жидкости и газов. e-mail: gosteev@corp.nstu.ru

Красноруцкий Дмитрий Александрович — канд. техн. наук, доцент, кафедра прочности летательных аппаратов, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: численное моделирование механики стержневых систем и оболочек. e-mail: krasnorutskiy@corp.nstu.ru

Studying stability of the geophysical capsule motion on a cable suspension

© S.D. Salenko, Yu.A. Gosteev, D.A. Krasnorutsky

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russia

The paper presents a study of the lateral motion stability of a geophysical capsule on the cable suspension using experimental, analytical and numerical methods. The variable area vertical tail (VT) was used to stabilize the capsule. The cable length was also varying. Physical experiment and numerical simulation were introduced to identify two zones of stable motion in the “speed – VT relative area” parameters plane corresponding to the low and high motion speed. Those zone boundaries were in good quantitative agreement; and the left boundary corresponding to the capsule low velocities was also quite accurately predicted by the analytical model. Capsule stability in the “speed – cable length” parameters plane was studied using the analytical method. Decrease in the stable motion zone was established with the increasing cable length. It was shown that an increase in the vertical tail relative area by 4 times led to a decrease in the capsule critical speed by 3 times.

Keywords: *suspended load dynamics, Lyapunov stability, rod system, numerical calculation, experiment*

REFERENCES

- [1] Volodko A.M., Serov A.Ya. Dvizhenie nesushchego tela s gruzom na vneshney podveske [Motion of a supporting body with a load on the external suspension]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela — Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Mechanics of Solids*, 1988, no. 1, pp. 12–15.
- [2] Kozlovsky V.B., Kublanov M.S. Matematicheskaya model poleta vertoleta s gruzom na vneshney podveske [Mathematical model of the helicopter flight with the externally suspended load]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies. Ser. Aeromechanics and Strength*, 2004, no. 72, pp. 5–9.
- [3] Kozlovsky V.B., Parshentsev S.A., Efimov V.V. *Vertolet s gruzom na vneshney podveske* [Helicopter with cargo on the external sling]. Moscow, Mashinostroenie—Polet Publ., 2008, 304 p.
- [4] Efimov V.V. Dinamicheskaya ustoychivost gruzha na trosovoy vneshney podveske vertoleta [Investigation of the Dynamic Stability of Cargo on the Helicopter External Sling]. *Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal “Polet” —All-Russian Scientific-Technical Journal “Polet” (Flight)*, 2011, no. 3, pp. 26–32.
- [5] Serebryakov P.N. *Issledovanie vozmozhnostey povysheniya stabilizatsii kharakternykh gruzov, transportiruemykh vertoletami na vneshney podveske: Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research on the possibilities of increasing stabilization of typical loads transported by helicopters on the external sling: Diss. Cand. Sc. (Eng.)]. Riga, 1985, 163 p.
- [6] Sviridenko A.N. Matematicheskaya model sistemy “vertolet-gruz” na vneshney podveske [Math model for the “helicopter-external load dynamic system]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies. Ser. Aeromechanics and Strength*, 2007, no. 111, pp. 129–134.

- [7] Efimov V.V. Matematicheskoe opisaniye dvizheniya gruzha na vneshney podveske vertoleta [The mathematical description of the cargo motion on the helicopter external sling]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies. Ser. Aeromechanics and Strength*, 2007, no. 111, pp. 121–128.
- [8] Efimov V.V. Osobennosti integrirovaniya differentsialnykh uravneniy dvizheniya gruzha na vneshney podveske vertoleta [Features of the differential equations integration of the cargo movement on the helicopter external sling]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies. Ser. Aeromechanics and Strength*, 2009, no. 138, pp. 134–141.
- [9] Kalugin V.T., Kindyakov E.B., Lutsenko A.Yu., Stolyarova E.G. Aerodinamicheskaya stabilizatsiya gruzov na vneshney podveske letatelnykh apparatov [Aerodynamic stabilization of cargo on the aircraft external sling]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies. Ser. Aeromechanics and Strength*, 2007, no. 111, pp. 100–104.
- [10] Kalugin V.T., Kindyakov E.B., Stolyarova E.G. Obtekanie i stabilizatsiya konteynernykh ustroystv na vneshney podveske letatelnykh apparatov [Flow around and stabilization containers on an external suspension of flying vehicles]. *Nauchnyi vestnik MGTU GA. Ser. Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies. Ser. Aeromechanics and Strength*, 2007, no. 111, pp. 105–109.
- [11] O zadache ustoychivosti dvizheniya kapsuly magnitometra na trose v potoke vozdukhha [On the problem of stability of a magnetometer capsule motion on a cable in the air flow]. In: *Reshetnevskie chteniya: materialy 15 mezhdunar. nauch. konf., posvyashch. pamyati gener. konstruktora raket.-kosm. sistem akad. M.F. Reshetneva: v 2 ch.* [Reshetnev readings: materials of the 15th international scientific conference dedicated to memory of the rocket and space systems General Designer Academician M.F. Reshetnev: in 2 parts]. Krasnoyarsk, Sib. Gos. Aerokosm. Un-t im. M.F. Reshetneva Publ., 2011, part 1, 427 p.
- [12] Krasnorutsky D.A., Lakiza P.A., Shelevaya D.R. Programmnyi kompleks dlya modelirovaniya mekhaniki sistem tonkikh uprugikh sterzhney [A software package for modeling mechanics of a system of thin elastic rods]. In: *Kraevye zadachi i matematicheskoe modelirovanie: temat. sb. nauch. st.* [Boundary problems and mathematical modeling: thematic collection of scientific articles]. Novokuznetsk, Izd-vo KGPI KemGU Publ., 2023, pp. 57–60.
- [13] Pustovoy N.V., Levin V.E., Krasnorutsky D.A. Algoritm chislennoy resheniya nelineynoy kraevoy zadachi dinamicheskogo deformirovaniya tonkogo sterzhnya [The numerical algorithm for solving nonlinear boundary problem of thin rod's dynamic deformation]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika — Perm National Research Polytechnic University Mechanics Bulletin*, 2014, no. 2, pp. 168–199.
- [14] Park K.S. An Improved Stiffly Stable Method for Direct Integration of Nonlinear Structural Dynamic Equations. *ASME J. of Applied Mechanics*, 1975, vol. 42 (2), pp. 464–470. <https://doi.org/10.1115/1.3423600>
- [15] Pereyra V. High order finite difference solution of differential equations. *Stanford Univ. Comp. Sci. Report STAN-CS-73-348*, 1973, 86 p.
- [16] Gozdek V.S. O modeli materiala s vnutrennim treniem [About a model of material with internal friction]. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 1982, vol. XIII, no. 2, pp. 142–146.

Salenko S.D., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Aerohydrodynamics, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Scientific interests: flight dynamics, aeroelasticity of bridges and industrial structures. e-mail: salenko@corp.nstu.ru

Gosteev Yu.A., Cand. Sc. (Phys.-Math), Associate Professor, Department of Aerohydrodynamics, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Scientific interests: mathematical simulation in liquids and gases mechanics. e-mail: gosteev@corp.nstu.ru

Krasnorutsky D.A., Cand. Sc. (Eng), Associate Professor; Department of Aircraft Strength, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Scientific interests: numerical simulation of the rod systems and shells mechanics. e-mail: krasnorutskiy@corp.nstu.ru