

УДК 539.379

doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-62-73

## Двухмассовая газовая гирочастица как инструмент анализа сверхзвуковой аэроупругости

**С.В. Аринчев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## A Two-Mass Gyro-Particle as a Tool for Supersonic Aeroelasticity Analysis

**S.V. Arinchev**

Bauman Moscow State Technical University

При достижении большой сверхзвуковой скорости полета летательного аппарата в потоке появляется плазма. Это затрудняет использование традиционной «поршневой» теории и ее модификаций для решения задачи аэроупругости. Предложено моделировать поток системой двухмассовых газовых гирочастиц, способных разделяться на два заряда и ионизировать поток. Двухмассовая газовая гирочастица имеет упругие элементы и две пары кратных частот колебаний. В результате взаимодействия с обтекаемой поверхностью упругой конструкции гирочастица раскручивается, начинает пульсировать. Кратные частоты колебаний расщепляются. Как только частота пульсаций газовой гирочастицы достигает частоты собственных колебаний упругой конструкции, наступает резонанс. Это флаттер. Принято, что сверхзвуковой характер обтекания определяется не скоростью движения летательного аппарата, а частотой вращения газовых гирочастиц. Чем она больше, тем значительнее аэродинамическое сопротивление. Если частота вращения газовых гирочастиц достаточно велика, то имеет место «эффект экранирования»: летательный аппарат тормозится и опрокидывается. Это дивергенция. Наличие плазмы не учитывается. С помощью двухмассовой гирочастицы предложена 2D-интерпретация флаттера и дивергенции.

**Ключевые слова:** сверхзвуковая аэроупругость, газовая гирочастица, расщепление частоты колебаний

When a flying vehicle reaches a high supersonic speed, plasma occurs in the flow, hampering the application of the traditional piston theory and its modifications to solve the aeroelasticity problem. This work considers flow modelling using a system of two-mass gas gyro-particles capable of dividing into two charges and ionizing the flow. The two-mass gas gyro-particle has two elements and two pairs of multiple frequencies. As the gyro-particle interacts with the surface of an elastic body, it starts to rotate and pulsate, and the multiple frequencies split. As the pulsation frequency of the gas gyro-particle reaches the natural oscillation frequency of the elastic structure, resonance occurs and the structure flutters. It is assumed that the supersonic character of the flow is determined not by the velocity of the flying vehicle, but by the rotational frequency of the gas gyro-particle. The higher the particle's rotational frequency, the higher the aerodynamic drag. If the rotational frequency is high enough, then the screening effect takes place: the vehicle decelerates and turns upside down. This is called divergence, and the plasma is not taken into account. In this work, a 2D model is used to interpret the flutter and the divergence effects.

**Keywords:** supersonic aeroelasticity, gas gyro-particle, multiple-frequency splitting

**Постановка задачи.** Рассмотрено обтекание упругого тела (УТ) газом с большой сверхзвуковой скоростью. С одной стороны, с увеличением скорости движения летательного аппарата поверхность фронта скачка уплотнения приближается к обтекаемой поверхности. С другой стороны, с повышением скорости перемещения потока растет толщина турбулентного пограничного слоя, в котором имеют место активные сдвиговые (вихревые) движения газа, интенсивные пульсации.

Исследована ситуация, когда толщина пограничного слоя соизмерима с зазором между поверхностью фронта скачка и обтекаемой поверхностью. Если есть плазма, то все перемещивается, фронт скачка размывается [1, 2]. Анализа статического равновесия системы [3, 4] недостаточно.

Вместо четко очерченной поверхности фронта скачка следует рассматривать динамику объемного контактно-вихревого образования с размытыми границами. Понятие контактно-вихревой структуры в сверхзвуковом потоке введено в диссертации [5], свободно распространяемой в Интернете. Возможность вихревой интерпретации сверхзвукового обтекания обоснована в статье [6].

В настоящее время при решении практических задач сверхзвуковой аэроупругости широко используют «поршневу» теорию и ее модификации. Получены важные результаты [7, 8]. Известный метод вихревых элементов [9, 10] хорошо работает в идеальной жидкости.

Метод частиц дает такие дополнительные возможности расчета, как совместное рассмотрение аэродинамических пульсаций и колебаний УТ, использование произвольной геометрии обтекаемой поверхности, трехмерный анализ, учет трения и сжимаемости среды, уточнение природы пульсаций, учет эффектов распада и объединения частиц, влияния нагрева и т. п. Варьируя параметры силовой характеристики частицы, можно легко менять сверхзвуковой режим течения потока на дозвуковой и наоборот. Поставленная задача — это задача Коши с начальными условиями.

Понятие элементарной гирочастицы (ГЧ) введено в книге [11]. В настоящей статье использованы так называемые двухмассовые упругие газовые ГЧ с заданной силовой характеристикой отталкивания.

Частицы — это материальные точки [12, 13]. Двухмассовая газовая ГЧ учитывает упругость

среды и при определенных условиях может разделиться на два электрических заряда и ионизировать поток. Каждая частица взаимодействует с каждой. Обтекаемое УТ также моделируют совокупностью частиц с упругими связями. При взаимодействии частиц УТ с двухмассовыми упругими газовыми ГЧ набегающего сверхзвукового потока возникает вихревая картина, интенсивные пульсации. Четкую геометрическую форму фронта скачка уплотнения выявить нельзя.

Нераскрученная двухмассовая упругая газовая ГЧ имеет кратную частоту собственных колебаний. С увеличением параметра гироскопического нагружения кратная частота расщепляется, т. е. если частота колебаний (пульсаций) газовой ГЧ сближается с собственной частотой колебаний обтекаемого УТ, то наступает резонанс.

Следует отметить, высокую скорость сходимости решений по числу частиц [12, 13]. Их потребное количество для решения тестовых задач сравнительно невелико (десятки, сотни).

Цель работы — дать интерпретацию флаттера и дивергенции упругой конструкции летательного аппарата при решении задачи ее сверхзвуковой аэроупругости с помощью газовых ГЧ.

#### Описание двухмассовой упругой газовой ГЧ.

Схема двухмассовой упругой газовой ГЧ приведена на рис. 1.

Уравнения динамики двухмассовой упругой ГЧ имеют следующий вид (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} -m\ddot{y}_1 + c(y_2 - y_1) + a\dot{y}_3 &= 0; \\ -m\ddot{y}_2 - c(y_2 - y_1) + a\dot{y}_4 &= 0; \\ -m\ddot{y}_3 + c(y_4 - y_3) - a\dot{y}_1 &= 0; \\ -m\ddot{y}_4 - c(y_4 - y_3) - a\dot{y}_2 &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $m$  и  $c$  — масса ГЧ и жесткость ее упругого элемента;  $y_1, \dots, y_4$  — фазовые координаты;  $a$  — коэффициент пропорциональности.

Слагаемые системы уравнений (1)  $a\dot{y}_3$ ,  $a\dot{y}_4$ ,  $-a\dot{y}_1$ ,  $-a\dot{y}_2$  — это не силы трения, а гироскопические силы. Трение отсутствует. Коэффициент пропорциональности  $a$  — параметр гироскопического нагружения, ассоциированный с частотой вращения ротора. Чем больше значение  $a$ , тем сильнее раскручена частица.

Понятие гироскопической силы аналогично гироскопическому моменту [14]. Гироскопиче-

ские силы приложены к материальным точкам парами (см. рис. 1). Эти силы связывают два направления движения. Сила, действующая в одном направлении, прямо пропорциональна скорости изменения фазовой координаты в другом направлении, и наоборот. Силы в разных направлениях имеют неодинаковые знаки.

Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) с постоянными коэффициентами отыскивается в естественной экспоненциальной форме. Пусть  $y$  — вектор фазовых координат задачи,  $y = (y_1, \dots, y_4)$ , а  $\lambda$  — ее характеристическое значение,  $\lambda = \delta + i\omega$  ( $\delta$  — коэффициент демпфирования,  $\omega$  — частота колебаний).

После подстановки решения в уравнения (1) и сокращения на экспоненту получаем алгебраическую задачу на собственные значения вида  $Ay = 0$ , где  $A$  — частотная матрица задачи,

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda^2 m - c & c & a\lambda & 0 \\ c & -\lambda^2 m - c & 0 & a\lambda \\ -a\lambda & 0 & -\lambda^2 m - c & c \\ 0 & -a\lambda & c & -\lambda^2 m - c \end{bmatrix}.$$

Элементы матрицы  $A$ , содержащие параметр гироскопического нагружения  $a$ , кососимметричны. Определитель матрицы  $A$  имеет аналитическое представление. Из условия его равенства нулю получаем характеристическое уравнение двухмассовой ГЧ:

$$b_0 \lambda^8 + b_2 \lambda^6 + b_4 \lambda^4 + b_6 \lambda^2 = 0,$$

где  $b_0, b_2, b_4, b_6$  — коэффициенты характеристического полинома,  $b_0 = m^4$ ,  $b_2 = m^2(4mc + 2a^2)$ ,  $b_4 = 4m^2c^2 + 4a^2mc + a^4$ ,  $b_6 = 4a^2c^2$ .

Если  $a = 0$  (т. е. ГЧ не раскручена), то коэффициент характеристического полинома  $b_6 = 0$ .

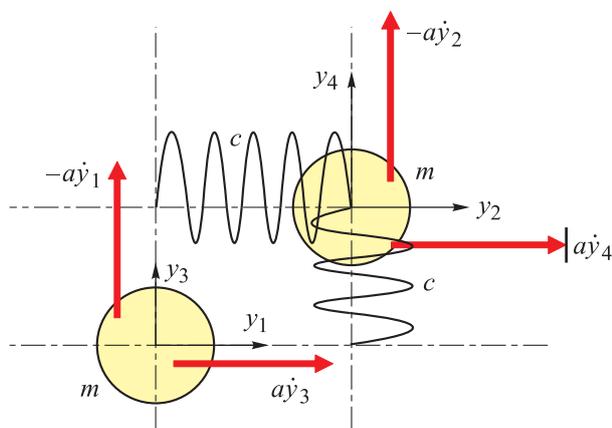


Рис. 1. Схема двухмассовой упругой ГЧ

$\omega_1; \omega_2; \omega_3; \omega_4$ , Гц

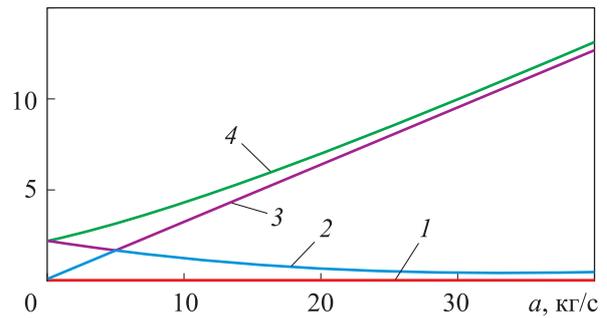


Рис. 2. Расщепление кратных собственных частот ГЧ  $\omega_1$  (корень № 2),  $\omega_2$  (корень № 4),  $\omega_3$  (корень № 6),  $\omega_4$  (корень № 8) и утрата нулевого тона колебаний при массе ГЧ  $m = 0,5$  кг и жесткости упругого элемента ГЧ  $c = 50$  Н/м

Следовательно, нераскрученная ГЧ имеет два нулевых тона и две пары кратных частот собственных колебаний.

На рис. 2 показано, что с увеличением параметра гироскопического нагружения  $a$  один нулевой тон утрачивается, обе пары кратных частот колебаний расщепляются.

На рис. 3 показаны характерные траектории движения (пульсации) элементов двухмассовой ГЧ на фазовой плоскости со следующими ненулевыми начальными условиями:

$$y_1 = \dots = y_4 = 0; \quad \dot{y}_1 = 1; \quad \dot{y}_2 = \dot{y}_3 = 0.$$

Один нулевой тон утрачен, смещение частицы как жесткого целого ограничено.

Рассмотрим пример двумерного моделирования динамического взаимодействия обтекаемого УТ с контактно-вихревым образованием. Обтекаемое УТ (рис. 4, а) смоделируем тремя частицами (материальными точками) массой  $m$ , расположенными в вершинах равнобедренного треугольника со стороной  $d_1$ . Частицы УТ, соединенные линейными пружинами жесткостью  $c_1$ , движутся поступательно на плоскости. На рис. 4, б показана характерная форма собственных колебаний обтекаемого УТ частотой 11,2 Гц.

Двухмассовая газовая ГЧ имеет две подчастицы (ПЧ) массой  $m_2$  (см. рис. 1): основную и сопряженную с ней. Принято, что основная ПЧ участвует во взаимодействиях, а сопряженная ПЧ просто «висит» на основной. Сопряженная ПЧ движется под действием трех сил — инерции, упругости пружин и гироскопических. Подчастицы соединены пружинами жесткостью  $c_2$  по координатам. Трение отсутствует.

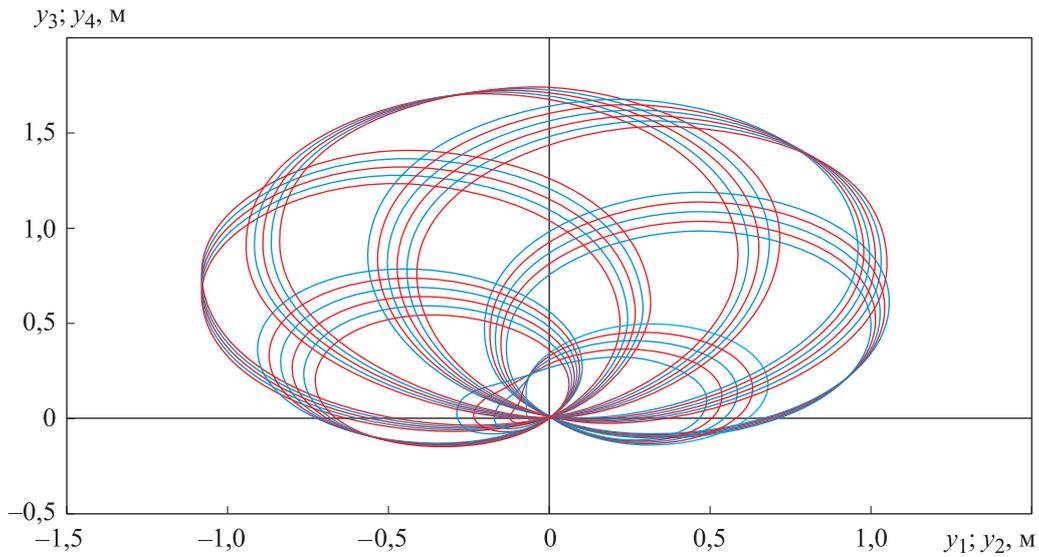
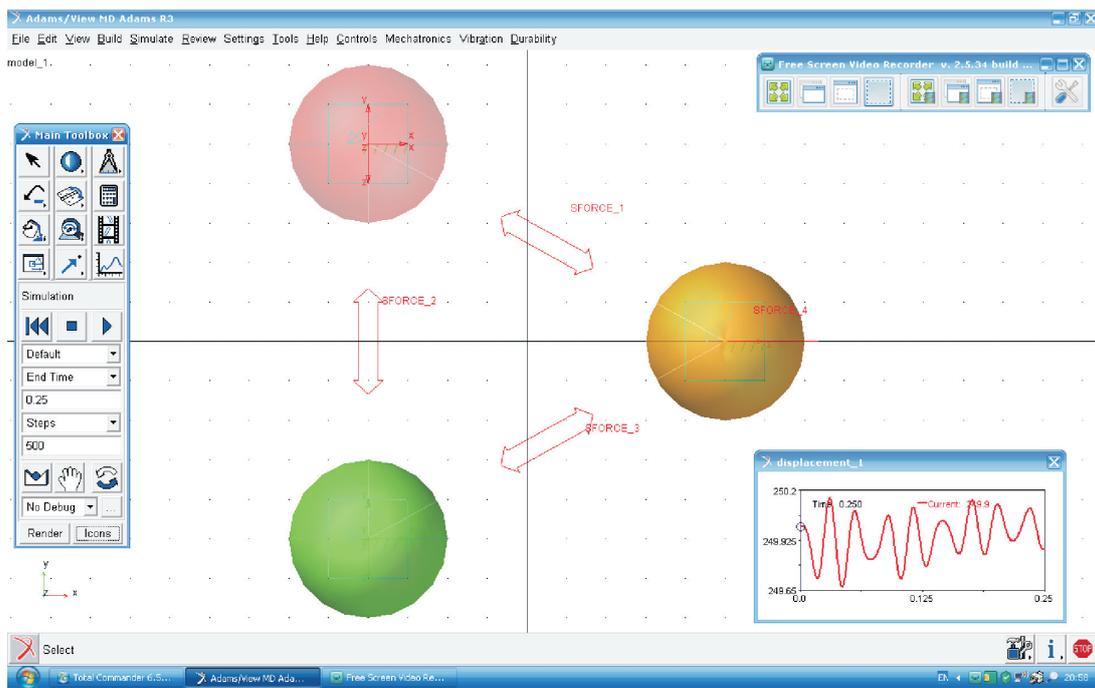
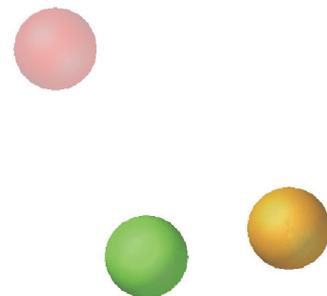


Рис. 3. Характерные траектории движения основного (—) и сопряженного (—) элементов двухмассовой ГЧ на фазовой плоскости при массе ГЧ  $m = 1$  кг, жесткости упругого элемента ГЧ  $c = 10$  Н/м и параметре гироскопического нагружения  $a = 10$  кг/с



*a*



*б*

Рис. 4. Двумерная модель обтекаемого УТ (*a*) и характерной формы его собственных колебаний частотой 11,2 Гц (*б*)

**Вихревой характер движения ГЧ.** Газовая ГЧ состоит из материальных точек, которые, не вращаясь, движутся поступательно под действием приложенных гироскопических сил. Траектория движения — полигармоническая — имеет вихревой характер. Это суперпозиция окружных движений (пульсаций) на фазовой плоскости. Мелкие пульсации с высокой частотой накладываются на более масштабные с низкой частотой.

Принято, что сверхзвуковой характер обтекания определяется не скоростью движения УТ, а степенью раскрученности ГЧ (значением ассоциированного параметра гироскопического нагружения  $a$ ). Поэтому начальная скорость движения УТ во всех примерах одинакова и равна 5 м/с, а параметр  $a$  варьируется.

На рис. 5, *a* показаны траектории движения ГЧ № 2 (слева) и 7 (справа) при  $a = 20$  кг/с, а на рис. 5, *б* — траектории движения ГЧ № 1 (слева) и 2 (справа) при  $a = 50$  кг/с. Нумерация ГЧ будет рассмотрена далее. Как видно из рис. 5, с увеличением  $a$  амплитуда пульсаций падает, частота мелких пульсаций (окружных движений с малой амплитудой) растет.

Рассматриваемый набегающий поток в первом приближении можно идентифицировать по числу Маха  $M$  путем сравнения расчетного вихря с эталонным. В качестве эталонного взят вихрь О.А. Азаровой, выявленный при числе Маха  $M = 1,89$  (рис. 6, *a*) и приведенный в диссертации [5]. Сравнение рис. 6, *a* и *б* показывает, что для данного примера параметру гироскопического нагружения  $a = 50$  кг/с соответствует число Маха  $M \approx 2$ .

**Силовая характеристика ГЧ.** Взаимодействия ГЧ между собой и с УТ определяются силовой характеристикой отталкивания. Каждая ГЧ взаимодействует с каждой. Рассматриваемые ГЧ — газовые, поэтому они могут только отталкиваться. Силовая характеристика отталкивания ГЧ  $F_{ij}$  — сила, с которой  $i$ -я частица действует на  $j$ -ю частицу в зависимости от расстояния между ними. Силовая характеристика — это неположительная часть сдвинутой гиперболы:

$$F_{ij}(d_{ij}) = k_{ij} (1/d_2 - 1/d_{ij}), \quad i \neq j;$$

$$F_{ij} < 0 \text{ при } d_{ij} < d_2; \quad F_{ij} = 0 \text{ при } d_{ij} \geq d_2,$$

где  $d_{ij}$  — расстояние между ГЧ (их элементами),  $d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ ;  $k_{ij}$  — коэффи-

циент сжимаемости;  $d_2$  — диаметр зоны влияния частицы.

Коэффициент сжимаемости управляет скоростью распространения возмущений в потоке. Если расстояние между ГЧ больше диаметра зоны их влияния, то они не взаимодействуют. В рассматриваемом случае ГЧ расположены плотно, т. е. диаметр зоны их влияния равен шагу начального распределения ГЧ в квадрате контактно-вихревого образования (рис. 7).

*Рассмотрим пример*, в котором принято следующее. Обтекаемое УТ имеет 3 частицы, а в газовом потоке находятся 16 основных ПЧ и 16 сопряженных ПЧ. Всего:  $3 + 16 + 16 = 35$ . Для экономной организации циклов компьютерной программы расчета и простоты аналитической записи большого числа уравнений удобно считать, что взаимодействия есть для всех без исключения 35 частиц и их элементов, просто некоторые коэффициенты сжимаемости  $k_{ij}$  равны нулю.

Необходимо учесть, что частицы УТ взаимодействуют только с основными ПЧ. Они не взаимодействуют сами с собой и с сопряженными ПЧ. Основные ПЧ не взаимодействуют (по характеристике отталкивания) ни сами с собой, ни с сопряженными ПЧ, а последние — (по характеристике отталкивания) ни с какими частицами.

Пусть  $K$  — симметричная матрица коэффициентов сжимаемости, имеющая  $35 \times 35 = 1225$  элементов. Процедура заполнения матрицы  $K$  такова. Сначала она вся обнуляется:  $k_{ij} = 0$ ;  $i = 1, \dots, 35$ ;  $j = 1, \dots, 35$ . Затем начинается заполнение ненулевых элементов. Пусть  $k_1$  — значение коэффициентов сжимаемости силовой характеристики отталкивания частиц УТ и основных ПЧ, а  $k_2$  — значение коэффициентов сжимаемости силовой характеристики отталкивания основных ПЧ. Тогда имеем:

- для частиц УТ и основных ПЧ

$$k_{ij} = k_1; \quad i = 1, 2, 3; \quad j = 4, \dots, 19;$$

$$k_{ij} = k_1; \quad j = 1, 2, 3; \quad i = 4, \dots, 19;$$

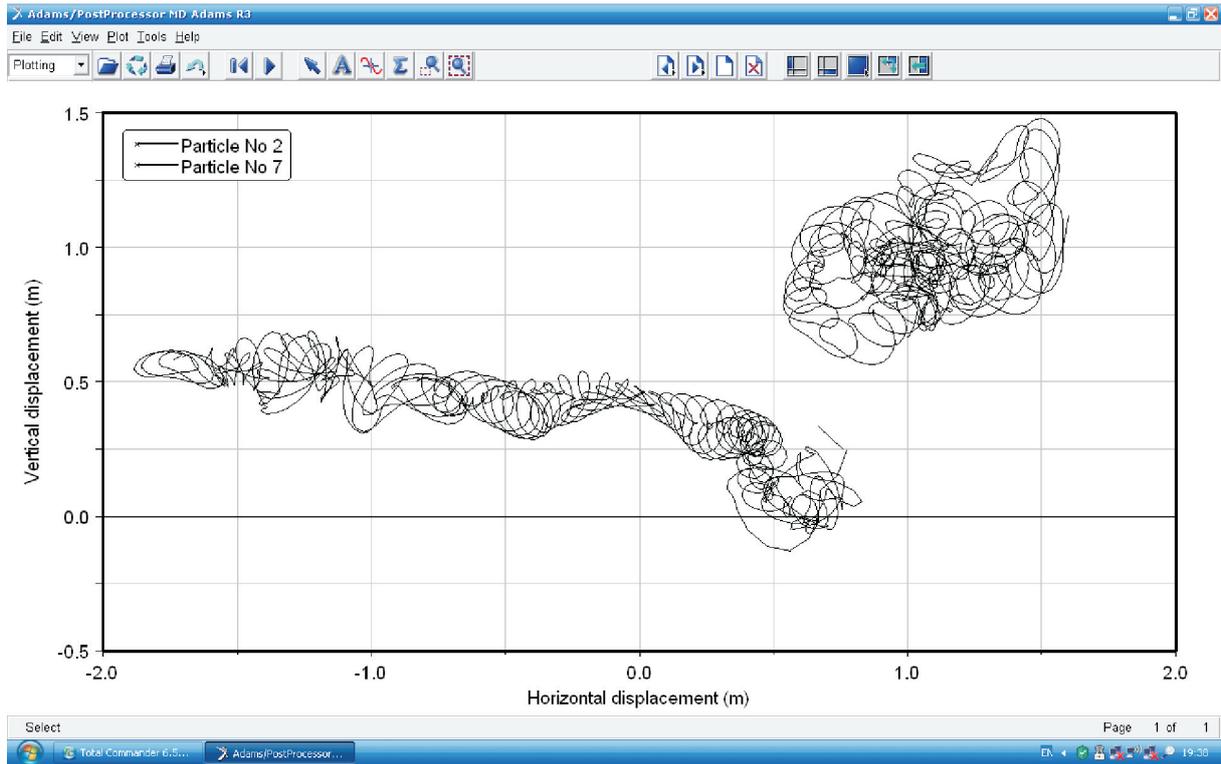
- для основных ПЧ

$$k_{ij} = k_2; \quad i = 4, \dots, 19; \quad j = 4, \dots, 19.$$

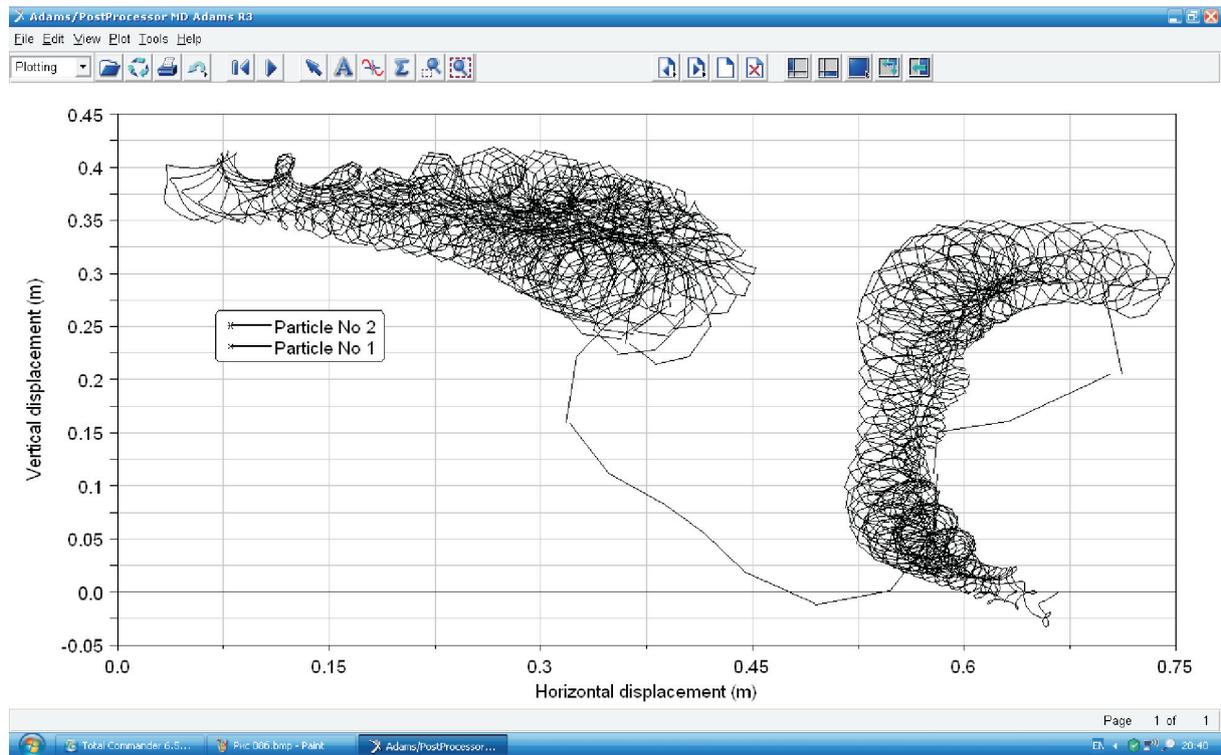
Дополнительно потребуем, чтобы

$$k_{ij} = 0; \quad j = 4, \dots, 19,$$

так как основные ПЧ сами с собой не взаимодействуют.



*a*



*б*

Рис. 5. Траектории движения ГЧ на фазовой плоскости при различных значениях параметра гироскопического нагружения:

*a* — ГЧ № 2 и 7,  $a = 20$  кг/с; *б* — ГЧ № 2 и 1,  $a = 50$  кг/с

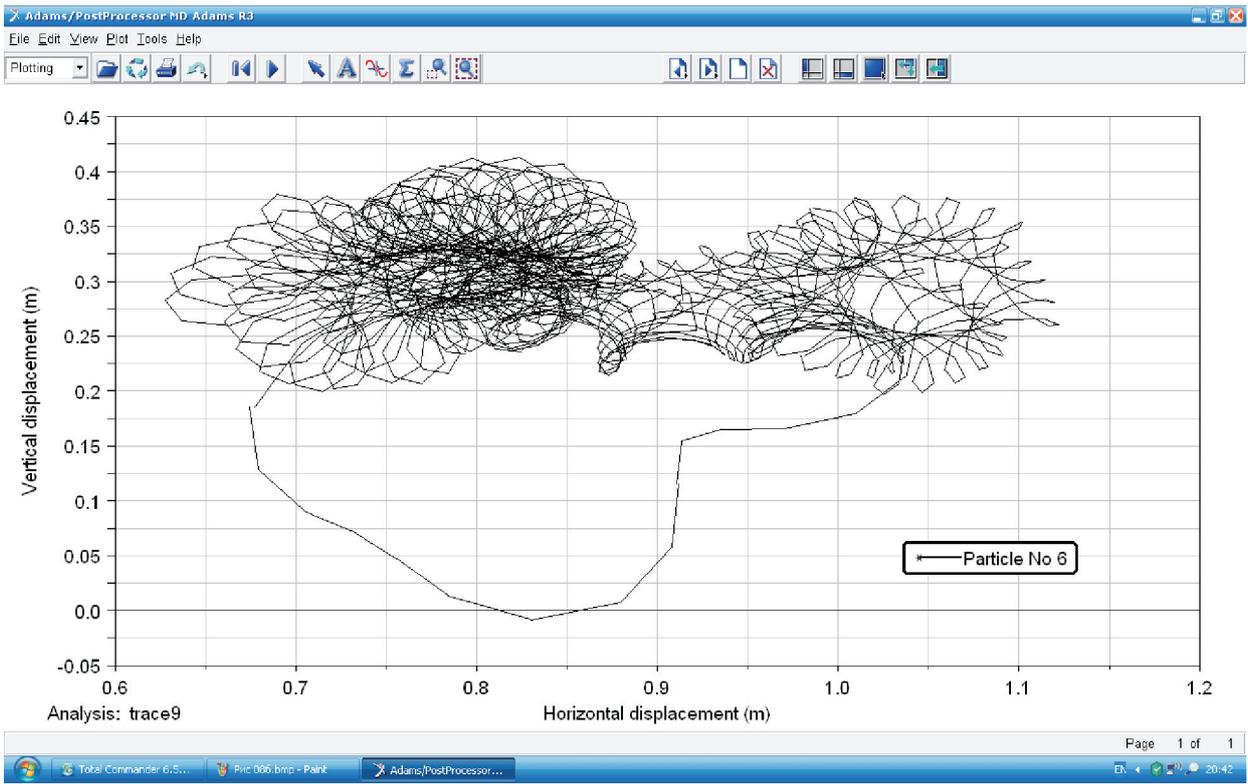
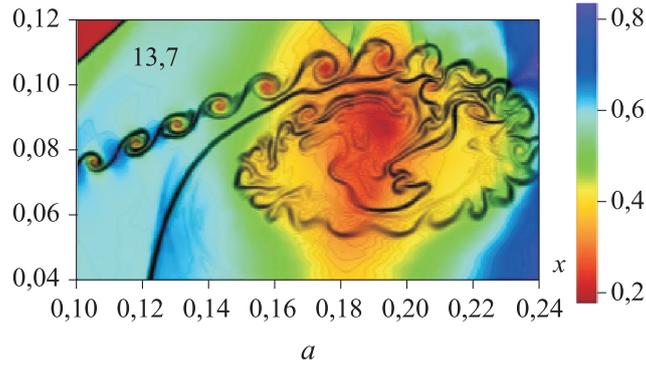


Рис. 6. Траектории движения вихря О.А. Азаровой (а) и ГЧ № 6 (б) при параметре гироскопического нагружения  $a = 50 \text{ кг/с}$

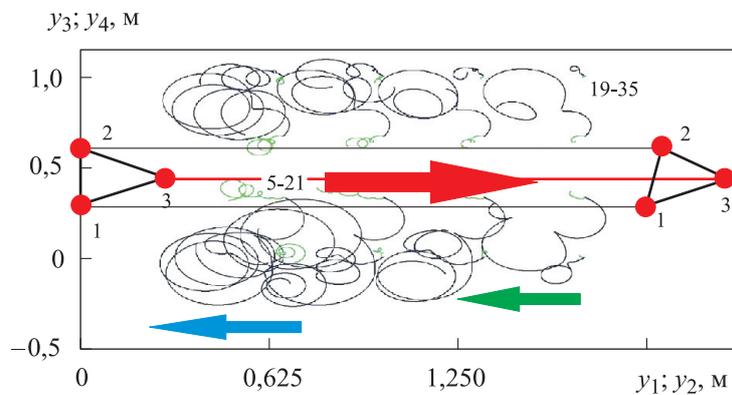


Рис. 7. Проникание трехмассового УТ в контактно-вихревое образование

**Уравнения динамики контактно-вихревого образования.** Рассматриваемая система нелинейна. Задачу будем решать в нестационарной постановке, считая резонансом эффект нарастания амплитуды упругих колебаний УТ при сближении частоты его собственных колебаний с частотой пульсаций ГЧ.

Запишем уравнения динамического взаимодействия трех частиц УТ, 16 основных ПЧ и 16 сопряженных ПЧ контактно-вихревого образования при отсутствии трения.

Уравнения проекций сил на горизонтальную ось:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \left[ c_1 (d_{12} - d_1) \cos \varphi_{12} + c_1 (d_{13} - d_1) \cos \varphi_{13} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=4}^{19} F_{1j} (d_{1j}) \cos \varphi_{1j} \right] \frac{1}{m_1}; \\ \ddot{x}_2 &= \left[ c_1 (d_{23} - d_1) \cos \varphi_{23} + c_1 (d_{21} - d_1) \cos \varphi_{21} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=4}^{19} F_{2j} (d_{2j}) \cos \varphi_{2j} \right] \frac{1}{m_1}; \\ \ddot{x}_3 &= \left[ c_1 (d_{31} - d_1) \cos \varphi_{31} + c_1 (d_{32} - d_1) \cos \varphi_{32} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=4}^{19} F_{3j} (d_{3j}) \cos \varphi_{3j} \right] \frac{1}{m_1}; \\ \ddot{x}_4 &= \left[ c_2 (x_{20} - x_4) + a \dot{y}_4 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^{19} F_{4j} (d_{4j}) \cos \varphi_{4j} \right] \frac{1}{m_2}; \\ &\dots \\ \ddot{x}_{19} &= \left[ c_2 (x_{35} - x_{19}) + a \dot{y}_{19} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=1, j \neq 19}^{19} F_{19,j} (d_{19,j}) \cos \varphi_{19,j} \right] \frac{1}{m_2}; \\ \ddot{x}_{20} &= [-c_2 (x_{20} - x_4) + a \dot{y}_{20}] / m_2; \\ &\dots \\ \ddot{x}_{35} &= [-c_2 (x_{35} - x_{19}) + a \dot{y}_{35}] / m_2, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $\cos \varphi_{ij} = (x_j - x_i) / d_{ij}$ .

Уравнения проекций сил на вертикальную ось:

$$\begin{aligned} \ddot{y}_1 &= \left[ c_1 (d_{12} - d_1) \sin \varphi_{12} + c_1 (d_{13} - d_1) \sin \varphi_{13} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=4}^{19} F_{1j} (d_{1j}) \sin \varphi_{1j} \right] \frac{1}{m_1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_2 &= \left[ c_1 (d_{23} - d_1) \sin \varphi_{23} + c_1 (d_{21} - d_1) \sin \varphi_{21} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=4}^{19} F_{2j} (d_{2j}) \sin \varphi_{2j} \right] \frac{1}{m_1}; \\ \ddot{y}_3 &= \left[ c_1 (d_{31} - d_1) \sin \varphi_{31} + c_1 (d_{32} - d_1) \sin \varphi_{32} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=4}^{19} F_{3j} (d_{3j}) \sin \varphi_{3j} \right] \frac{1}{m_1}; \end{aligned} \tag{3}$$

$$\ddot{y}_4 = \left[ c_2 (y_{20} - y_4) - a \dot{x}_4 + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^{19} F_{4j} (d_{4j}) \sin \varphi_{4j} \right] \frac{1}{m_2};$$

...

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{19} &= \left[ c_2 (y_{35} - y_{19}) - a \dot{x}_{19} + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=1, j \neq 19}^{19} F_{19,j} (d_{19,j}) \sin \varphi_{19,j} \right] \frac{1}{m_2}; \end{aligned}$$

$$\ddot{y}_{20} = [-c_2 (y_{20} - y_4) - a \dot{x}_{20}] / m_2;$$

...

$$\ddot{y}_{35} = [-c_2 (y_{35} - y_{19}) - a \dot{x}_{35}] / m_2,$$

где  $\sin \varphi_{ij} = (y_j - y_i) / d_{ij}$ .

Начальные условия интегрирования по координатам соответствуют рис. 7. В начальный момент времени ГЧ неподвижны, а частицы УТ имеют начальную горизонтальную составляющую скорости  $v_{x0}$ . Фактически, УТ на достаточно большой скорости влетает в неподвижное квадратное контактно-вихревое образование.

Системы (2) и (3) из 70 уравнений будем интегрировать численно методом Рунге — Кутты 4-го порядка с автоматическим выбором шага. Расчетные значения параметров:  $a = 0 \dots 5000$  кг/с,  $m_1 = 50$  кг,  $m_2 = 0,5$  кг,  $c_1 = 10^5$  Н/м,  $c_2 = 50 \dots 50000$  Н/м,  $k_1 = 1000$  Н·м,  $k_2 = 10$  Н·м,  $v_{x0} = 5$  м/с. Время интегрирования  $T = 0,4$  с. За это время УТ полностью проникает в контактно-вихревое образование. Предварительно определенные частоты собственных колебаний трехмассового УТ (см. рис. 4, а и б) равны 8,72; 8,74 и 11,2 Гц.

**Результаты анализа аэроупругости УТ.** На рис. 7 направление движения обтекаемого УТ показано большой красной стрелкой. Красные линии — траектории движения частиц УТ. Тело влетает в неподвижное квадратное контактно-вихревое образование размером  $1 \times 1$  м<sup>2</sup> с некоторой начальной скоростью  $v_{x0}$ .

Это квадратное образование занято шестнадцатью двухмассовыми упругими ГЧ, распределенными равномерно с шагом  $d_2$ . В начальный момент времени газовые ГЧ неподвижны, но раскручены (т. е. параметр гироскопического нагружения  $a \neq 0$ ). Все ГЧ раскручены одинаково. Газовые ГЧ, расположенные с разных сторон УТ, раскручены в противоположные стороны.

Траектории движения основных ПЧ показаны на рис. 7 синими линиями, а траектории движения сопряженных ПЧ — зелеными. В начальный момент времени положения основных и сопряженных ПЧ совпадают. Если синие и зеленые линии выходят из одной точки, то она является начальным положением ГЧ.

Так как рис. 7 — громоздкий, начальные положения ГЧ не обозначены. Введем правила нумерации частиц. Три частицы УТ имеют номера 1–3, 16 основных ПЧ — 4–19, 16 сопряженных ПЧ — 20–35. Так, на рис. 7 обозначение 5–21 — это начальное положение ГЧ с основной ПЧ № 5 и сопряженной ПЧ № 21.

Отметим, что под действием гироскопических сил ГЧ «сносятся» вниз по потоку (по синей и зеленой стрелкам). Поток — сверхзвуковой. Как видно из рис. 7, УТ давно «проскочило» контактно-вихревое образование, а движение ГЧ № 19–35 практически не началось, т. е. скорость движения УТ превышает скорость распространения возмущений.

На рис. 8 показано, что в диапазоне параметра гироскопического нагружения  $a = 30 \dots 40$  кг/с растет амплитуда относительных смещений частиц УТ  $y_2 - y_1 - d_1$ . Имеет место резонанс: частота пульсаций ГЧ № 5–21 близка к собственной частоте колебаний УТ.

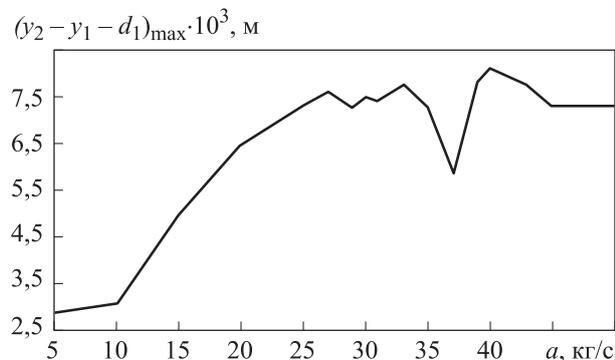


Рис. 8. Зависимость наибольшего относительного смещения частиц УТ  $(y_2 - y_1 - d_1)_{\max}$  от параметра гироскопического нагружения  $a$  при начальной скорости  $v_{x0} = 5$  м/с и времени  $T = 0,4$  с

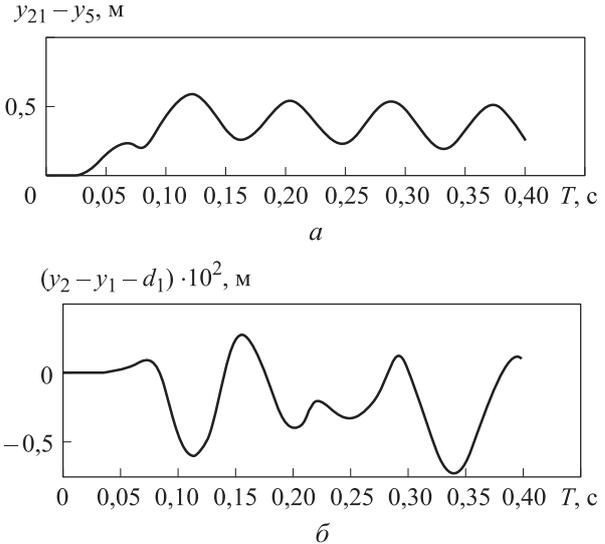


Рис. 9. Зависимости относительных смещений ГЧ  $y_{21} - y_5$  (а) и частиц УТ  $y_2 - y_1 - d_1$  (б) от времени  $T$

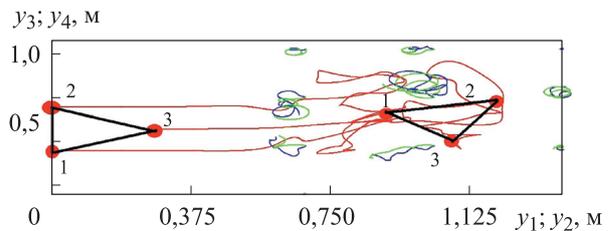


Рис. 10. Опрокидывание (дивергенция) УТ в газовом потоке при параметре гироскопического нагружения  $a = 5000$  кг/с

Так, из рис. 2 видно, что при  $a = 35,05$  кг/с частота пульсаций ГЧ составляет 11,79 Гц. Близость частоты колебаний УТ и частоты пульсаций ГЧ проиллюстрирована на рис. 9, а и б. Данный резонанс — это флаттер.

С увеличением параметра гироскопического нагружения  $a$  (степени раскрученности ГЧ) аэродинамическое сопротивление контактно-вихревого образования возрастает.

На рис. 10 показано, что если значение параметра  $a$  достаточно велико, то имеет место эффект, называемый экранированием: УТ резко тормозится, отражается от кластера газовых ГЧ, совершает хаотичные движения, опрокидывается. Этот эффект — дивергенция имеет место, когда газовая ГЧ в сотни и тысячи раз легче налетающего УТ. Обозначения на рис. 10 идентичны таковым на рис. 7.

## Выводы

1. В настоящее время главным препятствием на пути развития механики является использо-

вание гипотезы непрерывности (неразрывности) деформирования. В случае отказа от этой гипотезы придется отказаться и от многих привычных понятий. Предложена соответствующая формулировка задачи аэроупругости в сверхзвуковом газовом потоке. Использован метод частиц. Рассматриваемая формулировка предполагает следующее:

- поток становится сверхзвуковым, когда в нем начинается ионизация (появляется плазма), а не когда его число Маха превышает единицу;
- целесообразно использовать двухмассовую частицу, потому что ее можно разделить на два заряда и таким образом ионизировать поток;
- задача аэроупругости в ионизированном потоке (плазме) очень сложна, поэтому процесс ионизации потока, движение частиц под действием электрических и магнитных сил не рассматривались; дана только следующая интерпретация понятий флаттера и дивергенции: флаттер — это обычный резонанс, дивергенция — это особый эффект экранирования УТ, обтекаемого газовыми ГЧ;
- аэродинамическое нагружение определяется не скоростью движения УТ, а параметром гироскопического нагружения ГЧ;

скорость полета УТ фиксирована, что принципиально важно: суперкомпьютер не нужен, для расчета аэродинамического нагружения можно ограничиться сравнительно небольшим кластером газовых ГЧ;

- метод конечных элементов не работает; УТ — это тоже совокупность частиц, соединенных упругими связями [12].

2. Возможными направлениями развития предлагаемого метода являются:

- анализ аэроупругости изделия с учетом нагрева, для чего необходимо отказаться от понятия температуры, используя вместо нее понятие скорости движения частиц [13];
- анализ аэроупругости с учетом уноса массы, для проведения которого следует допустить разрыв упругих связей между частицами УТ при записи уравнений их динамики;
- учет электрического и магнитного взаимодействия между заряженными частицами;
- обобщение предлагаемой двумерной модели на трехмерную, что является необходимым условием рассмотрения магнитного поля; причем вместо двукратного расщепления частоты колебаний ГЧ имеет место ее трехкратное расщепление.

## Литература

- [1] Lapushkina T.A., Erofeev A.V., Azarova O.A., Kravchenko O.V. Interaction of a plane shock wave with an area of ionization instability of discharge plasma in air. *Aerospace Science and Technology*, 2019, vol. 85, pp. 347–358, doi: 10.1016/j.ast.2018.12.020
- [2] Артеха С.Н. Определение параметров плазмы с учетом локальных вращений. *Журнал технической физики*, 2011, т. 81, вып. 1, с. 65–68.
- [3] Булгаков В.Н., Котенев В.П., Сапожников Д.А. Моделирование сверхзвукового обтекания затупленных конусов с учетом разрыва кривизны образующей тела. *Математическое моделирование и численные методы*, 2017, № 2(14), с. 81–91, doi: 10.18698/2309-3684-2017-2-8193
- [4] Котенев В.П., Сысенко В.А. Аналитические формулы повышенной точности для расчета распределения давления на поверхности выпуклых, затупленных тел вращения произвольного очертания. *Математическое моделирование и численные методы*, 2014, № 1(1), с. 68–81, doi: 10.18698/2309-3684-2014-1-6881
- [5] Азарова О.А. *Неустойчивости и контактно-вихревые структуры в задачах сверхзвукового обтекания с внешними источниками энергии*. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва, 2012. 385 с.
- [6] Борисов В.Е., Давыдов А.А., Константиновская Т.В., Луцкий А.Е., Шевченко А.М., Шмаков А.С. Моделирование сверхзвукового течения в следе за крылом при  $M = 2-4$ . *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2018, № 50, 19 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-50>, doi: 10.20948/prepr-2018-50
- [7] Ватрухин Ю.М., Мензульский С.Ю., Никопоренко А.В. Определение аэроупругих характеристик гиперзвукового летательного аппарата с точки зрения безопасности авиаперевозок. *Специальная техника*, 2010, № 4, с. 41–46.

- [8] Thuruthimattan B.J., Friedmann P.P., McNamara J.J., Powell K.G. Aeroelasticity of a generic hypersonic vehicle. *Proceedings of the 43<sup>rd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 22–25 April 2002, Denver, Colorado, pp. 1–14.
- [9] Коцур О.С., Щеглов Г.А. Реализация метода обмена интенсивностями вихрон-отрезков для учета вязкости в методе вихревых элементов. *Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2018, № 3, с. 48–67, doi: 10.18698/1812-3368-2018-3-48-67
- [10] Marchevskii I.K., Shcheglov G.A. On the dynamic stability of an elastically fixed high-drag airfoil under vortical parametric excitations. *Mechanics of solids*, 2016, vol. 51, no. 1, pp. 165–176, doi: 10.3103/S0025654416030122
- [11] Аринчев С.В. *Теория колебаний неконсервативных систем*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.
- [12] Arinchev S.V. Simulation of reversed torsion of the AlMg<sub>6</sub> aluminium bar using the macro-molecule approach. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications, COMPLAS XIII, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 1–3 September 2015, EbookComplas, 2015, pp. 429–439. URL: <http://hdl.handle.net/2117/81380>*
- [13] Arinchev S.V. Back from the solid temperature to kinetic energy of its macro-molecules. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the IV<sup>th</sup> International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 28–30 September, 2015, E-book PARTICLES\_2015, pp. 909–920. URL: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf)*
- [14] Лысов А.Н., Винниченко Н.Т., Лысова А.А. *Прикладная теория гироскопов*. Челябинск, Издательский центр ЮрГУ, 2009. 254 с.

## References

- [1] Lapushkina T.A., Erofeev A.V., Azarova O.A., Kravchenko O.V. Interaction of a plane shock wave with an area of ionization instability of discharge plasma in air. *Aerospace Science and Technology*, 2019, vol. 85, pp. 347–358, doi: 10.1016/j.ast.2018.12.020
- [2] Artekha S.N. Determination of plasma parameters taking into account local rotations. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2011, vol. 81, iss. 1, pp. 65–68 (in Russ.).
- [3] Bulgakov V.N., Kotenev V.P., Sapozhnikov D.A. Modeling supersonic flow around blunted cones, taking into account the curvature discontinuity along the generatrix of the solid. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2017, no. 2(14), pp. 81–91 (in Russ.), doi: 10.18698/2309-3684-2017-2-8193
- [4] Kotenev V.P., Sysenko V.A. Highly accurate analytical formulas for calculating the pressure distribution on the surface of convex, blunt bodies of revolution of arbitrary shape. *Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2014, no. 1(1), pp. 68–81 (in Russ.), doi: 10.18698/2309-3684-2014-1-6881
- [5] Azarova O.A. *Neustoychivosti i kontaktno-vikhrevyye struktury v zadachakh sverkhzvukovogo obtekaniya s vneshnimi istochnikami energii*. Dokt. Diss. [Instabilities and contact-vortex structures in problems of supersonic flow with external energy sources. Doct. Diss.]. Moscow, 2012. 385 p.
- [6] Borisov V.E., Davydov A.A., Konstantinovskaya T.V., Lutskiy A.E., Shevchenko A.M., Shmakov A.S. Simulation of supersonic flow in the wake behind a wing at  $M = 2–4$ . *KIAM Preprint*, 2018, no. 50, 19 p. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-50> (in Russ.), doi: 10.20948/prepr-2018-50
- [7] Vatrukhin Yu.M., Menzul'skiy S.Yu., Nikoporenko A.V. Determination of hypersonic aircraft aeroelastic characteristics in terms of air transportation safety. *Spetsial'naya tekhnika*, 2010, no. 4, pp. 41–46 (in Russ.).
- [8] Thuruthimattan B.J., Friedmann P.P., McNamara J.J., Powell K.G. Aeroelasticity of a generic hypersonic vehicle. *Proceedings of the 43<sup>rd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 22–25 April 2002, Denver, Colorado, pp. 1–14.

- [9] Kotsur O.S., Shcheglov G.A. Implementation of the Particle Strength Exchange Method for Fragmentons to Account for Viscosity in Vortex Element Method. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2018, no. 3, pp. 48–67 (in Russ.), doi: 10.18698/1812-3368-2018-3-48-67
- [10] Marchevskii I.K., Shcheglov G.A. On the dynamic stability of an elastically fixed high-drag airfoil under vortical parametric excitations. *Mechanics of solids*, 2016, vol. 51, no. 1, pp. 165–176, doi: 10.3103/S0025654416030122
- [11] Arinchev S.V. *Teoriya kolebaniy nekonservativnykh system* [Theory of oscillations of non-conservative systems]. Moscow, Bauman Press, 2002. 464 p.
- [12] Arinchev S.V. Simulation of reversed torsion of the AlMg<sub>6</sub> aluminium bar using the macro-molecule approach. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the XIII International Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications, COMPLAS XIII, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 1–3 September 2015, EbookComplas, 2015, pp. 429–439. Available at: <http://hdl.handle.net/2117/81380>*
- [13] Arinchev S.V. Back from the solid temperature to kinetic energy of its macro-molecules. *International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Proceedings of the IV<sup>th</sup> International Conference on Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications, Polytechnic University of Catalonia (UPC), Barcelona, Spain, 28–30 September, 2015, E-book PARTICLES\_2015, pp. 909–920. Available at: [http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book\\_PARTICLES\\_2015.pdf](http://congress.cimne.com/particles2015/frontal/doc/E-book_PARTICLES_2015.pdf)*
- [14] Lysov A.N., Vinnichenko N.T., Lysova A.A. *Prikladnaya teoriya giroskopov* [Applied Theory of Gyroscopes]. Chelyabinsk, SUSU publ., 2009. 254 p.

Статья поступила в редакцию 19.11.2019

## Информация об авторе

**АРИНЧЕВ Сергей Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, e-mail: arinchev@inbox.ru).

## Information about the author

**ARINCHEV Sergei Vasilievich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Двухмассовая газовая гирочастица как инструмент анализа сверхзвуковой аэроупругости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 5, с. 62–73, doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-62-73

### Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. A Two-Mass Gyro-Particle as a Tool for Supersonic Aeroelasticity Analysis. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 5, pp. 62–73, doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-62-73