

Научная статья

УДК 533.27; 519.6

DOI: 10.18384/2949-5067-2024-3-33-49

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОТОКОВ, ПАДАЮЩИХ НА ТЕЛО ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОМОЛЕКУЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ

Коротков Д. П.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Российская Федерация
e-mail: danel-09@yandex.ru*

Поступила в редакцию 09.09.2024

Принята к публикации 19.09.2024

Аннотация

Целью данной работы являлась разработка алгоритма определения плотности падающих потоков массы, импульса и энергии на тело сложной формы, обтекаемое сильно разреженным газом.

Процедура и методы. В работе использованы методы молекулярно-кинетической теории газов, ориентированные на определение макроскопических характеристик потока разреженных газов. Работа основана на численном решении интегралов от функции распределения Максвелла.

Результаты. Разработан и протестирован алгоритм на модели, имитирующей прибор (панель солнечной батареи, антенну и т. п.), установленный на поверхности корпуса космического аппарата.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанный алгоритм может использоваться в задачах, связанных с определением распределения плотностей потоков массы, импульса и энергии по поверхности объектов, обтекаемых сильно разреженной газовой средой, и в задачах, связанных с определением характеристик собственной внешней атмосферы космического аппарата.

Ключевые слова : динамика разреженного газа, молекулярно-кинетическая теория газов, распределение Максвелла, тепломассоперенос в разреженных газах, факторы космического пространства

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации, номер темы FSFF-2023-0008.

Для цитирования :

Коротков Д. П. Определение плотности молекулярных потоков, падающих на тело произвольной формы в условиях свободномолекулярного течения // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2024. № 3. С. 33-49. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-3-33-49>

Original research article

DETERMINATION OF THE DENSITY OF MOLECULAR FLOWS FALLING ON A BODY OF ARBITRARY SHAPE UNDER CONDITIONS OF FREE-MOLECULAR FLOW

D. Korotkov

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe shosse 4, Moscow 125993, Russian Federation
e-mail: danel-09@yandex.ru*

*Received by the editorial office 09.09.2024
Accepted for publication 19.09.2024*

Abstract

Aim. The aim of this work was to develop an algorithm for determining the density of incident mass, momentum and energy flows on a body of complex shape, flown around by a highly rarefied gas.

Methodology. The work uses methods of the molecular-kinetic theory of gases, aimed at determining the macroscopic characteristics of a rarefied gas flow. The work is based on the numerical solution of integrals of the Maxwell distribution function.

Results. An algorithm has been developed and tested on a model simulating a device (solar battery panel, antenna, etc.) installed on the surface of a spacecraft body.

Research implications. The developed algorithm can be used in problems related to determining the distribution of mass, momentum and energy flow densities over the surface of objects flown around by a highly rarefied gas medium, and in problems related to determining the characteristics of a spacecraft's own external atmosphere.

Keywords: rarefied gas dynamics, molecular kinetic theory of gases, Maxwell distribution, heat and mass transfer in rarefied gases, space factors

Acknowledgment .: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, topic number FSFF-2023-0008.

For citation:

Korotkov, D. P. (2024). Determination of the density of molecular flows falling on a body of arbitrary shape under conditions of free-molecular flow. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 3, pp.33-49. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2024-3-33-49>

Введение

Поверхность космических аппаратов (КА) находится под воздействием потоков разрежённого газа, обтекающего аппарат. Газовые частицы постоянно взаимодействуют с поверхностями элементов КА: вступают в химические реакции; внедряются в состав кристаллической решётки; «выбивают» частицы материала с поверхности. Результатами подобного взаимодействия становятся: деградация оптических поверхностей, поверхностей радиаторов и панелей солнечных батарей; снижение эффективности работы и выход из строя датчиков и приборов; изменение физических свойств материалов поверхностей элементов КА.

Данная проблема актуальна как для низкоорбитальных КА, летающих на высотах с относительно высокой концентрацией частиц газа, так и для высокоорбитальных КА и КА, находящихся в межпланетном пространстве и обтекаемых потоком очень быстрых высокоэнергетических частиц.

Определение взаимодействия частиц газа с поверхностями элементов КА позволяет определять ресурс элементов КА, а также разрабатывать меры по уменьшению вредного влияния газовой среды на элементы КА. Одним из первых и основных этапов в определении взаимодействия газовой среды с поверхностью является определение величин потоков массы, импульса и энергии и их распределения по исследуемой поверхности. Подробно о факторах космического пространства (ФКП) и их влиянии на КА написано в источниках [1; 2; 3], о взаимодействии газов с твёрдыми телами в источнике [4].

В настоящий момент существует целый ряд способов решения задачи определения величин потоков массы, импульса и энергии на поверхность, обтекаемую сильно разрежённым газом. Большинство существующих способов опираются на аналитические или статистические методы. Проблемой аналитических методов является сложность, а чаще невозможность их использования для определения потоков на поверхностях со сложной геометрической формой. Статистические методы требуют больших вычислительных мощностей и больших затрат времени для проведения расчётов потоков на поверхности тел со сложной геометрической формой с приемлемой точностью, что особенно ощутимо при необходимости серийных расчётов. Некоторые из существующих методов расчётов газодинамических характеристик вблизи тел сложной формы изложены в работах [5–11].

Цель настоящей работы – разработка метода определения величин потоков массы, нормального импульса и энергии, и их распределения по поверхности тел со сложной геометрической формой. В данной работе учитываются только потоки, падающие на поверхность тела из окружающего пространства, без учёта потоков, отражённых от поверхности тела. Главные требования к методу: экономичность с точки зрения вычислительных ресурсов; способность работы с поверхностями со сложной геометрической формой, аппроксимированными множеством элементарных площадок.

В ходе работы решались следующие задачи:

- 1) разработка алгоритма разбиения видимого пространства вокруг элементарной площадки на некоторое количество телесных углов $\Delta\Omega$, обеспечивающее решение интегралов от функций распределения Максвелла с требуемой степенью точности;
- 2) тестирование численного решения для плотностей потоков на изолированную площадку;
- 3) разработка алгоритма определения экранирования;
- 4) численный расчёт плотности потоков на тело сложной формы.

Алгоритм разбиения пространства на телесные углы

В декартовой системе координат функция распределения Максвелла для частиц потока, падающего на элемент поверхности, будет иметь вид [3; 12; 13; 14]:

$$f_{\infty} = \frac{\eta_{\infty}}{(2\pi kT_{\infty}/m)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(\xi_x - \vec{U}_{\infty} \cos(\alpha_1))^2}{2kT_{\infty}/m} + \frac{(\xi_y - \vec{U}_{\infty} \cos(\alpha_2))^2 + (\xi_z - \vec{U}_{\infty} \cos(\alpha_3))^2}{2kT_{\infty}/m} \right], \quad (1)$$

здесь: η_{∞} – концентрация частиц в невозмущённом потоке; k – постоянная Больцмана; T_{∞} – температура невозмущённого потока; m – масса частицы; ξ_x , ξ_y и ξ_z – проекции вектора молекулярной скорости на оси декартовой системы координат, связанные с элементом поверхности; $\vec{U}_{\infty}$ – вектор скорости невозмущённого потока частиц (групповой скорости частиц); α_1 , α_2 , и α_3 – эйлеровы углы между вектором скорости и осями X , Y , и Z соответственно (ось Y системы координат, связанной с элементом поверхности, совпадает с нормалью поверхности, вектора $\vec{Y}$ и $\vec{n}$ – равнозначны).

Для определения плотности потока частиц газа на элемент поверхности при свободномолекулярном обтекании используется следующее выражение [3, с. 481]:

$$N = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi_y f_{\infty} d\xi_x d\xi_y d\xi_z = n_{\infty} \sqrt{\frac{kT_{\infty}}{2\pi m}} \chi(S_n), \quad (2)$$

здесь $S_n = |\vec{U}_{\infty} \cos(\alpha_2)| / (2kT_{\infty}/m)^{1/2}$ – скоростное отношение по нормали к поверхности. Функция $\chi(S_n)$ определяется:

– если проекция $\vec{U}_{\infty}$ на нормаль к элементу поверхности положительная величина

$$\chi(S_n) = \exp(-S_n^2) + \sqrt{\pi} S_n (1 + \operatorname{erf}(S_n)); \quad (3a)$$

– если проекция $\vec{U}_{\infty}$ на нормаль к элементу поверхности отрицательная величина

$$\chi(S_n) = \exp(-S_n^2) - \sqrt{\pi} S_n (1 - \operatorname{erf}(S_n)). \quad (3b)$$

Для определения плотности потока нормального импульса на элемент поверхности при свободномолекулярном обтекании используется следующее выражение [3, с. 481]:

$$Pn = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \xi_y^2 f_{\infty} d\xi_x d\xi_y d\xi_z = \frac{n_{\infty} m U^2}{2} \left[S_n \chi(S_n) + \frac{\sqrt{\pi}}{2} (1 + \operatorname{erf}(S_n)) \right]. \quad (4)$$

Для определения плотности потока энергии на элемент поверхности при свободномолекулярном обтекании одноатомным газом используется следующее выражение [3]:

$$E' = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{m\xi^2\xi_y}{2} d\xi_x d\xi_y d\xi_z = \frac{\eta_\infty m U^3}{2} \frac{1}{2\sqrt{\pi} S_\infty^3} \times \\ \times \left\{ \left(S_\infty^3 + \frac{5}{2} \right) \chi(S_n) - \frac{1}{2} \exp(-S_n^2) \right\}, \quad (5)$$

здесь $S_\infty = \vec{U}_\infty / (2kT_\infty/m)^{1/2}$ – скоростное отношение.

В сферической системе координат функция распределения Максвелла примет вид:

$$f_\infty = \frac{n_\infty}{(2\pi kT_\infty/m)^{3/2}} \exp \left[-\frac{(\vec{\xi} \cos(\varphi) \sin(\theta) - \vec{U}_\infty \cos(\beta) \sin(\alpha))^2}{2kT_\infty/m} - \right. \\ \left. - \frac{(\vec{\xi} \cos(\theta) - \vec{U}_\infty \cos(\alpha))^2 + (\vec{\xi} \sin(\varphi) \sin(\theta) - \vec{U}_\infty \sin(\beta) \sin(\alpha))^2}{2kT_\infty/m} \right], \quad (6)$$

здесь φ и β – азимутальные углы векторов молекулярной и групповой скорости соответственно; θ и α – меридиональные углы векторов молекулярной и групповой скорости соответственно (схематическое изображение см. рис. 1).

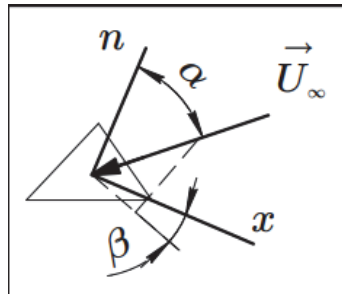


Рис. 1 / Fig. 1. Углы, связанные с вектором групповой скорости /
Angles associated with the group velocity vector

Источник: [14, с. 78].

В сферической системе координат для определения плотности потока частиц газа на элемент поверхности при свободномолекулярном обтекании используется следующее выражение:

$$N = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \xi^3 \cos(\Theta) f_\infty \sin(\Theta) d\xi d\varphi d\Theta \quad (7)$$

т. к. $d\Omega = \sin(\Theta) d\varphi d\Theta$, то выражение (7) можно представить в виде

$$N = \int_0^\infty \int_{\Omega} \xi^3 \cos(\Theta) f_\infty d\xi d\Omega \quad (8)$$

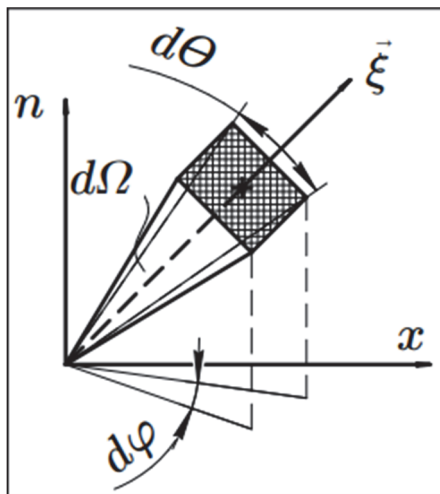


Рис. 2 / Fig. 2. Элементарный телесный угол / Elementary solid angle

Источник: [14, с. 31].

Проинтегрировав выражение (8) вдоль вектора молекулярной скорости частиц $\vec{\xi}$, получим

$$N = \eta_\infty \sqrt{\frac{RT_\infty}{2\pi}} \frac{1}{\pi} \times \int_{\Omega} \left\{ (1 + \zeta^2) e^{-S_\infty^2} + \sqrt{\pi} \zeta \left(\frac{3}{2} + \zeta^2 \right) [1 + \operatorname{erf}(\zeta)] \exp(\zeta^2 - S_\infty^2) \right\} \cos(\Theta) d\Omega \quad (9)$$

Интеграл по телесным углам берётся численно. Для этого видимая область вокруг элемента поверхности (полусфера) разбивается на n телесных углов $\Delta\Omega$ (схематическое изображение элементарного телесного угла см. рис. 2). Выражение (9) приводится к дискретной форме:

$$N = \eta_\infty \sqrt{\frac{RT_\infty}{2\pi}} \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^n \left\{ \left[(1 + \zeta_i^2) e^{-S_\infty^2} + \sqrt{\pi} \zeta_i \left(\frac{3}{2} + \zeta_i^2 \right) [1 + \operatorname{erf}(\zeta_i)] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp(\zeta_i^2 - S_\infty^2) \right] \cos(\Theta_i) \Delta\Omega_i \right\}, \quad (10)$$

здесь

$$\zeta_i = S_\infty [\cos(\varphi_i) \sin(\Theta_i) \cos(\beta) \sin(\alpha) + \cos(\Theta_i) \cos(\alpha) + \sin(\varphi_i) \sin(\Theta_i) \sin(\beta) \sin(\alpha)] \quad (11)$$

Аналогично получаются выражения для падающих потоков нормального импульса

$$Pn = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi m \xi^4 \cos^2(\Theta) f_\infty \sin(\Theta) d\xi d\varphi d\Theta = \frac{\eta_\infty m U^2}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{(\pi S_\infty)^2} \times \\ \times \sum_{i=0}^n \left\{ \left[\zeta_i v \left(\frac{5}{2} + \zeta_i^2 \right) + \sqrt{\pi} \left(\zeta_i^4 + 3\zeta_i^2 + \frac{3}{4} \right) [1 + \operatorname{erf}(\zeta_i)] \exp(\zeta_i^2 - S_\infty^2) \right] \times \right. \\ \left. \times \cos^2(\Theta_i) \Delta\Omega_i \right\} \quad (12)$$

и энергии

$$E' = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{m}{2} \xi^5 \cos(\Theta) f_\infty \sin(\Theta) d\xi d\varphi d\Theta = \frac{\eta_\infty m U^3}{2} \frac{1}{\pi^{3/2} S_\infty^3} \times \\ \times \sum_{i=0}^n \left\{ \left[e^{-S_\infty^2} \left(\frac{\zeta_i^4}{2} + \frac{9}{4} \zeta_i^2 + 1 \right) + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\zeta_i^5 + 5\zeta_i^3 + \frac{15}{4} \zeta_i \right) [1 + \operatorname{erf}(\zeta_i)] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \exp(\zeta_i^2 - S_\infty^2) \right] \cos^2(\Theta_i) \Delta\Omega_i \right\} \quad (13)$$

В данной работе предлагается следующий **алгоритм разбиения пространства на телесные углы**.

1. Задаются максимально допустимая величина телесного угла $\Delta\Omega_{max}$ и величина телесного угла для направления, совпадающего с направлением нормали к элементу поверхности $\Delta\Omega_0$.

2. Определяется шаг меридионального угла для $\Delta\Omega_0$

$$\Delta\Theta_0 = a \cos \left(1 - \frac{\Delta\Omega_0}{2\pi} \right) \quad (14)$$

телесный угол $\Delta\Omega_0$ представляет собой элемент пространства в диапазоне углов $\theta = 0 \dots \Delta\Theta_0$ и $\varphi = 0 \dots 2\pi$. Данному углу соответствует направление $\theta = 0$ и $\varphi = 0$.

3. Определяется диапазон значений меридионального угла для видимого пространства с исключённым из него телесным углом $\Delta\Omega_0$ (пространства dA)

$$\Delta\Theta_{dA} = \pi/2 - \Delta\Theta_0 \quad (15)$$

4. Задаётся количество разбиений пространства dA на меридиональные пояса n_Θ .

5. Определяется шаг между разбиениями меридиональных поясов

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_{dA} / n_\Theta \quad (16)$$

6. Определяются параметры каждого -го (при $j = 1 \dots n_\Theta$) меридионального пояса – нижняя граница первого пояса

$$\Theta_{l_1} = \Delta\Theta_0, \quad (17)$$

верхняя граница -го пояса

$$\Theta_{h_j} = \Theta_{l_j} + \Delta\Theta, \quad (18)$$

нижняя граница -го пояса

$$\Theta_{l_j} = \Theta_{h_{j-1}}; \quad (19)$$

7. Определяется первичное количество разбиений по азимутальным углам для каждого j -го пояса

$$n_{\varphi_{j_0}} = 2\pi / \Delta\varphi_{j_0} \quad (20)$$

здесь $\Delta\varphi_{j_0}$ – первичный шаг разбиений по азимутальным углам

$$\Delta\varphi_{j_0} = \frac{\Delta\Omega_{\max}}{\left[\cos(\Theta_{l_j}) - \cos(\Theta_{h_j}) \right]}; \quad (21)$$

8. Определяется точное количество разбиений по азимутальным углам для каждого j -го пояса

$$n_{\varphi_j} = \left\lfloor n_{\varphi_{j_0}} \right\rfloor + 1; \quad (22)$$

9. Уточняется шаг разбиений по азимутальным углам

$$\Delta\varphi_j = 2\pi / n_{\varphi_j}; \quad (23)$$

10. Определяются величины каждого i -го телесного угла ($i = 1 \dots n$)

$$\Delta\Omega_i = \left[\cos(\Theta_{l_j}) - \cos(\Theta_{h_j}) \right] \Delta\varphi_j, \quad (24)$$

для каждого значения j имеется свой диапазон значений индексов $k_j = n_{\varphi_j}$. При определении угла $\Delta\Omega_1$ индексам j и k_j присваивается значение $j = 1$ и $k_j = 1$. Продвижение по индексам k_j осуществляется одновременно с продвижением по индексам i , а продвижение по индексу j осуществляется только тогда, когда индекс k_j примет значение $k_j = n_{\varphi_j}$. При смене индекса j индексу k_j присваивается значение $k_j = 1$. Продвижение по индексу i осуществляется до тех пор, пока индекс $(k_j)_{j=n_{\varphi}}$ не станет равным $(k_j)_{j=n_{\varphi}} = n_{\varphi_j}$. Тогда же определится количество телесных углов n и примет значение $n = i + 1$.

11. Определяются параметры каждого i -го телесного угла – меридиональный угол направления i -го вектора молекулярной скорости для первого пояса ($i = 1 \dots n_{\varphi_1}$)

$$\Theta_i = \Delta\Theta_0 + \frac{\Delta\Theta}{2}, \quad (25a)$$

меридиональный угол направления i -го вектора молекулярной скорости ($i = [n_{\varphi_1} + 1] \dots n$)

$$\Theta_i = \Theta_{l_j} + \frac{\Delta\Theta}{2}, \quad (25b)$$

азимутальный угол направления i -го вектора молекулярной скорости

$$(\varphi_i)_{k_j=1} = 0, (\varphi_i)_{k_j \neq 1} = (\varphi_i)_{k_j-1} + \Delta\varphi_j$$

Пункты 10 и 11 выполняются в пределах одного шага по индексу i , что избавляет от необходимости отслеживать соответствия индексов i и j .

Тестирование численного решения для плотностей потоков на изолированную площадку

Для определения достаточных для точного решения интегралов значений параметров $\Delta\Omega_{max}$, $\Delta\Omega_0$ и n_Θ были проведены тестовые расчёты, в которых численные решения выражений, определяющих плотности потоков массы, нормального импульса и энергии, сравнивались с аналитическими решениями для декартовой системы координат (обозначение на графиках – vDEC, см. рис. 3–5). В качестве характерного параметра потока принималось скоростное отношение S_∞ . Тестовые расчёты проводились для значений $S_\infty = 0.6, 1, 7$. Для каждого значения S_∞ перебирались параметры разбиения полусферы $\Delta\Omega_{max}$, $\Delta\Omega_0$ и n_Θ . Параметр $\Delta\Omega_0$ отвечает за точность результата для телесного угла, сонаправленного с нормалью элемента поверхности. Параметр $\Delta\Omega_{max}$ отвечает за точность результата для всех телесных углов, за исключением угла, сонаправленного с нормалью элемента поверхности. Параметр n_Θ отвечает за соотношения между $\Delta\Theta$ и $\Delta\varphi_j$. Так как параметр $\Delta\varphi_j$ для каждого пояса свой, то добиться равенства $\Delta\Theta$ и $\Delta\varphi_j$ для всех поясов невозможно. Рекомендуется подбирать n_Θ таким образом, чтобы $\Delta\Theta \approx (\Delta\varphi_j)_{j=n_\Theta}$. Всего для тестовых расчётов было сформировано три конфигурации разбиений полусферы.

1. Первая конфигурация имеет параметры: $\Delta\Omega_{max} = 0.01$, $\Delta\Omega_0 = 0.05$, $n_\Theta = 24$ (обозначение на графиках – vSPH 1).

2. Вторая конфигурация имеет параметры: $\Delta\Omega_{max} = 0.001$, $\Delta\Omega_0 = 0.005$, $n_\Theta = 36$ (обозначение на графиках – vSPH 2).

3. Третья конфигурация имеет параметры: $\Delta\Omega_{max} = 0.0001$, $\Delta\Omega_0 = 0.0005$, $n_\Theta = 50$ (обозначение на графиках – vSPH 3).

Далее на рис. 3–5 приведены графики зависимостей относительных плотностей потоков частиц от угла α . Значения функций плотностей потоков отнесены к значениям функций плотностей потоков, посчитанных по аналитическому выражению для декартовой системы координат при значении угла $\alpha = 0$.

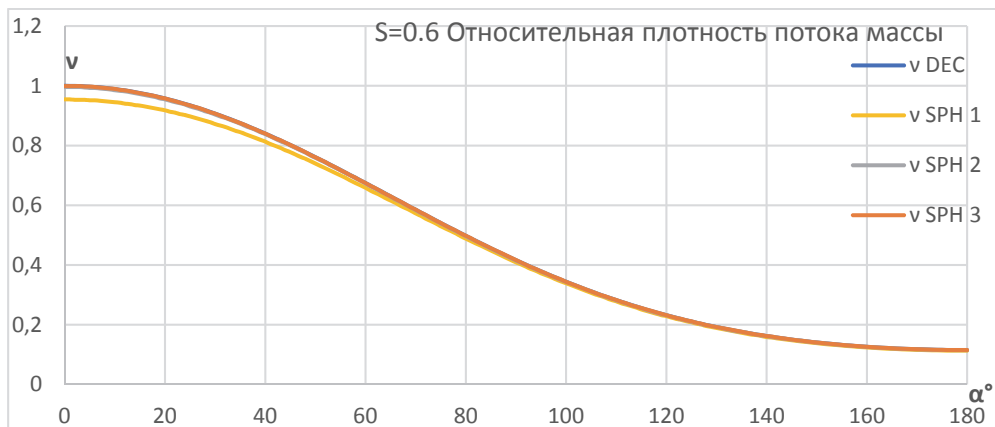


Рис. 3 / Fig. 3. График сравнения аналитического решения в декартовой СК с численными решениями в сферической СК, полученными для трёх конфигураций разбиения окружающего пространства при $S = 0.6$ / Comparison graph of the analytical solution in the Cartesian coordinate system with the numerical solutions in the spherical coordinate system obtained for three configurations of partitioning the surrounding space at $S = 0.6$

Источник: по данным автора.

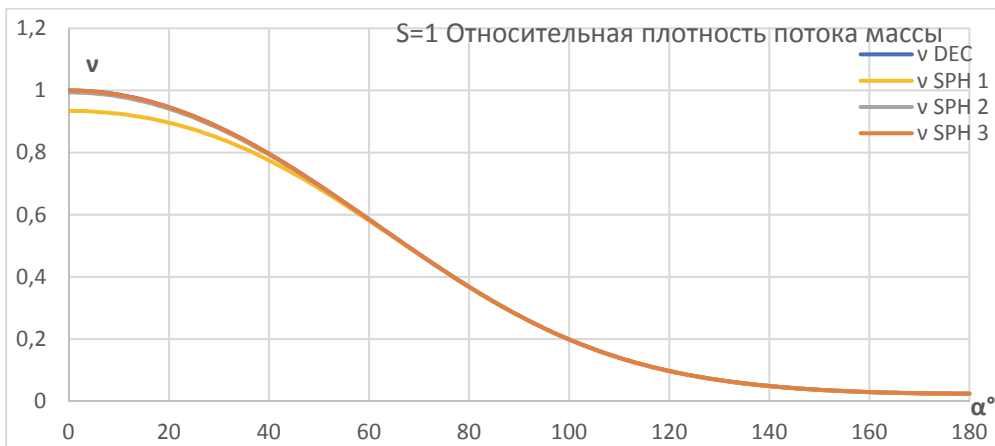


Рис. 4 / Fig. 4. График сравнения аналитического решения в декартовой СК с численными решениями в сферической СК, полученными для трёх конфигураций разбиения окружающего пространства при $S = 1$ / Comparison graph of the analytical solution in the Cartesian coordinate system with the numerical solutions in the spherical coordinate system obtained for three configurations of partitioning the surrounding space at $S = 1$.

Источник: по данным автора.

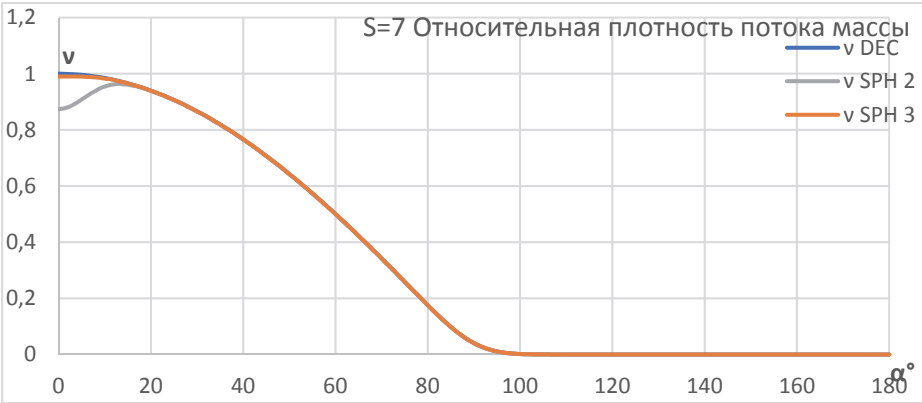


Рис. 5 / Fig. 5. График сравнения аналитического решения в декартовой СК с численными решениями в сферической СК, полученными для второй и третьей конфигураций разбиения окружающего пространства при $S = 7$ / Comparison graph of the analytical solution in the Cartesian coordinate system with the numerical solutions in the spherical coordinate system obtained for the second and third configurations of the partition of the surrounding space at $S = 7$

Источник: по данным автора.

Как видно из графиков на рис. 3–5, параметр S_∞ сильно влияет на требуемые значения параметров разбиения полусферы для обеспечения точного расчёта. Влияние скоростного отношения S_∞ увеличивается по мере его возрастания, что связано с влиянием скоростного отношения на характер распределения плотности потока по углу α . Максимальное и среднее значения относительной погрешности приведены ниже (см. табл. 1, 2).

Таблица 1 / Table 1

Максимальное значение погрешности 10^2 / Maximum error value 10^2

	Конфигурация 1			Конфигурация 2			Конфигурация 3		
	N	Pn	E'	N	Pn	E'	N	Pn	E'
$S_\infty = 0.6$	0.49	0.33	0.28	0.7	0.98	0.74	4.65	6.34	5.04
$S_\infty = 1$	0.38	0.85	0.7	0.7	0.98	1.42	6.63	8.66	7.8
$S_\infty = 7$	1.0	1.17	1.39	12.55	12.9	12.5	226	258	229

Источник: по данным автора.

Таблица 2 / Table 2

Среднее арифметическое значение погрешности 10^2 / Arithmetic mean error value 10^2

	Конфигурация 1			Конфигурация 2			Конфигурация 3		
	N	Pn	E'	N	Pn	E'	N	Pn	E'
$S_\infty = 0.6$	0.078	0.025	0.022	0.273	0.363	0.223	2.39	3.46	2.18
$S_\infty = 1$	0.07	0.042	0.022	0.219	0.309	0.198	1.65	2.308	1.664
$S_\infty = 7$	0.158	0.093	0.123	1.187	1.129	1.136	184.1	100.7	186.8

Источник: по данным автора.

Определение распределения плотности потоков на изолированную площадку с учётом экранирования

Перед определением распределения плотностей потоков массы импульса и энергии по произвольной поверхности сложной геометрической формы необходимо определить экранирование для каждой элементарной площадки, входящей в состав поверхности.

В данной работе предлагается следующий **алгоритм определения экранирования** j -го направления j -го элемента поверхности k -м элементом поверхности:

1) задаётся некоторый контрольный размер Cr , больший любого из габаритных размеров обтекаемого тела;

2) строится вектор $\vec{R}_i$ длиной Cr из центра j -го элемента поверхности, для каждого i -го направления;

3) определяется кратчайшее расстояние в каждый i -й элемент поверхности, видимый из текущего j -го элемента для каждого вектора $\vec{R}_i$, если хотя бы для одного k -го элемента кратчайшее расстояние окажется меньше, чем радиус окружности, описывающий текущий k -й элемент, то данное i -е направление данного j -го элемента считается экранированным и не учитывается в численном решении интегралов в выражениях, определяющих плотность потоков массы, нормального импульса и энергии на i -й элемент.

Определение распределения плотностей потоков массы, нормального импульса и энергии по поверхности тел сложной геометрической формы происходит в следующем порядке:

1. Поверхность разбивается на множество элементарных площадок треугольной формы.

2. Для каждой площадки определяются экранированные направления на полусфере $\vec{R}_i$ (для площадок, которые гарантированно ничем не экранируются (внешних площадок), данный шаг опускается).

3. По аналитическим выражениям для плотностей потоков массы, нормального импульса и энергии в декартовой системе координат (2, 4, 5), определяются плотности потоков на внешние элементарные площадки.

4. По выражениям для плотностей потоков массы, нормального импульса и энергии в сферической системе координат определяются плотности потоков для всех невнешних элементарных площадок, при решении численных интегралов не учитываются экранированные направления.

Некоторые результаты тестового расчёта плотностей потоков
на тело сложной формы

На рис. 6–8 приведены результаты расчётов на тестовой модели. Тестовая модель представляет из себя имитацию некоторого оборудования (панели солнечной батареи, антенны и т. п.), установленного на элементе корпуса космического аппарата. Расчёты проводились со следующими параметрами: $\Delta\Omega_{max} = 0.0001$, $\Delta\Omega_0 = 0.0005$, $n_{\Theta} = 50$, $T_{\infty} = 1500\text{K}$, $U_{\infty} = 12000\text{м/с}$. Поток состоит из трёх компонент: атомарного водорода, гелия и кислорода, с концентрациями $0.7656\text{E}+11\text{ м}^{-3}$, $0.40832\text{E}+11\text{ м}^{-3}$ и $0.10208\text{E}+11\text{ м}^{-3}$ соответственно.

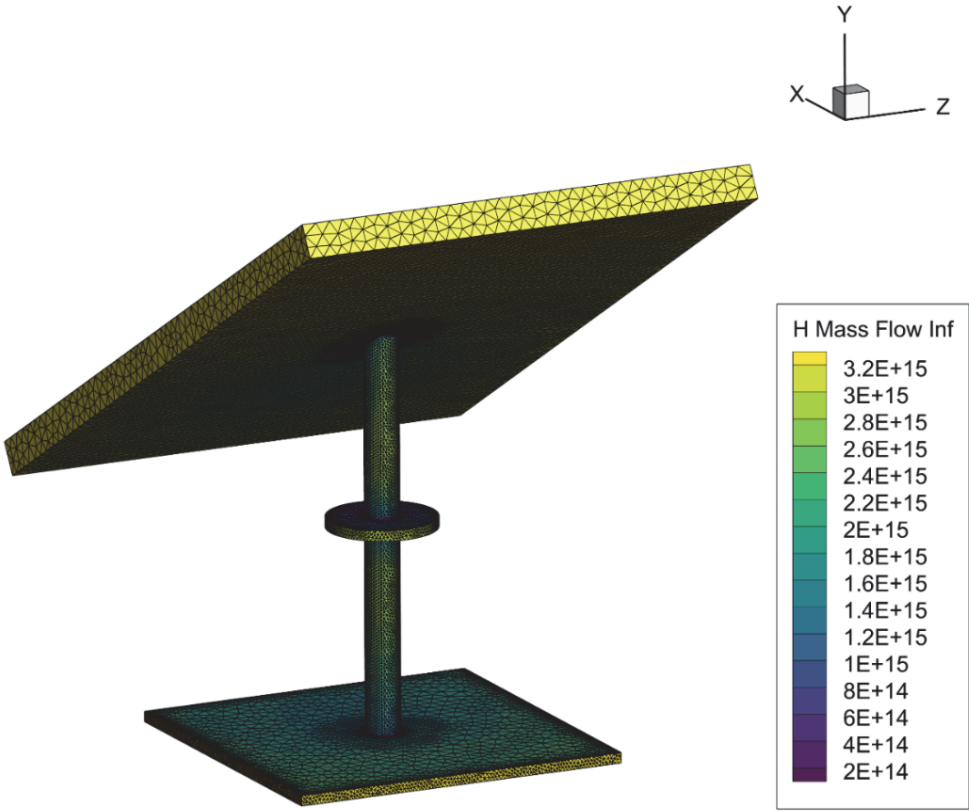


Рис 6 / Fig. 6. Расчётная сетка / Calculation grid

Источник: по данным автора.

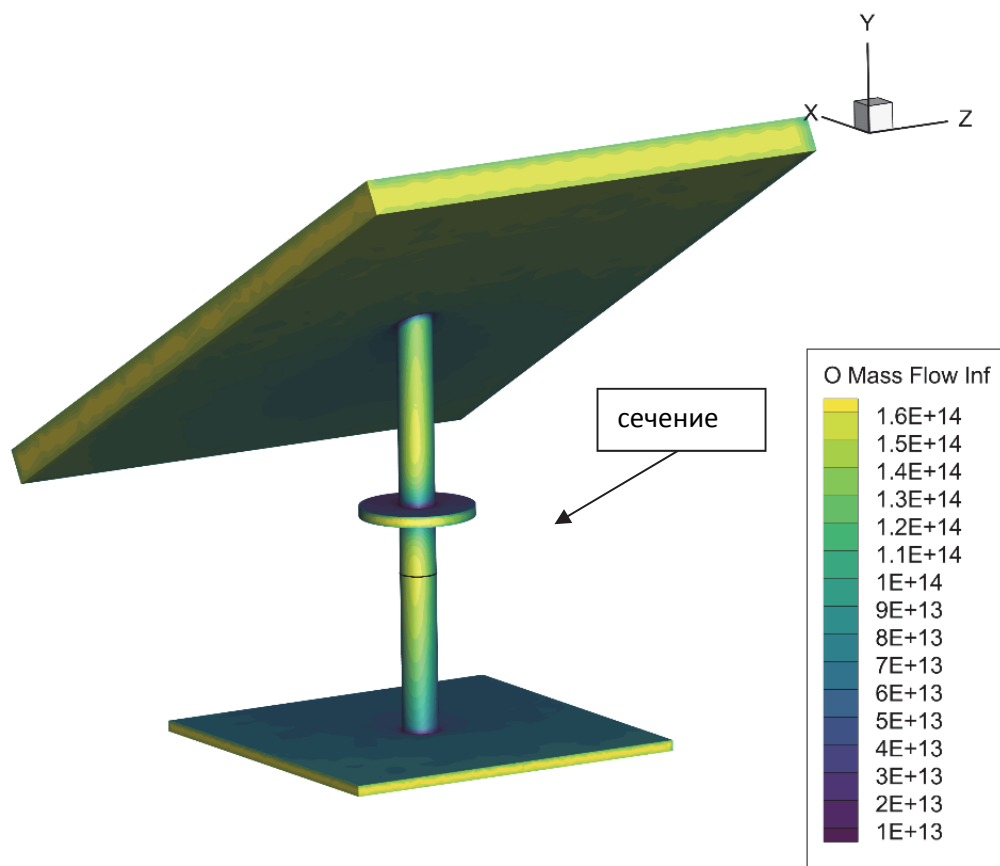


Рис. 7 / Fig. 7. Положение сечения $Y = 0.044$ ($\beta = 45^\circ$, кислород) //
Section position $Y = 0.044$ ($\beta=45^\circ$, oxygen)

Источник: по данным автора.

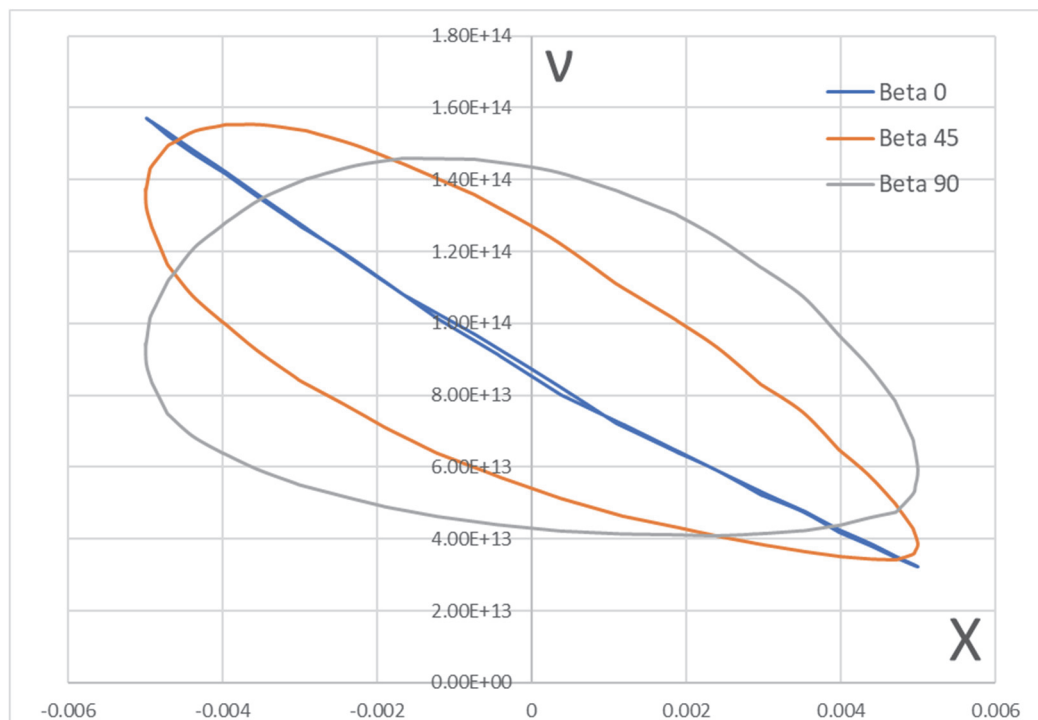


Рис. 8 / Fig. 8. Распределение плотности потока массы для кислорода по сечению $Y = 0.044$ для углов $\beta = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$ и $\beta = 90^\circ$ / Distribution of the mass flux density for oxygen over the cross section $Y = 0.044$ for angles $\beta = 0$, $\beta = 45^\circ$ и $\beta = 90^\circ$

Источник: по данным автора.

Выводы

В ходе работы получен и протестирован ресурсоэкономичный способ определения плотностей падающих потоков массы, нормального импульса и энергии по поверхности тела произвольной сложной формы. Данный способ применяется в разрабатываемом методе для определения распределения плотности адсорбированных частиц по поверхности тела сложной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модель Космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. Т. 1: Физические условия в космическом пространстве / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007. 872 с.
2. Модель Космоса: Научно-информационное издание: в 2 т Т.2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
3. Аэрогидромеханика / Е. Н. Бондарев, В. Т. Дубасов, Ю. А. Рыжов, С. Б. Свищевский, Н. В. Семенчиков. М.: Машиностроение, 1993. 608 с.
4. Баранцев Р. Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. М.: Наука, 1975. 344 с.

5. Басс В. П., Бразинский В. И. Газодинамические аспекты формирования собственной атмосферы космических аппаратов, движущихся в верхних слоях атмосферы // Наблюдение искусственных спутников Земли (Публикации научных результатов сотрудничества Интеркосмос). № 24. М.: Астрономический совет СССР, 1986. С. 158–179.
6. Басс В. П., Бразинский В. И. Влияние параметров собственной внешней атмосферы на функционирование летательных аппаратов // Наблюдение искусственных небесных тел. 1984. № 81. С. 87–99.
7. Бразинский В. И. Расчёт параметров собственной атмосферы в окрестности летательных аппаратов сложной формы // Прикладные вопросы аэродинамики летательных аппаратов. Киев: Наукова Думка, 1984. С. 50–54.
8. О методах расчёта параметров собственной внешней атмосферы космических аппаратов / Ю. А. Рыжов, М. П. Бургасов, К. Н. Кузовкин, С. Б. Свирщевский // Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по динамике разреженных газов. Т. 1. М.: Б. и., 1986. С. 107.
9. Басс В. П., Ковтуненко В. М., Чепурной В. Н. К определению аэродинамических характеристик тел сложной формы в свободномолекулярном потоке с учётом затенения // Космические исследования. 1973. Т. XII. № 1. С. 3–43.
10. Басс В. П. Об одном алгоритме для комплексного исследования аэродинамических характеристик космических аппаратов // Космические исследования на Украине. Вып. 11. Киев: Наукова Думка, 1977. С. 11–17.
11. Абрамовская М. Г., Басс В. П. Учёт эффектов экранирования в алгоритмах численного моделирования свободномолекулярных течений // Аэродинамика, тепло- и массообмен в разреженном газе: труды VIII Всесоюзной конференции по динамике разреженных газов. М., 1987. С. 41–45.
12. Шидловский В. П. Введение в динамику разреженного газа. М.: Наука, 1965. 220 с.
13. Коган М. Н. Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967. 440 с.
14. Кошмаров Ю. А., Рыжов Ю. А.. Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.

REFERENCES

1. Panasyuk, M. I. & Novikov, L. S., eds. (2007). *Model of Space: Scientific and information publication: In 2 volumes. Volume 1: Physical conditions in outer space*. Moscow: KDU publ. (in Russ.).
2. Panasyuk, M. I. & Novikov, L. S., eds. (2007). *Model of Space: Scientific information publication: in 2 volumes. Volume 2: Impact of the space environment on materials and equipment of spacecraft*. Moscow: KDU publ. (in Russ.).
3. Bondarev, E. N., Dubasov, V. T., Ryzhov, Yu. A., Svirshchevsky, S. B. & Semenchikov, N. V. (1993). *Aerohydrodynamics*. Moscow: Mashinostroenie publ. (in Russ.).
4. Barantsev, R. G. (1975). *Interaction of rarefied gases with streamlined surfaces*. Moscow: Nauka publ. (in Russ.).
5. Bass, V. P. & Brazinskiy, V. I. (1986). Gas-dynamic aspects of formation of proper atmosphere of spacecraft moving in the upper layers of the atmosphere. In: *Observation of artificial Earth satellites (Publications of scientific results of the Intercosmos collaboration)*. No. 24. Moscow: Astronomical Council of the USSR publ., pp. 158–179 (in Russ.).

6. Bass, V. P. & Brazinskiy, V. I. (1984). Influence of the parameters of one's own external atmosphere on the functioning of aircraft. In: *Observation of artificial celestial bodies*, 81, 87–99 (in Russ.).
7. Brazinskiy, V. I. (1984). Calculation of the parameters of the proper atmosphere in the vicinity of aircraft of complex shape. In: *Applied issues of aircraft aerodynamics*. Kyiv: Naukova Dumka publ., pp. 50–54 (in Russ.).
8. Ryzhov, Yu. A., Burgasov, M. P., Kuzovkin, K. N. & Svirshchevsky, S. B. (1986). On methods for calculating the parameters of the proper external atmosphere of spacecraft. In: *Abstracts of reports of the VIII All-Union Conference on the dynamics of rarefied gases. Vol. 1*. Moscow. P. 107 (in Russ.).
9. Bass, V. P., Kovtunencko, V. M. & Chepurnoy, V. N. (1973). On the determination of aerodynamic characteristics of complex-shaped bodies in a free-molecular flow taking into account shading. In: *Space Research*, XII (1), 3–43 (in Russ.).
10. Bass, V. P. (1977). On an algorithm for a comprehensive study of the aerodynamic characteristics of spacecraft. In: *Space Research in Ukraine. Iss. 11*. Kyiv: Naukova Dumka publ., pp. 11–17 (in Russ.).
11. Abramovskaya, M. G. & Bass, V. P. (1987). Taking into account screening effects in algorithms for numerical modeling of free molecular flows. In: *Aerodynamics, heat and mass transfer in a rarefied gas: Proceedings of the VIII All-Union Conference on the Dynamics of Rarefied Gases*. Moscow, pp. 41–45 (in Russ.).
12. Shidlovsky, V. P. (1965). *Introduction to Rarefied Gas Dynamics*. Moscow: Nauka publ. (in Russ.).
13. Kogan, M. N. (1967). *Rarefied Gas Dynamics*. Moscow: Nauka publ. (in Russ.).
14. Koshmarov, Yu. A. & Ryzhov, Yu. A. (1977). *Applied dynamics of rarefied gas*. Moscow: Mashinostroenie publ. (in Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Коротков Данил Павлович (г. Королёв, Московская обл.) – инженер кафедры 106 «Аэродинамика, динамика и управление летательных аппаратов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета);
ORCID: 0000-0002-7147-7784; e-mail: danel-09@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Daniil P. Korotkov (Korolev, Moscow Region) – Engineer, Department 106 “Aerodynamics, Dynamics and Control of Aircraft”, Moscow Aviation Institute (National Research University);
ORCID: 0000-0002-7147-7784; e-mail: danel-09@yandex.ru