

Исследование аэродинамических характеристик альтернативных форм посадочного аппарата для изучения Венеры

© А.В. Косенкова¹, В.Е. Миненко¹, С.Б. Быковский¹, А.Г. Якушев²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²АО «АэроКомпозит», Москва, 125284, Россия

В настоящее время актуальными становятся вопросы создания космического аппарата для продолжения фундаментальных исследований Венеры, в частности, разработка посадочного аппарата для изучения поверхности планеты. В данной статье рассмотрены посадочные аппараты различных типов для осуществления маневренного спуска на поверхность Венеры, а также проведен их сравнительный анализ. Рассмотрен посадочный аппарат класса «несущий корпус» с улучшенными проектными характеристиками по сравнению с традиционно используемыми посадочными аппаратами баллистического типа. Представлен расчет аэродинамических характеристик посадочного аппарата класса «несущий корпус» численным методом по ньютоновской теории обтекания на гиперзвуковых скоростях. Предлагаемые конфигурации посадочного аппарата обладают определенным аэродинамическим качеством на гиперзвуковых скоростях и способны маневрировать и совершать посадку в требуемые районы, наиболее привлекательные для исследования и безопасные.

Ключевые слова: посадочный аппарат, аэродинамические формы, маневренность посадочного аппарата, Венера, гиперзвуковой диапазон скоростей

Введение. В настоящее время после длительного перерыва вновь рассматриваются проекты для продолжения исследований планеты Венера, в том числе создание посадочных аппаратов (ПА) нового поколения для изучения ее поверхности. Районы посадок, где наблюдаются следы происходивших в прошлом тектонических процессов, вызывают особый интерес у ученых и технических специалистов. В связи с этим актуальным становится создание ПА, способных осуществлять маневренный спуск на поверхность Венеры, для чего проведено исследование возможностей различных аэродинамических форм аппаратов.

Проблемы, решаемые при проектировании космического аппарата (КА), в частности, входящего в атмосферу и совершающего посадку на поверхность другой планеты, достаточно сложны, а спуск в атмосфере и посадка аппаратов на поверхность планеты являются одними из наиболее сложных и ответственных операций экспедиции.

Цель данной работы — рассмотрение возможности использования новых конфигураций посадочных аппаратов, имеющих определенное аэродинамическое качество на гиперзвуковых скоростях и обладающих способностью совершать маневры, в том числе обосно-

вание предложения использовать для ПА аэродинамическую схему «несущий корпус».

В ходе работы рассмотрено несколько альтернативных вариантов ПА для изучения поверхности Венеры с возможностью осуществления маневров на этапе спуска в атмосфере для посадки в требуемые районы. Проведен сравнительный анализ этих аппаратов и определены их проектные возможности в отношении маневренности и массовых характеристик, представлены аэродинамические характеристики ПА класса «несущий корпус».

Атмосфера Венеры. В качестве расчетной модели атмосферы Венеры в настоящее время используется Коспаровская модель атмосферы Венеры VIRА-30 (Venus International Reference Atmosphere — Международная справочная атмосфера Венеры) [1–3]. На рис. 1 для сравнения приведены вертикальные профили плотности ρ_0 , давления P и температуры T атмосферы Венеры и Земли (в последнем случае параметры отмечены индексом «З») [4]. Как ясно из графиков, на границе атмосферы сходство параметров больше, нежели у поверхности планет, где различие составляет несколько порядков.

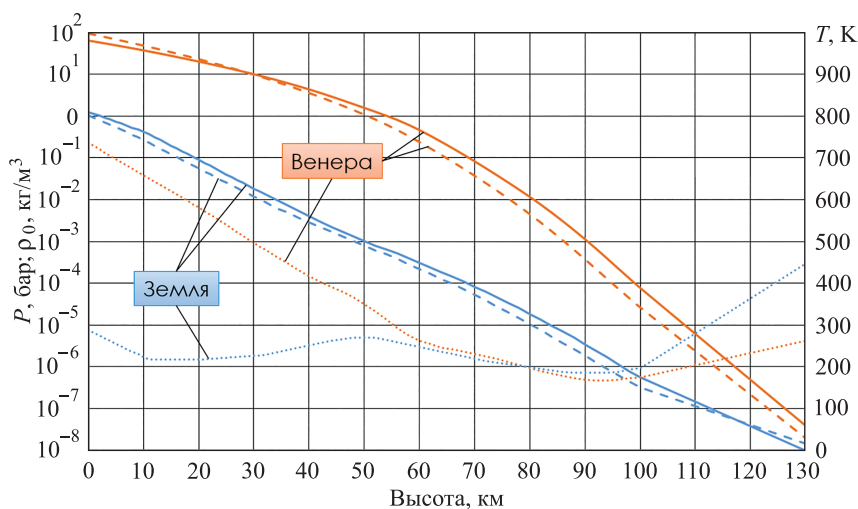


Рис. 1. Параметры атмосферы Венеры и Земли:

— ρ_0 ; - - P ; — $\rho_{0З}$; - - $P_З$; ····· T ; ····· $T_З$

Такие характеристики атмосферы вблизи поверхности Венеры создают довольно большие трудности при создании посадочных аппаратов и осуществлении его спуска в атмосфере планеты.

Рассмотрение вариантов ПА. Последние посадочные аппараты в составе космических аппаратов, или автоматических межпланетных станций (АМС), как они назывались ранее, разработанные в СССР для исследования планеты Венера: «Венера-15, -16», «Вега-1, -2», (рис. 2),

имели сферическую форму и относились к аппаратам баллистического типа, характеризующимся аэродинамическим качеством на гиперзвуковых скоростях $K_{гип} = 0$ и не обеспечивающим возможности маневрирования на участке спуска в атмосфере. Аналогично, если рассматривать зарубежные проекты, то единственные американские спускаемые аппараты в рамках миссии «Пионер-Венера-2» (рис. 3), имевшие коническую форму, также относились к аппаратам

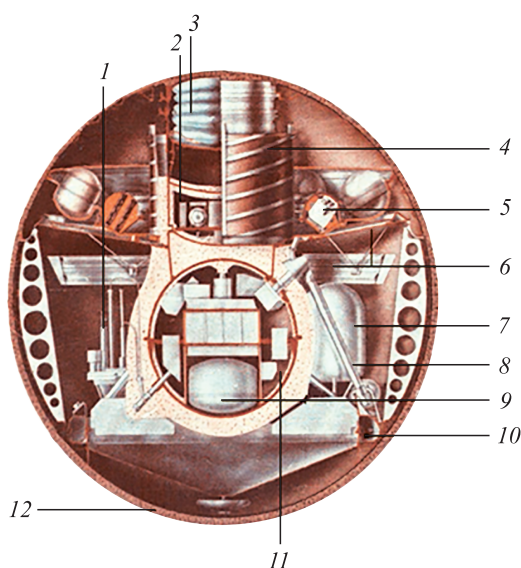
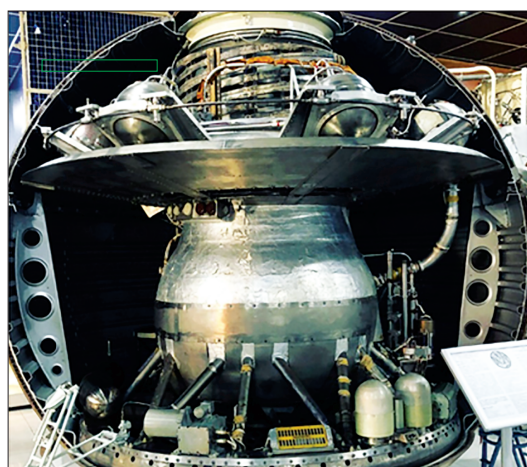


Рис. 2. Посадочный аппарат автоматической межпланетной станции «Вега» (фото из музея АО «НПО Лавочкина» [5]):

1 — грунтозаборное устройство; 2 — отсек научной аппаратуры; 3 — парашютный отсек; 4 — антенна; 5 — аэростат; 6 — аэродинамический стабилизатор; 7 — газовый хроматограф; 8 — ультрафиолетовый спектрометр; 9 — химическая батарея; 10 — посадочное устройство; 11 — приборный контейнер; 12 — теплозащитная оболочка

баллистического типа и характеризовались нулевым аэродинамическим качеством на гиперзвуковых скоростях. Вход этих аппаратов в атмосферу планеты происходил со скоростью, примерно равной 11 км/с, что немного превышает значение второй космической скорости для Венеры (10,4 км/с).

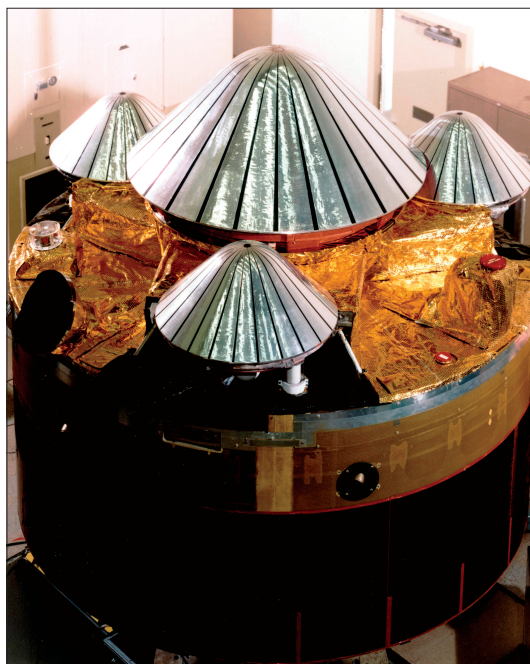


Рис. 3. Автоматическая межпланетная станция «Пионер-Венера-2» с одним большим зондом в центре и тремя идентичными малыми зондами вокруг [6]

Рассмотрение возможности входа в атмосферу Земли со второй космической скоростью (аппараты лунной экспедиции) и с гиперболическими скоростями (спуск при возвращении из марсианской экспедиции) показало абсолютную необходимость увеличения аэродинамического качества ПА и рациональность перехода на заостренные конфигурации. Исследованиями установлено, что следует перейти к аппаратам другого класса, а именно — класса «несущий корпус» [7]. В связи с этим рассматривается вопрос о возможности использования ПА класса «несущий корпус» для спуска в атмосфере Венеры.

В настоящее время для продолжения фундаментальных исследований Венеры российско-американской группой инженеров, ученых и технических специалистов ведется работа над новым проектом «Венера-Д» [8]. В рамках работы объединенной научной группы, в которую входят Роскосмос, Институт космических исследований

(ИКИ), НПО им. С.А. Лавочкина и НАСА, научно-исследовательские университеты США, проводится анализ архитектуры миссии «Венера-Д» и изучаются варианты совместного сотрудничества. Предполагается, что основными элементами миссии могут стать российские посадочный и орбитальный аппараты, в качестве возможного вклада НАСА рассматривается создание венерианской атмосферной маневренной платформы VAMP (Venus Atmospheric Maneuverable Platform) [9].

В настоящее время исполнение посадочного модуля выбрано аналогичным исполнению посадочных аппаратов АМС серии «Венера» и «Вега» (см. рис. 2).

Аппараты баллистического типа использовались на первоначальных этапах исследования Венеры, поскольку подобная конструкция довольно проста и надежна, при этом основной целью было достижение поверхности планеты с функционирующей аппаратурой.

В данной работе предлагается рассмотреть возможность использования новых конфигураций ПА, обладающих способностью совершать значительные маневры и, соответственно, обеспечивающих большую широту охвата поверхности, с целью выбора требуемого района посадки, а также возможных зон для безопасной посадки.

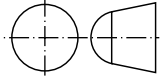


Сравнение аэрокосмических межпланетных посадочных аппаратов различных типов приведено в табл. 1.

При переходе от аппаратов баллистического типа к ПА класса «несущий корпус» улучшаются показатели аэродинамического качества и маневренности, однако незначительно ухудшаются массовые характеристики вследствие небольшого усложнения конструкции этих аппаратов по сравнению с ПА баллистического типа. Аппараты класса «несущий корпус» по простоте аэродинамических обводов близки к аппаратам класса «скользящий спуск», а по аэродинамическим характеристикам на гиперзвуковых скоростях приближаются к крылатым ракетопланам [7].

Предлагаемые ПА должны пройти предварительную отработку при входе в атмосферу Земли, но с научной аппаратурой для исследования Венеры, при этом решаются вопросы управления на участке входа, уточняются тепловые режимы и исследуется режим посадки. На начальном этапе исследований используются парашютная, парашютно-реактивная системы посадки, позволяющие проводить многократные испытания.

Выполним расчет аэродинамических характеристик для варианта ПА класса «несущий корпус», поскольку он обладает большим аэродинамическим качеством и способен совершать более существенные маневры по сравнению с ПА класса «скользящий спуск».

Характеристики межпланетных венерианских посадочных аппаратов различных типов

Сравниваемые параметры и критериальные оценки	Параметр	Классификационные типы ПА		
		Баллистические аппараты 	«Скользкий спуск» 	«Несущий корпус» 
Аэродинамическое качество на гиперзвуковых скоростях ($M > 6$)	$K_{гип} = C_{ya} / C_{xa}$ диапазон среднее значение	0 0	0,15–0,5 0,3	0,8–1,5 1,0
Диапазон изменения аэродинамического качества при переходе от гиперзвукового к дозвуковому режиму спуска	$K_{доз}$	0	0–0,5	2–3,5
	$\bar{K} = K_{доз} / K_{гип}$	1	1,5	2,5
Массовые характеристики	$K_m = G_{МВПА} / G_{МВПА.б}$	1	1,2	1,5
Коэффициент заполнения (объемный КПД)	$K_{зап} = 4,836 \frac{(V_{\Sigma})^{2/3}}{S_{\Sigma}}$	1,00–0,85	0,95–0,75	0,75–0,60
Относительная масса теплозащитного покрытия	$\bar{K}_{ТЗП} = G_{ТЗП} / G_{МВПА}$	0,15–0,28	0,12–0,25	0,12–0,20
Боковой маневр в атмосфере, км	$L_{бок}$	0	30–80	800–1200

Примечание. Здесь МВПА — межпланетный венерианский посадочный аппарат; МВПА.б — межпланетный венерианский посадочный аппарат баллистического класса.

Аэродинамические характеристики ПА типа «несущий корпус». Рассчитаем аэродинамические характеристики численным методом, используя теорию обтекания Ньютона [10], которая позволяет получить довольно объективные оценки значений аэродинамических характеристик в диапазоне скоростей $M \geq 4 \dots 6$. В соответствии с теорией Ньютона, среда, обтекающая тело, состоит из одинаковых

частиц, расположенных на равном расстоянии друг от друга и не взаимодействующих между собой [11, 12]. При столкновении с поверхностью тела (неупругий удар) частицы теряют нормальную к элементу поверхности составляющую количества движения, вследствие чего возникает сила давления потока на тело. Тангенциальная составляющая при столкновении остается неизменной. Таким образом, ударная волна предполагается лежащей на поверхности тела, а коэффициент давления на поверхности тела определяется формулой

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{q_\infty} = 2 \sin^2 \eta,$$

где p — давление на поверхности тела; p_∞ , q_∞ — статическое давление и скоростной напор набегающего потока; η — угол между вектором скорости невозмущенного потока и элементарной площадкой поверхности тела.

Действительный механизм взаимодействия молекул газа с твердыми границами тела в принципе отличается от ньютоновского. Однако при обтекании тел газом с очень большой сверх- и гиперзвуковой скоростью картина течения сходна с той, которая была принята Ньютоном при рассмотрении неупругого столкновения частиц с телом.

Для получения аэродинамических характеристик численным методом поверхность аппарата разбиваем на малые элементы, для каждого из которых по формуле Ньютона рассчитываем коэффициенты давления с учетом «аэродинамической тени» аппарата, где давление принимали равным статическому давлению в свободном потоке: $p_e = p_\infty$, т. е. $C_{pe} = 0$. Далее полученные векторы коэффициентов сил, действующие на элементарные ячейки, складываем и преобразуем в суммарные аэродинамические коэффициенты C_x и C_y для каждого значения угла атаки от 0 до 180°. Силы трения не учитываем.

Математически выражение для коэффициентов давления может быть записано в виде

$$C_p = \frac{\vec{P}}{\rho_\infty |\vec{v}_\infty|^2 S} = -\frac{1}{S} \int_{\substack{S \in S_p \\ S \notin S_t}} \vec{n} \sin^2 \eta dS,$$

где \vec{P} — вектор суммарной аэродинамической силы, действующей на тело, Н; ρ_∞ — плотность невозмущенного потока, кг/м³; \vec{v}_∞ — вектор скорости невозмущенного потока, м/с; \vec{n} — нормаль к поверхности (нормированный вектор); dS — площадь элементарной

площадки, м^2 ; S — площадь поверхности аппарата, м^2 ; S_p , S_t — площадь поверхности и площадь тени соответственно, м^2 .

Аэродинамические характеристики ПА класса «несущий корпус» без дополнительных плоскостей представлены на рис. 4, с кормовым щитком при угле раскрытия 17° — на рис. 5. На рис. 5 приняты следующие обозначения: C_x , C_y — коэффициенты тангенциальной и нормальной сил соответственно в связанной системе координат (рис. 6); C_{xa} , C_{ya} — коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы соответственно в скоростной системе координат (см. рис. 6); α — балансировочный угол атаки, град.

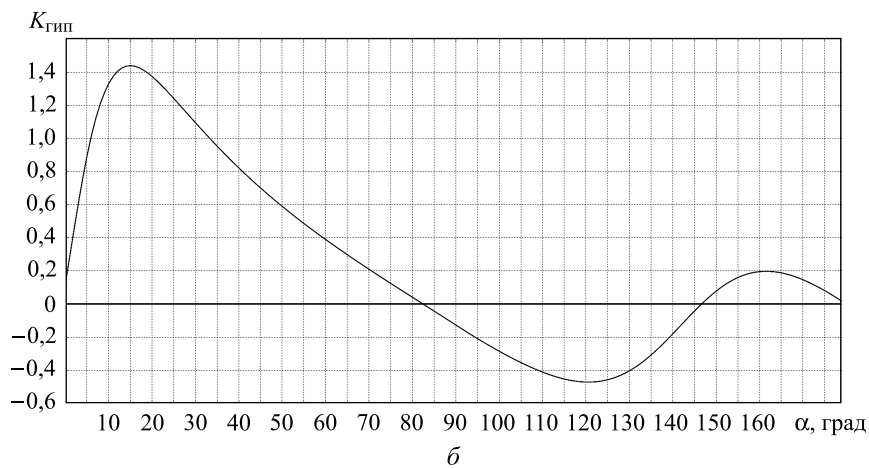
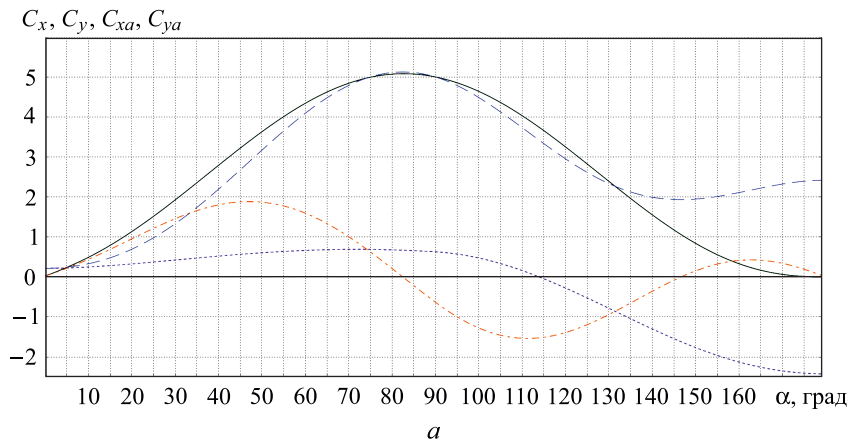


Рис. 4. Коэффициенты аэродинамических сил в связанной и скоростной системах координат (а) и аэродинамическое качество на гиперзвуковых скоростях (б) для аппарата класса «несущий корпус» без дополнительных поверхностей:

..... C_x ; — C_y ; - - C_{xa} ; - - C_{ya}

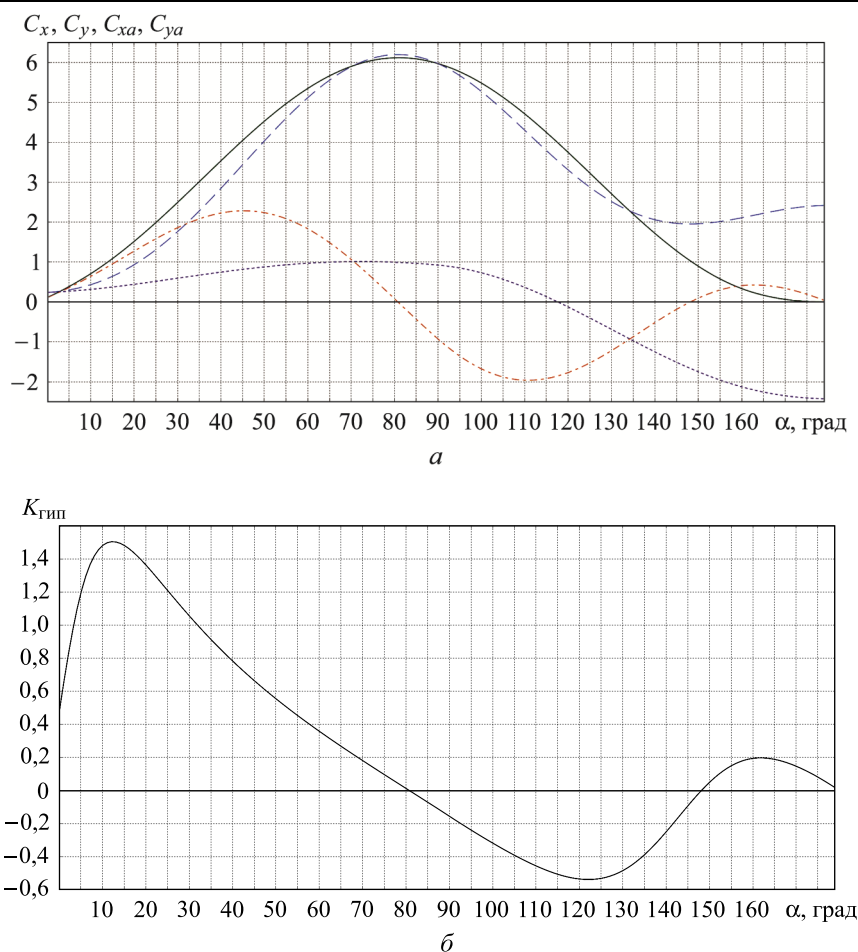


Рис. 5. Коэффициенты аэродинамических сил в связанной и скоростной системах координат (а) и аэродинамическое качество на гиперзвуковых скоростях (б) для аппарата класса «несущий корпус» с кормовым щитком:

..... C_x ; — C_y ; - - C_{xa} ; - - C_{ya}

Аэродинамические характеристики аппарата определяют закон управления его движением на участке спуска, а также параметры системы исполнительных органов системы управления (двигатели, аэродинамические рули, щитки и т. д.).

Для того чтобы понять, будет ли ПА устойчив, определим расположение центра масс и центра давления для двух вариантов ПА класса «несущий корпус» при аэродинамическом качестве $K_{гип} \cong 1,4$ (табл. 2).

Как ясно из данных таблицы, ПА класса «несущий корпус» без дополнительных плоскостей аэродинамически неустойчив при требуемом значении $K_{гип} \cong 1,4$. Установка балансировочного груза или перекомпоновка систем и оборудования с освобождением хвостовой

части ПА может сдвинуть центр масс влево по оси x связанной системы координат (СК) для достижения устойчивости ПА. В данном варианте рассмотрена балансировка аппарата путем добавления только кормового щитка с углом раскрытия $\gamma = 17^\circ$ (см. рис. 6). При выборе значения балансировочного угла атаки в диапазоне $16...24^\circ$ обеспечивается устойчивое положение ПА с балансировочным щитком. Примем $K_{гип} \cong 1,4$; $\alpha = 18^\circ$; $C_x = 0,42$; $C_y = 1,34$; $C_{xa} = 0,81$; $C_{ya} = 1,15$ (см. рис. 5). Схема действия аэродинамических сил для данного ПА представлена на рис. 6.

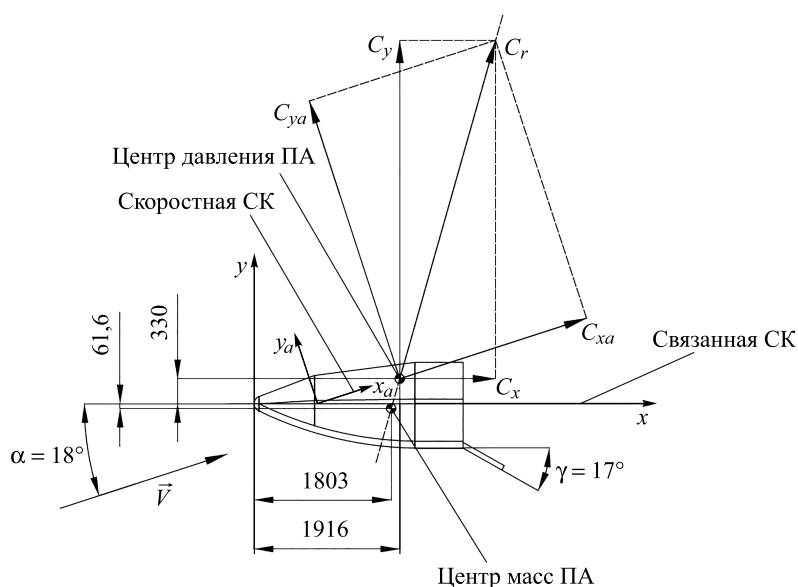


Рис. 6. Схема действия аэродинамических сил

Таблица 2

Координаты центра масс и центра давления для ПА класса «несущий корпус»

Наименование	ПА без дополнительных плоскостей	ПА с кормовым щитком
Центр масс	$x_{ц.м} = 1803$ мм, $y_{ц.м} = -61,6$ мм	
Центр давления	$x_{ц.д} = 1669$ мм, $y_{ц.д} = 1051$ мм	$x_{ц.д} = 1916$ мм, $y_{ц.д} = 330$ мм

Примечания. 1. Считаем, что расположение центра масс в результате добавления кормового щитка изменяется незначительно.
 2. Угол раскрытия кормового щитка 17° .
 3. Балансировочный угол атаки 18° .

Исследуемая форма ПА хорошо поддается балансировке при требуемом значении $K_{\text{тип}} \geq 1$ путем добавления только кормового щитка, при необходимости еще большего увеличения качества дополнительно может быть использована перекомпоновка систем.

Заключение. В ходе данной работы рассмотрены различные типы ПА для осуществления маневренного спуска на поверхность Венеры, проведен сравнительный анализ аппаратов и определены их проектные возможности в отношении маневренности и массовых характеристик. Произведен расчет аэродинамических характеристик ПА класса «несущий корпус» численным методом по ньютоновской теории обтекания на гиперзвуковых скоростях. В результате показана возможность использовать ПА данного типа для маневрирования в атмосфере Венеры. Устойчивость ПА при этом может быть достигнута различными способами, из которых наиболее выгодным и простым является добавление кормового щитка, который позволяет потенциально увеличить аэродинамическое качество.

Основными техническими характеристиками ПА предлагаемых конфигураций являются высокая маневренность, возможность посадки в заданные районы, наиболее привлекательные для исследования и безопасные, а также улучшение тепловых режимов и снижение перегрузок при входе в атмосферу планеты Венера.

Следует, однако, отметить, что для разработки новой конфигурации ПА требуется отдельная проработка не только формы аппарата, но и вопросов, касающихся системы управления, организации связи и навигации для осуществления маневров ПА, комплекса средств посадки и др.

В целом такой аппарат может быть создан на базе уже существующих средств с применением современного и рассмотрением перспективного уровней развития ракетно-космической техники.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Keating G.M., Bertaux J.-L., Bougher S.W., Cravens T.E., Dickinson R.E., Hedin A.E., Krasnopolsky V.A., Nagy A. F., Nicholson J.Y., Paxton L.J., Von Zahn U. VIRA (Venus International Reference Atmosphere) Models of Venus neutral upper atmosphere: Structure and composition. Kliore A.J., Moroz V.I., Keating G.M., eds. *Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin)*, 1985, vol. 5, no. 11, pp. 117–171.
- [2] Moroz V.I., Zasova L.V. VIRA-2: A Review of Inputs for Updating the Venus International Reference Atmosphere. *Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin)*, 1997, vol. 19, no. 8, pp. 1191–1201.
- [3] Засова Л.В., Мороз В.И., Линкин В.М., Хатунцев И.В., Майоров Б.С. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км. *Космические исследования*, 2006, № 44, с. 381–400.
- [4] ГОСТ 4401–81. *Атмосфера стандартная. Параметры*. Москва, ИПК Издательство стандартов, 2004, 165 с.

- [5] Музей АО «НПО Лавочкина». URL: <https://www.laspase.ru/museum/> (дата обращения 11.04.2018).
- [6] *Our Space Heritage 1960–2000*. URL: <http://www.hughescgheritage.com/pioneer-venus-photographs-jack-fisher/comment-page-1/> (дата обращения 11.04.2018).
- [7] Миненко В.Е., Агафонов Д.Н., Якушев А.Г., Елисеев А.Н. Проектный, аэродинамический и термобаллистический анализ спускаемого аппарата класса «несущий корпус». *Наука и образование*, 2015, № 10. DOI: 10.7463/1015.0815132
- [8] *Report of the Venera-D Joint Science Definition Team*. URL: http://www.iki.rssi.ru/events/2017/venera_d.pdf (дата обращения 11.04.2018).
- [9] Лемешевский С.А., Графодатский О.С., Карчаев Х.Ж., Воронцов В.А. Космические аппараты для контактных исследований планеты Венера. Опыт и перспективы (к 80-летию НПО имени С.А. Лавочкина и 50-летию космического аппарата «Венера-4»). *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2017, № 2, с. 52–58.
- [10] Аржанников Н.С., Садекова Г.С. *Аэродинамика летательных аппаратов*. Москва, Высшая школа, 1983, 359 с.
- [11] Краснов Н.Ф., Захарченко В.Ф., Кошевой В.Н. *Основы аэродинамического расчета*. Москва, Высшая школа, 1984, 264 с.
- [12] Лунёв В.В. *Гиперзвуковая аэродинамика*. Москва, Машиностроение, 1975, 328 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Косенкова А.В., Миненко В.Е., Быковский С.Б., Якушев А.Г. Исследование аэродинамических характеристик альтернативных форм посадочного аппарата для изучения Венеры. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1826>

Косенкова Анастасия Владимировна окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2017 г., аспирант кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — проектирование космических аппаратов, механика жидкости и газа, тепломассопереноса. e-mail: tarasova_av@laspase.ru

Миненко Виктор Елисеевич окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1956 г., д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носителя» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 120 научных трудов в области проектирования аэрокосмических возвращаемых аппаратов. e-mail: departm1@sm.bmstu.ru

Быковский Сергей Борисович окончил Харьковский авиационный институт в 1991 г., инженер МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — баллистика и динамика полета. Автор пяти статей в области проектирования аэрокосмических аппаратов. e-mail: goodday1122@mail.ru

Якушев Александр Геннадьевич окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г., инженер-конструктор второй категории, АО «АэроКомпозит». Область научных интересов — проектирование и расчет на прочность летательных аппаратов, математическое моделирование, аэрогидродинамика. e-mail: alexander.yakushev@gmail.com

Investigation of aerodynamic characteristics of lander alternative forms to study Venus

© A.V. Kosenkova¹, V.E. Minenko¹, S.B. Bykovsky¹, A.G. Yakushev²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²JSC “AeroComposite”, Moscow, 125284, Russia

Currently, creating a spacecraft to continue the fundamental Venus research and, in particular, lander development to study the surface of this planet are becoming actual issue. The article considers different types of lander for the possibility of making maneuverable descent to the Venus surface; a comparative analysis of these landers has been carried out. A lander of the “lifting body” class is considered with improved design characteristics compared to the traditionally used “ballistic descent” class landers. The calculation of the aerodynamic characteristics for the “lifting body” class lander is done by a numerical method based on the Newton’s flow theory at hypersonic speeds. Proposed configurations of the lander have a certain aerodynamic quality at hypersonic speeds and are capable of maneuvering and landing in the required areas, the most attractive for research and safe.

Key words: *lander, aerodynamic shapes, maneuverability of a lander, Venus, hypersonic speed range.*

REFERENCES

- [1] Keating G.M., Bertaux J.-L., Bougher S.W., Cravens T.E., Dickinson R.E., Hedin A.E., Krasnopolsky V.A., Nagy A. F., Nicholson J.Y., Paxton L.J., Von Zahn U. VIRA (Venus International Reference Atmosphere) Models of Venus neutral upper atmosphere: Structure and composition. Kliore A.J., Moroz V.I., Keating G.M., eds. *Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin)*, 1985, vol. 5, no. 11, pp. 117–171.
- [2] Moroz V.I., Zasova L.V. VIRA-2: A Review of Inputs for Updating the Venus International Reference Atmosphere. *Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin)*, 1997, vol. 19, no. 8, pp. 1191–1201.
- [3] Zasova L.V., Moroz V.I., Linkin V.M., Khatuntsev I.V., Mayorov B.C. *Kosmicheskie issledovaniya — Cosmic Research*, 2006, no. 44, pp. 381–400.
- [4] GOST 4401—81. *Atmosfera standartnaya. Parametry* [State Standard 4401—81. Standard atmosphere. Parameters]. Moscow, IPK Publishing house of standards, 2004, 165 p.
- [5] *Museum of Lavochkin Association*. Available at: <https://www.laspace.ru/museum/> (accessed April 11, 2018).
- [6] *Our Space Heritage 1960–2000*. Available at: <http://www.hughescgheritage.com/pioneer-venus-photographs-jack-fisher/comment-page-1/> (accessed April 11, 2018).
- [7] Minenko V.E., Agafonov D.N., Yakushev A.G., Eliseev A.N. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2015, no. 10. DOI: 10.7463/1015.0815132
- [8] *Report of the Venera-D Joint Science Definition Team*. Available at: http://www.iki.rssi.ru/events/2017/venera_d.pdf (accessed April 11, 2018).
- [9] Lemeshevsky S.A., Grafodatsky O.S., Karchaev Kh.Zh., Vorontsov V.A. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina* [Herald of Lavochkin Association], 2017, no. 2, pp. 52–58.

- [10] Arzhannikov N.S., Sadekova G.S. *Aerodinamika letatelnykh apparatov* [Aerodynamics of Aircraft]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1983, 359 p.
- [11] Krasnov N.F., Zakharchenko V.F., Koshevoi V.N. *Osnovy aerodinamicheskogo rascheta* [Fundamentals of aerodynamic calculation]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ, 1984, 264 p.
- [12] Lunyov V.V. *Giperzvukovaya aerodinamika* [Hypersonic aerodynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 328 p.

Kosenkova A. V. (b. 1994) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2017, a Ph.D. student, Spacecraft and Launch Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: spacecraft design, liquid and gas mechanics, heat and mass transfer. e-mail: _tarasova_av@laspace.ru

Minenko V.E. graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1956, Dr. Sc. (Eng.), professor, Spacecraft and Launch Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University. Author of 120 research works in the field of designing aerospace reentry vehicles. e-mail: departm1@sm.bmstu.ru

Bykovsky S.B. (b. 1966) graduated from Kharkov Aviation Institute in 1991, engineer, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: ballistics and flight dynamics. Author of 5 articles in the field of aerospace vehicles design. e-mail: goodday1122@mail.ru

Yakushev A.G. (b. 1980) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2004, design engineer of the second category, JSC “AeroComposite”. Field of research interests: aircraft design, strength calculation of the aircraft, mathematical modeling, aerohydrodynamics. e-mail: alexander.yakushev@gmail.com