

Моделирование возмущенного движения зонда-пенетратора в атмосфере Венеры

© Е.С. Алтухов, В.А. Воронцов, М.Ю. Яценко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

Планета Венера имеет плотную и «агрессивную» атмосферу, высокие температуру и давление, сильные ветры, в связи с чем возникают специфические условия для функционирования на ней исследовательских аппаратов. Поэтому такое техническое средство, как зонд-пенетратор, является наилучшим инструментом для сбора первичной научной информации о физико-химическом составе грунта, изучения сейсмической активности и климата, который поможет исследовать грунт Венеры. Проведен анализ существующих проектов, посвященных данной тематике, выбран прототип — проект «Марс-96», на базе которого можно смоделировать баллистический спуск в атмосфере космического аппарата, содержащего два пенетратора. Создана математическая модель движения зонда-пенетратора в атмосфере Венеры, и с ее помощью выполнены оценочные расчеты прототипа с разными массово-габаритными характеристиками. Поскольку во время движения аппарата в атмосфере планеты на него влияет множество возмущающих факторов, а именно ветра, турбулентности, погрешности приборов и др., их необходимо учитывать, для того чтобы получить корректные данные. Для этого была составлена соответствующая математическая модель, а также проведено стохастическое моделирование спуска методом Монте-Карло. Кроме того, в процессе моделирования были учтены возмущения по начальным условиям, связанные с погрешностью измерения приборов. В результате проведенных исследований были построены графики зависимостей траекторных параметров (скорости, траекторного угла, дальности полета, высоты, давления на мидель и др.), показавшие, что зонд достаточно аэродинамически устойчив, для того чтобы обеспечивать стабильное движение в атмосфере Венеры. При этом выяснилось, что расчетное значение скорости перед контактом с поверхностью составляет около 10 м/с и что этого недостаточно для внедрения в грунт.

Ключевые слова: зонд-пенетратор, планета Венера, грунт, проект «Марс-96», баллистический спуск, ветровые возмущения, ошибки приборов, стохастическое моделирование, скорость внедрения

Введение. Планета Венера представляет собой уникальный объект для исследования вследствие особенностей своей атмосферы. Изучение мощных ветров, плотной атмосферы и длительного воздействия высоких температур и давления, сформировавших «агрессивный» климат, специфический рельеф поверхности, а также ее химический состав, наряду с исследованием сейсмической активности и других параметров может предоставить ценную информацию о схожих процессах на Земле и других небесных телах. В настоящее время исследование Венеры снова стало актуальным для российских ученых, что

обуславливает необходимость разработки исследовательских аппаратов, способных помочь детально изучать ее атмосферу и поверхность [1, 2].

«Традиционные» технические средства исследования Венеры — орбитальные и посадочные аппараты, а также аэростатные зонды. Научную аппаратуру для изучения приповерхностных слоев атмосферы и грунта доставляли аппараты, выполнявшие «мягкую» посадку [3–5]. Однако при этом способе доставки требуется выполнить такие технические операции, которые усложняют планирование миссии и значительно повышают риски и даже приводят к неудаче в случае выхода из строя одного или нескольких элементов. В отличие от исследовательских аппаратов с мягкой посадкой, аппараты с жесткой посадкой достигают поверхности с высокой скоростью, а на финальном этапе торможения внедряются в грунт. Подобные устройства получили название «пенетраторы» [6].

При движении в атмосфере планеты космических аппаратов наряду с ее влиянием следует учитывать воздействие на них начальных условий спуска, отклоняющихся от запланированных из-за погрешностей расчетов, ошибок коррекции перелетных орбит, гравитационных возмущений и погрешностей приборов.

Цель настоящей работы — оценить степень влияния действия ветра и возмущений по начальным условиям на пассивную аэродинамическую устойчивость движущегося в атмосфере Венеры зонда-пенетратора типа «Марс-96», а также рассчитать его скорость перед контактом с поверхностью планеты при разных наборах начальных условий, а также при воздействии ветра.

Пенетратор в качестве технического средства исследования. Пенетратор, представляющий собой ударный зонд, предназначен для проникновения в грунт исследуемой планеты на глубину до нескольких метров для сбора первичной научной информации о его физико-химическом составе. После внедрения он может передавать на Землю полученные данные или образцы материала [6]. Проектирование и создание комплекса аппаратуры, работающего после ударного воздействия, является сложной задачей для разработчиков приборов. При этом следует учитывать, что научно-исследовательский комплекс, допущенный до летных испытаний, был создан только для двух проектов — «Марс-96» (Россия) и DeepSpace (США). Для других проектов такие комплексы рассматривались на уровне разных этапов наземной экспериментальной отработки, поэтому предложения по составу могут изменяться. Наиболее важные характеристики пенетратора — ударная перегрузка (n_x), скорость столкновения v и глубина проникновения в грунт.

После внедрения зонда были проведены следующие научные исследования:

- получение телевизионных изображений поверхности объекта;
- накопление данных о метеорологических условиях;
- определение элементного состава пород;
- выяснение содержания воды в породе;
- изучение сейсмоактивности;
- исследование физико-механических характеристик грунта;
- определение магнитного поля и магнитных свойств породы.

В качестве перспективного технического средства исследования Венеры было предложено использовать зонд-пенетратор, аналогичный пенетратору из проекта «Марс-96» (рис. 1), но спроектированный для функционирования в венерианских условиях.



Рис. 1. Пенетратор проекта «Марс-96» при подготовке к установке на космический аппарат [5, 7]

Моделирование движения пенетратора в атмосфере Венеры.

Для анализа процесса спуска пенетратора в условиях атмосферы Венеры была составлена математическая модель его движения в виде системы уравнений (1) [3, 4, 8], которая была верифицирована по массиву данных о движении спускаемого аппарата проекта «Вега» [3]:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = -g \sin \theta - \frac{1}{2m} \rho v^2 C_x \pm \frac{1}{2m} \rho v_{\text{ветр}}^2 C_x; \\ \frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos \theta}{\sqrt{v^2 + v_{\text{ветр}}^2}} + \frac{\sqrt{v^2 + v_{\text{ветр}}^2}}{R_{\text{пл}} + H}; \\ \frac{dH}{dt} = \sqrt{v^2 + v_{\text{ветр}}^2} \sin \theta; \\ \frac{dL}{dt} = \frac{R_{\text{пл}}}{R_{\text{пл}} + H} \sqrt{v^2 + v_{\text{ветр}}^2} \cos \theta. \end{cases}$$

Здесь v — скорость аппарата, м/с; t — время; g — ускорение свободного падения, м/с²; θ — траекторный угол, град; ρ — плотность

атмосферы Венеры; C_x — коэффициент лобового сопротивления; m — масса аппарата, кг; $v_{\text{ветр}}$ — скорость порывов ветра, м/с; $R_{\text{пл}}$ — средний радиус Венеры, км, $R_{\text{пл}} = 6051,6$ км; H — высота над поверхностью планеты, м.

Алгоритм решения приведенной системы был реализован в виде программы [9, 10].

В данной модели рассматриваются только изменения скорости (v), угла входа — траекторного угла (θ), высоты (H), дальности полета (L) и времени (t). Для моделирования погрешностей приборов используется равномерное распределение, так как у большинства из них имеется погрешность с этим распределением.

Для моделирования турбулентной, с постоянно изменяющимся ветром атмосферы Венеры использовались добавочные скорости, т. е. скорости порыва ветра, которые векторно прибавляются или отнимаются в зависимости от направления силы действия ветра и от текущей скорости аппарата. Угол направления ветра выбирается случайным — от -90° до $+90^\circ$ в сферической системе координат. При этом с изменением высоты изменяются плотность атмосферы и скорость звука. Аэродинамический коэффициент C_x изменяется в зависимости от скорости согласно данным, полученным при обдувке конуса с раствором 90° в аэродинамической трубе. Для моделирования была выбрана модель атмосферы Венеры VIRA-30 (обоснование модели представлено в [11–13]) и массово-габаритные характеристики пенетратора «Марс-96» [3, 4, 14, 15].

Первичное моделирование показало, что при спуске с надувным тормозным устройством (НТУ) диаметром $d = 4$ м значение скорости в момент перед внедрением составляло 1,6 м/с, но его крайне мало для внедрения в грунт. Для повышения столь низкой скорости необходимо исключить из конструкции зонда НТУ и оставить только аэродинамическую юбку диаметром $d = 0,8$ м. Это решение позволило перед контактом с поверхностью увеличить скорость до 10 м/с, но и она была недостаточной для внедрения на проектную глубину [14].

Для стохастического моделирования и проведения множества реализаций был использован метод Монте-Карло. Этот метод стохастического моделирования основан на использовании случайных чисел (начальных условий) для получения приближенных решений детерминированных задач. Его применение позволит продемонстрировать поведение аппарата при разных начальных условиях и случайных событиях для проведения множества экспериментов, а также проанализировать устойчивость аппарата при движении в атмосфере Венеры [16].

Начальные условия для моделирования спуска зонда следующие: масса пенетратора — 120 кг; диаметр пенетратора — 0,2 м; диаметр аэродинамической юбки — 0,8 м; площадь миделя — $0,5 \text{ м}^2$; угол раствора конуса — 90° ; длина корпуса — 0,54 м.

Схема спуска зонда-пенетратора с высоты H в течение времени t с траекторным углом θ при прямом входе в атмосферу Венеры показана на рис. 2.

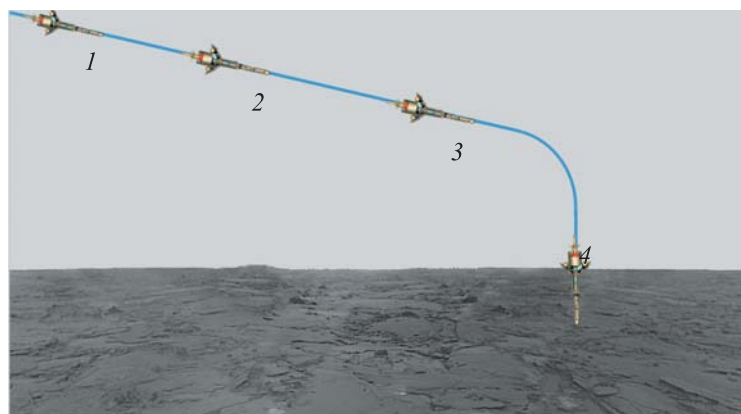


Рис. 2. Схема спуска пенетратора при прямом входе в атмосферу:

1 — вход в атмосферу ($H = 125$ км; $t = 0$ с; $\theta = -19^\circ$; $v = 11\,000$ м/с); 2 — максимальная перегрузка ($H = 80,895$ км; $t = 50$ с; $\theta = -12^\circ$; $n_x = 175,6g$; $v = 7253$ м/с); 3 — вход в плотные слои атмосферы ($H = 50$ км; $t = 1474$ с; $\theta = -36^\circ$; $v = 44$ м/с); 4 — конец вертикализации и внедрение ($H = 0$; $t = 3161,2$ с; $\theta = -90,2^\circ$; $v = 10,673$ м/с)

Были выявлены также зависимости конечной скорости (скорости приближения к поверхности) пенетратора при изменении его площади миделева сечения и массы, представленные на рис. 3 и 4 соответственно. Они показали, что существует проблема внедрения пенетратора рассматриваемой конструкции (типа «Марс-96») в грунт Венеры из-за слишком низких расчетных значений скорости (менее 10 м/с) на конечном участке движения при приближении его к поверхности, потому что значение этой скорости должно быть не менее 60 м/с.

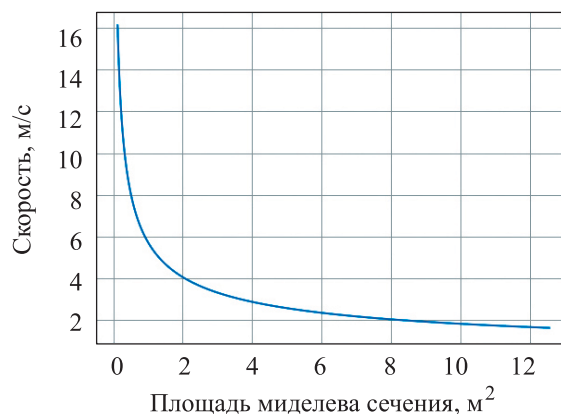


Рис. 3. Зависимость скорости в момент перед внедрением от площади миделева сечения пенетратора

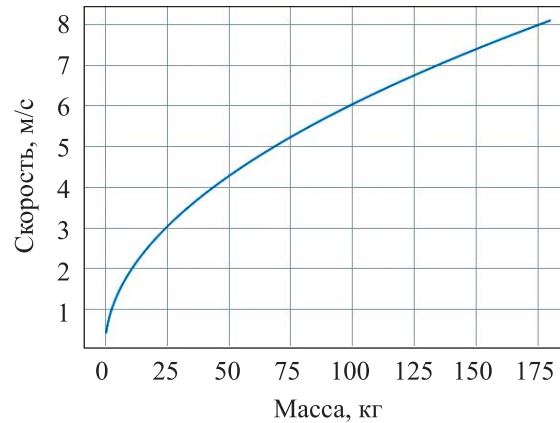


Рис. 4. Зависимость скорости в момент перед внедрением от массы пенетратора

Результаты моделирования представлены в виде графиков зависимостей разных комбинаций траекторных параметров (рис. 5–12), рассчитанных с использованием приведенной в статье математической модели. Наиболее значимыми из них в исследовании являются скорость, траекторный угол, дальность полета, давление на мидель, скоростной напор, ускорение и перегрузка.

Результат моделирования номинальной траектории движения зонда-пенетратора показан на графике, приведенном на рис. 5. Характер изменения кривых позволяет оценить чувствительность к возмущениям, влияющим на реальную траекторию.

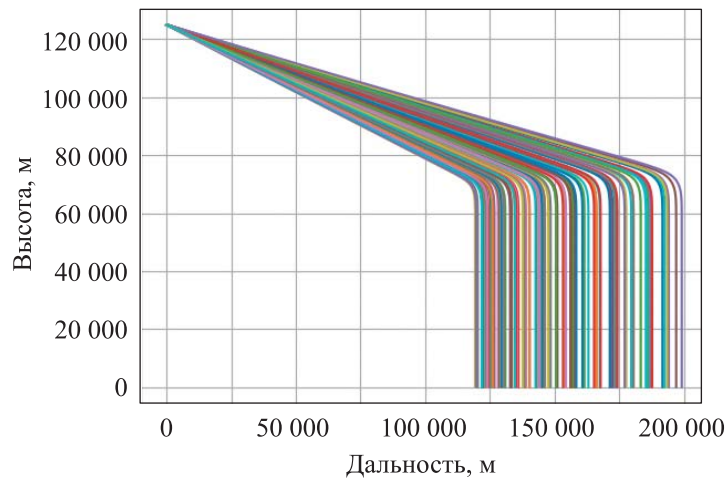


Рис. 5. График траектории движения пенетратора в зависимости от высоты

График изменения модуля скорости зонда-пенетратора при движении в плотной атмосфере Венеры приведен на рис. 6, где выделен участок торможения с максимальной интенсивностью, на котором

ожидаются пиковые аэродинамические нагрузки. Конечные значения скорости перед контактом с поверхностью Венеры не превышают 10 м/с, но они недостаточны для внедрения в грунт, что подтверждает результаты оценочных расчетов (см. рис. 3 и 4).

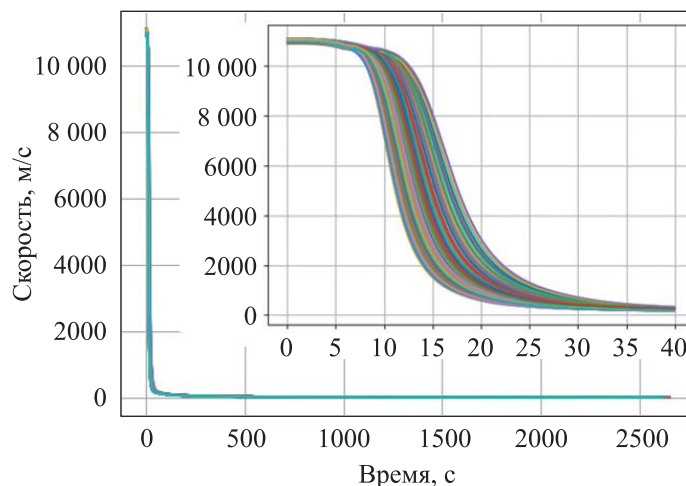


Рис. 6. График зависимости модуля скорости пенетратора от времени его движения в плотной атмосфере Венеры

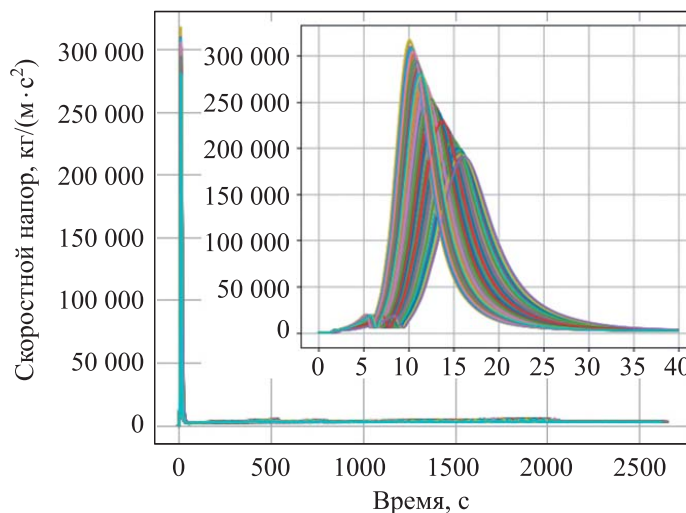


Рис. 7. График зависимости скоростного напора от времени движения

График зависимости скоростного напора от времени движения (см. рис. 7) демонстрирует резкий рост скоростного напора на начальном участке спуска, что связано с быстрым увеличением плотности атмосферы при небольшом увеличении и высокой скорости аппарата, вызванный притяжением Венеры. Максимум скоростного напора достигается на высотах около 80 км и соответствует моменту максимальных аэродинамических нагрузок. Последующие колебания

вызваны турбулентностью и ветровыми возмущениями, но не нарушают устойчивости движения.

На графике зависимости траекторного угла от времени (см. рис. 8) отсутствуют резкие изменения кривых, не свойственные баллистическому спуску, что свидетельствует о достаточной аэродинамической устойчивости зонда-пенетратора при движении в атмосфере Венеры.

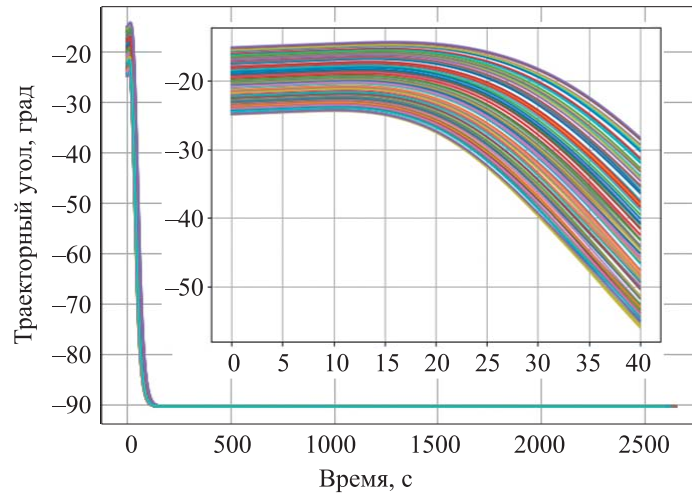


Рис. 8. График зависимости траекторного угла от времени движения

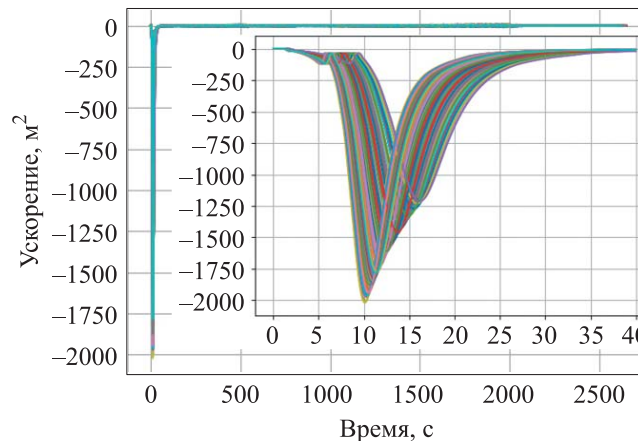


Рис. 9. График зависимости ускорения пенетратора от времени его движения

Максимальное отрицательное ускорение достигает -2019 м/с^2 (перегрузка $\sim 233 \text{ g}$) на начальном этапе спуска (см. рис. 9). Это свидетельствует о том, что торможение на данном этапе происходит с максимальной эффективностью.

Согласно графику зависимости скорости от высоты движения пенетратора (см. рис. 10), скорость монотонно снижается с высотой, падая до 9–10 м/с у поверхности.

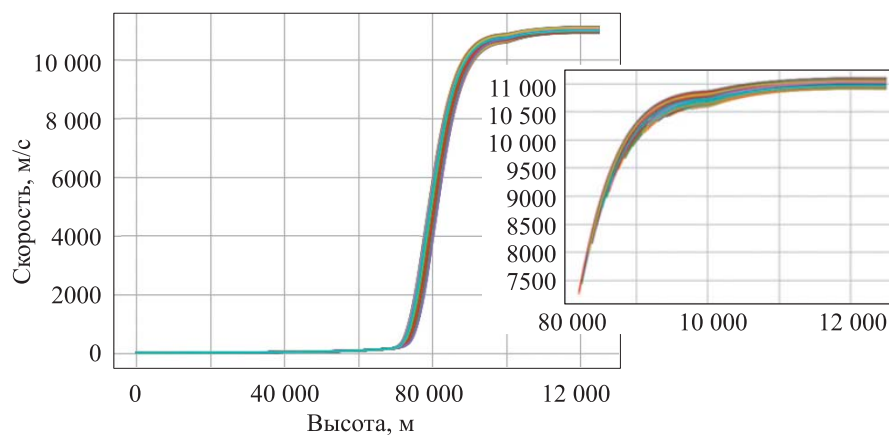


Рис. 10. График зависимости модуля скорости пенетратора от высоты его движения

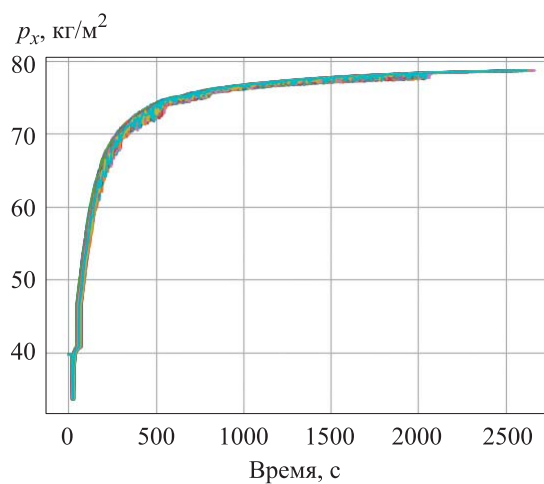


Рис. 11. График зависимости давления на площадь миделевого сечения пенетратора от времени его движения

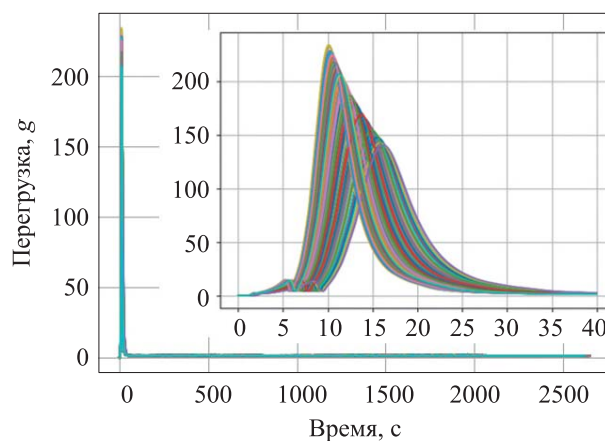


Рис. 12. График зависимости перегрузки от времени

Анализ графика зависимости давления на площадь миделевого сечения пенетратора от времени (см. рис. 11) показывает, что в процессе его спуска в атмосфере Венеры с увеличением ее плотности возрастает аэродинамическая нагрузка на аппарат. Начиная с 1500-й секунды спуск переходит в установившееся движение, о чем свидетельствует практически неизменное значение давления на мидель. Также на графике заметно влияние порывов ветра на зонд-пенетратор — ломаные линии с многочисленными «зубцами», которые формируются из-за изменения аэродинамической силы, действующей на аппарат.

На графике зависимости перегрузки (см. рис. 12) от времени видно, что максимальное интенсивное торможение приходится на начальный этап спуска в неплотных слоях атмосферы. Максимальное значение перегрузки в 233g достигается на 10-й секунде, однако оно находится в допустимом диапазоне — до 1500g.

Изменения параметров моделирования спуска зонда-пенетратора в момент перед внедрением в грунт на поверхности Венеры представлены ниже:

Скорость, м/с	9,002...9,574
Траекторный угол, град	–90,285...–90,287
Дальность, м	138 945,398...229 856,224
Время спуска, с	3192...3218
Диаметр зонда, м	0,8

При входе в атмосферу Венеры с орбиты максимальная перегрузка составляет $n_{x \max} = 233 \text{ g}$, максимальное ускорение $a_{\max} = -2019 \text{ м/с}^2$, минимальные значения этих параметров соответственно $n_{x \min} = 75\text{g}$, $a_{\min} = -2019 \text{ м/с}^2$.

Расчеты показали, что зонд-пенетратор обладает достаточной пассивной аэродинамической устойчивостью, чтобы противостоять сильным венерианским ветрам, так как при 100 реализациях не было обнаружено ни одной ситуации с критическим изменением в параметрах движения аппарата. Кроме того, отклонения по измерениям датчиков линейных и угловых скоростей значительно увеличили перегрузку, действующую на аппарат, но поскольку он выдерживает существенно большие значения перегрузки, такие отклонения хотя и не являются критическими, все же существенно увеличивают эллипс рассеяния посадки аппарата, поэтому при решении задачи посадки в определенный район их следует каким-либо образом сокращать.

Было выявлено, что случайные порывы ветра и турбулентности в атмосфере могут увеличивать или уменьшать на 10...15 % скорость аппарата перед внедрением. При подходе к поверхности скорость аппарата при спуске без надувного тормозного устройства оказалась в 8 раз

меньше проектного значения для марсианского зонда, что является недостаточным для внедрения при спуске в атмосфере Венеры.

Заключение. В представленном исследовании предложено использовать зонд-пенетратор, созданный на основе проекта «Марс-96» и адаптированный к условиям Венеры, для исследования ее поверхности и грунта. Это позволит упростить процесс проектирования, разработки и испытаний как самого аппарата, так и размещенного на нем научного оборудования. Поэтому была разработана математическая модель спуска пенетратора в атмосфере Венеры, а для анализа был реализован алгоритм вычислений с помощью компьютерной программы. В результате расчетов были определены конечные скорости, траекторные углы, проекция траектории и время спуска при различных диаметрах аэродинамического тормозного устройства, исследована пассивная аэродинамическая устойчивость аппарата, а также устойчивость к различным отклонениям от расчетных траекторий. Также были построены графики изменения скорости и траекторного угла во времени, которые продемонстрировали, что при движении в атмосфере Венеры зонд-пенетратор совершает плавное аэродинамическое торможение (это соответствует устойчивому режиму движения) и обладает достаточной аэродинамической устойчивостью. Следует отметить, что применение зонда-пенетратора для исследования Венеры является перспективным направлением. Этот аппарат может служить эффективным инструментом для изучения грунта и характеристик венерианской поверхности, что значительно расширит наши знания о второй планете Солнечной системы и приблизит нас к новым научным открытиям.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] О работах по созданию автоматических станций для исследования Венеры. *Роскосмос*. URL: <https://www.roscosmos.ru/39231/> (дата обращения: 20.10.2023).
- [2] Ефанов В.В., Карчаев Х.Ж., Моишеев А.А., Ширшаков А.Е. *85 лет НПО Лавочкина. Героическое прошлое. Стабильное настоящее. Светлое будущее*. В 2 кн. Д.Э. Яременко, ред. Книга 2. *Автоматические Космические комплексы для фундаментальных научных исследований, созданные НПО Лавочкина*. Химки, АО «НПО Лавочкина», 2023, 584 с.
- [3] Воронцов В.А., Малышев В.В., Пичхадзе К.М. *Системное проектирование космических десантных аппаратов*. Москва, Изд-во МАИ, 2021, 256 с.
- [4] Пичхадзе К.М., Малышев В.В. *Математическое обеспечение для проектно-баллистического исследования динамики неуправляемого движения спускаемых аппаратов*. Монография. Москва, МАИ-ПРИНТ, 2018, 210 с.
- [5] Полищук Г.М., *Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований*. Пичхадзе К.М., ред. Москва, МАИ-ПРИНТ, 2010, 660 с.

- [6] Леун Е.В., Нестерин И.М., Пичхадзе К.М. Обзор схем пенетраторов для контактных исследований космических объектов. *Космическая техника и технологии*, 2022, № 2 (37), с. 103–117.
- [7] Автоматическая межпланетная станция «Марс-96». НПО им. Лавочкина. URL: <https://www.laspace.ru/ru/activities/projects/mars-96/> (дата обращения: 13.08.2024).
- [8] Иванов Н.М., Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. *Баллистика и навигация космических аппаратов*. Москва, Дрофа, 2004, 544 с.
- [9] Яценко М.Ю., Алтухов Е.С., Воронцов В.А. *Моделирование неуправляемого движения зонда-пенетратора в атмосфере планеты*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024689640 Российская Федерация. № 2024688732: заявлено 27.11.2024; опублик. 09.12.2024. Бюл. № 12. 1 с.
- [10] Яценко М.Ю., Алтухов Е.С., Воронцов В.А. *Моделирование движения спускаемого аппарата в атмосфере планеты*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024689639 Российская Федерация № 2024688723: заявлено 27.11.2024; опублик. 09.12.2024. Бюл. № 12. 1 с.
- [11] Moroz V.I., Zasova L.V. VIRA-2: a review of inputs for updating the Venus international reference atmosphere. *ASR*, 1997, vol. 19, no. 8, pp. 1191–1201. DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00270-6
- [12] Засова Л.В., Мороз В.И., Линкин В.М. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км. *Космические исследования*, 2006, т. 44, № 4, с. 381–400.
- [13] Limaye S.S., Lebonnois S., Mahieux A., et al. The thermal structure of the Venus atmosphere: intercomparison of Venus Express and ground based observations of vertical temperature and density profiles. *Icarus*, 2017, vol. 294, pp. 124–155. DOI: 10.1016/j.icarus.2017.04.020
- [14] Алтухов Е.С., Яценко М.Ю. Исследование грунта планеты Венера с помощью зонда-пенетратора типа «Марс-96». *Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения–2024»: Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции. I Гагаринские чтения 2024: тезисы докл.* Москва, Изд-во Перо, 2024, с. 424.
- [15] Воронцов В.А., Алтухов Е.С., Яценко М.Ю. Некоторые вопросы создания зонда-пенетратора для исследования грунта планеты Венеры. *Материалы 59-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. В 2 ч. Ч. 2: Тезисы докл.* Калуга, Изд-во «Эйдос», 2024, с. 97–100.
- [16] Белоконов И.В. *Статистический анализ динамических систем (анализ движения летательных аппаратов в условиях статистической неопределенности)*. Самара, Самарский государственный аэрокосм. ун-т, 2001, 65 с.

Статья поступила в редакцию 24.12.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтухов Е.С., Воронцов В.А., Яценко М.Ю. Моделирование возмущенного движения зонда-пенетратора в атмосфере Венеры. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 4. EDN RUNEGD

Алтухов Евгений Сергеевич — студент кафедры 604, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: динамика летательных аппаратов, программирование в решении прикладных инженерных задач; автор 6 научных публикаций.
e-mail: zhenya.altukhov@gmail.com

Воронцов Виктор Александрович — д-р техн. наук, профессор кафедры 601 и кафедры 604, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: проектирование автоматических космических аппаратов для исследования дальнего космоса. Автор более 300 научных публикаций. e-mail: victor-vorontsov@yandex.ru. Author ID: 840814

Яценко Михаил Юрьевич — аспирант кафедры 601, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: проектирование и конструкция ракетно-космической техники; автор более 40 научных публикаций. e-mail: yatsenkomy@mai.ru. Author ID: 1130627

Simulation of the Perturbed Motion of the Penetrator Probe in the Atmosphere of Venus

© E.S. Altukhov, V.A. Vorontsov, M.Yu. Yatsenko

Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation

The planet Venus has specific conditions for the functioning of research vehicles on it – a dense and “aggressive” atmosphere, high temperature and pressure, strong winds. The penetrator probe, as a technical research tool, is a tool for collecting primary scientific information about the physico-chemical composition of the soil, studying seismic activity and climate, which will help in the best way to explore the soil of Venus. The possibility of using a penetrator probe to explore Venus is shown, an analysis of existing projects on this topic is carried out, and a prototype is selected on the basis of which it is possible to simulate ballistic descent in the atmosphere – this is the Mars-96 project, which included two penetrators in the spacecraft. A mathematical model of the motion of a penetrator probe in the atmosphere of Venus has been compiled, using which estimated calculations of a prototype with various mass and dimensional characteristics have been carried out. During the movement of the device in the atmosphere of the planet, it is affected by many disturbing factors, such as wind, turbulence, instrument error, etc., which must be taken into account in order to obtain correct data. In the course of the work, a mathematical model was compiled to account for wind disturbances and turbulence affecting the apparatus, as well as stochastic Monte Carlo descent modeling. Also, during the simulation, disturbances in the initial conditions associated with the measurement error of the instruments were taken into account. As a result of the study, graphs of the dependencies of the trajectory parameters (speed, trajectory angle, flight range, altitude, pressure amidships, etc.) were constructed, which showed that the probe has sufficient aerodynamic stability to ensure stable movement in the atmosphere of Venus. However, the calculated velocity values before contact with the surface are about 10 m/s, which is insufficient for penetration into the ground.

Keywords: penetrator probe, Venus, grunt, Mars-96 project, ballistic descent, wind disturbances, instrument errors, stochastic modeling, implementation rate.

REFERENCES

- [1] O rabotakh po sozdaniyu avtomaticheskikh stantsiy dlya issledovaniya Venery [On the development of automatic stations for Venus exploration]. *Roscosmos*. Available at: <https://www.roscosmos.ru/39231/> (accessed October 20, 2023).
- [2] Efanov V.V., Karchaev Kh.Zh., Moisheev A.A., Shirshakov A.E. 85 let NPO Lavochkina. Geroicheskoe proshloe. Stabil'noe nastoyashee. Svetloe budushee. V 2 knigakh. Kniga 2. Avtomaticheskie kosmicheskie komplekсы dlya fundamentalnykh nauchnykh issledovaniy, sozdannye NPO Lavochkina [85 years of Lavochkin Association. Heroic past. Stable present. Bright future. In 2 books. Book 2. Automatic space systems for fundamental scientific research developed by Lavochkin Association]. Khimki, Lavochkin Association, 2023, 584 p.
- [3] Vorontsov V.A., Malyshev V.V., Pichkhadze K.M. Sistemnoe proektirovanie kosmicheskikh desantnykh apparatov [System design of space landing vehicles]. Moscow, MAI Publ., 2021, 256 p.
- [4] Pichkhadze K.M., Malyshev V.V. Matematicheskoe obespechenie dlya proektno-ballisticheskogo issledovaniya dinamiki neupravlyаемого dvizheniya

- spuskaemykh apparatov*: monografiya [Mathematical support for design-ballistic study of the dynamics of uncontrolled motion of reentry vehicles: monograph]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2018, 210 p.
- [5] Polischuk G.M., Pichkhadze K.M., eds. *Avtomaticheskie kosmicheskie apparaty dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy* [Automatic spacecraft for fundamental and applied scientific research]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2010, 660 p.
- [6] Leun E.V., Nesterin I.M., Pichkhadze K.M. Obzor skhem penetratorov dlya kontaktnykh issledovaniy kosmicheskikh ob"ektov [Review of penetrator schemes for contact studies of space objects]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space Engineering and Technology*, 2022, no. 2 (37), pp. 103–117.
- [7] Avtomaticheskaya mezhplanetnaya stantsiya “Mars-96” [Mars-96 automatic interplanetary station]. *Lavochkin Association*. Available at: <https://www.laspace.ru/ru/activities/projects/mars-96/> (accessed August 13, 2024).
- [8] Ivanov N.M., Dmitrievskiy A.A., Lysenko L.N. *Ballistika i navigatsiya kosmicheskikh apparatov* [Ballistics and navigation of spacecraft]. Moscow, Drofa Publ., 2004, 544 p.
- [9] Yatsenko M.Yu., Altukhov E.S., Vorontsov V.A. *Modelirovanie neupravlyae-mogo dvizheniya zonda-penetratora v atmosfere planety* [Modeling of uncontrolled motion of a probe-penetrator in a planetary atmosphere]: Certificate of registration of computer program No. 2024689640, Russian Federation. No. 2024688732: filed November 27, 2024; publ. December 09, 2024, Bull. no. 12. 1 p.
- [10] Yatsenko M.Yu., Altukhov E.S., Vorontsov V.A. *Modelirovanie dvizheniya spuskaemogo apparata v atmosfere planety* [Modeling the motion of a reentry vehicle in a planetary atmosphere]: Certificate of registration of computer program No. 2024689639, Russian Federation. No. 2024688723: filed November 27, 2024; published December 09, 2024, Bull. no. 12. 1 p.
- [11] Moroz V.I., Zasova L.V. VIRA-2: a review of inputs for updating the Venus International Reference Atmosphere. *ASR*, 1997, vol. 19, no. 8, pp. 1191–1201. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00270-6)
- [12] Zasova L.V., Moroz V.I., Linkin V.M. Stroenie atmosfery Venery ot poverkhnosti do 100 km [Structure of the Venus atmosphere from the surface up to 100 km]. *Kosmicheskie issledovaniya — Cosmic Research*, 2006, vol. 44, no. 4, pp. 381–400.
- [13] Limaye S.S., Lebonnois S., Mahieux A., et al. The thermal structure of the Venus atmosphere: intercomparison of Venus Express and ground-based observations of vertical temperature and density profiles. *Icarus*, 2017, vol. 294, pp. 124–155. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.04.020>
- [14] Altukhov E.S., Yatsenko M.Yu. Issledovanie grunta planety Venera s pomoshch'yu zonda-penetratora tipa “Mars-96” [Investigation of the Venusian soil using a Mars-96-type penetrator probe]. In: *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya “Gagarinskie chteniya-2024”. Sbornik tezisov rabot Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii Gagarinskie chteniya 2024: tezisy dokladov* [International youth scientific conference “Gagarin readings-2024”. Book of abstracts of the International youth scientific conference “Gagarin Readings 2024”: abstracts of papers]. Moscow, Pero Publ., 2024, p. 424.
- [15] Vorontsov V.A., Altukhov E.S., Yatsenko M.Yu. Nekotorye voprosy sozdaniya zonda-penetratora dlya issledovaniya grunta planety Venera [Some issues of developing a probe-penetrator for investigating the Venusian soil]. In: *Materialy*

59-kh Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo: v 2 ch. Ch. 2: Tezisy dokladov [Proceedings of the 59th Scientific Readings dedicated to the development of K.E. Tsiolkovsky's scientific heritage and ideas: in 2 parts. Part 2: abstracts of papers]. Kaluga, Eidos Publ., 2024, pp. 97–100.

- [16] Belokonov I.V. *Statisticheskiy analiz dinamicheskikh sistem (analiz dvizheniya letatel'nykh apparatov v usloviyakh statisticheskoy neopredelennosti)* [Statistical analysis of dynamic systems (analysis of the motion of aircraft under conditions of statistical uncertainty)]. Samara, Samara State Aerospace University Publ., 2001, 65 p.

Altukhov E.S., student of Department 604, Moscow Aviation Institute (National Research University). Research interests: aircraft dynamics, programming in solving applied engineering problems; author of 6 scientific publications.
e-mail: zhenya.altukhov@gmail.com.

Vorontsov V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor of Department 601 and Department 604, Moscow Aviation Institute (National Research University), Doctor of Technical Sciences. He graduated from MAI with honors in 1975. Research interests: designing automated spacecraft for deep space exploration; author of more than 300 scientific publications. e-mail: victor-vorontsov@yandex.ru Author ID: 840814

Yatsenko M.Yu., postgraduate student of Department 601, Moscow Aviation Institute (National Research University). He graduated from MAI with honors in 2021. Research interests: design and construction of rocket and space technology; author of more than 40 scientific publications. e-mail: yatsenkomy@mai.ru Author ID: 1130627