

УДК 629.787
Код ГРНТИ 55.49.07

doi 10.54708/19926502_2025_2911073

Возможность применения зонда-пенетратора для исследования планеты Венера

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

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Аннотация. Планета Венера имеет специфические условия для функционирования на ней исследовательских аппаратов – плотную и «агрессивную» атмосферу, высокие температуру и давление, сильные ветры. Зонд-пенетратор как техническое средство исследования является инструментом для сбора первичной научной информации о физико-химическом составе грунта, изучения сейсмической активности и климата, который поможет наилучшим способом исследовать грунт Венеры. Показана возможность применения зонда-пенетратора для исследования Венеры, проведен анализ существующих проектов по данной тематике, выбран прототип, на базе которого возможно смоделировать баллистический спуск в атмосфере – это проект «Марс-96», в который входили два пенетратора. Составлена математическая модель движения зонда-пенетратора в атмосфере Венеры, с использованием которой проведены оценочные расчеты прототипа с различными массово-габаритными характеристиками, а также для разных диаметров надувного тормозного устройства и без него.

Ключевые слова: зонд-пенетратор, Венера, грунт, проект «Марс-96», баллистический спуск, надувное тормозное устройство.

*misha-yacenko@mail.ru

Введение

Планета Венера представляет собой уникальный объект для изучения вследствие специфических параметров своей атмосферы. Понимание условий образования такого «агрессивного» климата – сильные ветры, плотная атмосфера, а также длительное влияние высоких температур и давления на грунт и его химический состав, исследование сейсмической активности планеты и других параметров – может дать ценную информацию о похожих явлениях на Земле и других небесных телах. Задача исследования Венеры вновь стала актуальной для российских ученых, поэтому существует необходимость создания исследовательских аппаратов, способных проводить детальное исследование ее атмосферы, поверхности и геологии [1, 2].

«Традиционными» техническими средствами исследования Венеры являются орбитальные и посадочные аппараты, а также аэростатные зонды, при этом научная аппаратура для исследования приповерхностных слоев атмосферы и грунта доставлялась аппаратами, осуществляющими «мягкую» посадку [3, 4]. Осуществление «мягкой» посадки исследовательского аппарата требует трудоемких операций, что ведет к усложнению схемы экспедиции и существенно повышает сложность посадки на Венеру, а также увеличивает вероятность провала миссии в случае отказа какого-либо прибора. Технические средства (ТСр) исследования с жесткой посадкой приближаются к поверхности с высокой скоростью, вследствие чего финальный этап торможения происходит при внедрении в грунт или заглоблении в него. Такие ТСр называют «пенетраторами» [5].

В работе авторами предлагается использовать для исследования грунта планеты Венера зонд-пенетратор проекта «Марс-96». Использование жесткой посадки зонда-пенетратора позволит снизить время его движения в атмосфере и разворачивания оборудования для начала исследований, а также изучать более глубокие слои грунта, что очень важно для венерианских условий. Например, использование планетоходами или посадочными аппаратами бурильных установок дает заглобление до 1,5–2 метров, что существенно ниже значений глубины внедрения пенетратора, которые могут достигать

нескольких метров. Показана возможность применения пенетратора типа «Марс-96» для исследования Венеры, составлена математическая модель и проведены оценочные расчеты параметров траектории спуска пенетратора в условиях атмосферы Венеры, а также адаптации его тормозного устройства для этих условий.

1. Пенетратор как техническое средство исследования космических объектов

Пенетратор – проникающий ударный зонд для сбора первичной научной информации о физико-химическом составе грунта при углублении в грунт исследуемой планеты до нескольких метров с возможностью последующей передачи полученного материала или данных о нем на Землю. Важно отметить, что пенетраторами также называют грунтозаборные устройства ударного типа – манипуляторы, которые устанавливаются на другие ТСр (посадочные аппараты, спускаемые модули и др.), т.е. являются подсистемой этих ТСр, и бьют по грунту объекта, на который была совершена посадка, забирая образцы грунта. Следует отличать такие устройства от пенетраторов как автономных ТСр исследования.

Существуют следующие типы пенетраторов:

- пенетраторы «классического» внедрения в грунт космического объекта и проведение исследований его характеристик;
- реактивные пенетраторы – движение в грунте происходит с помощью реактивного двигателя;
- сверхскоростные пенетраторы – внедрение пенетратора на скорости более 1 км/с происходит за счет испарения головной части такого пенетратора.

Предлагаемый состав научно-исследовательской аппаратуры предполагает получение следующих научных данных:

- физико-химический состав грунта;
- термомеханические свойства грунта;
- сейсмические свойства;
- магнитные свойства космического объекта;
- метеорологическая обстановка (при размещении части пенетратора на поверхности объекта).

Также в компоновку аппарата необходимо включать аппаратуру обеспечения посадки и работы научных приборов:

- электропитание (аккумуляторы, солнечные батареи или РИТЭГ (радиоизотопный термоэлектродгенератор));
- блок управления;
- радиокomплекс для передачи собранной научной и служебной информации [5].

Проектирование и создание комплекса аппаратуры, работающего после ударного воздействия, является сложной задачей для разработчиков приборов. При этом надо учесть, что научно-исследовательский комплекс, допущенный в системном исполнении до летных испытаний, был создан только для двух проектов – «Марс-96» (Россия) и DeepSpace (США). Для других проектов такие комплексы рассматриваются на уровне различных этапов наземной экспериментальной отработки, поэтому предложения по составу могут меняться. Наиболее важными характеристиками пенетратора для построения системы являются ударная перегрузка, скорость столкновения и глубина проникновения в грунт. Представлен широкий диапазон полученных и планируемых ударных перегрузок. Для проведения натурных испытаний на указанные ударные перегрузки потребуется создание сложного экспериментального оборудования.

Далее приведем классификацию пенетраторов по следующим признакам: по видам торможения перед внедрением и по виду конструкции.

По видам торможения пенетраторы бывают:

- пенетраторы, применяющие торможение двигателем и осуществляющие спуск в атмосфере с использованием пассивных тормозных устройств (предполагаемый диапазон перегрузок 100...600 g);

– пенетраторы, применяющие торможение двигателем, после чего при дальнейшем спуске в атмосфере происходит вертикализация (предполагаемый диапазон перегрузок 500...3000 g);

– пенетраторы, осуществляющие внедрение без торможения (предполагаемый диапазон перегрузок до 16000 g).

По виду конструкции выделяют пенетраторы:

– монолитный, т.е. без разделения;

– разделяемый на две части (внедряемая и поверхностная).

По достижении атмосферы зонды-пенетраторы сначала с помощью жесткого конуса, а затем надувного тормозного устройства совершают аэродинамическое торможение до требуемой скорости и внедряются в грунт планеты. При касании поверхности происходит разделение носовой и хвостовой частей. Внедряемая часть зонда с научной и служебной аппаратурой проникает в грунт, а хвостовая часть с остальной аппаратурой остается на поверхности. После внедрения зонда проводятся следующие научные исследования:

– получение телевизионных изображений поверхности объекта;

– накопление данных о метеорологических условиях;

– определение элементного состава пород;

– определение содержания воды в породе;

– изучение сейсмоактивности;

– исследование физико-механических характеристик грунта;

– определение магнитного поля и магнитных свойств породы.

Таким образом, зонд-пенетратор является необходимым инструментом для исследования поверхности и грунта космических объектов с различной атмосферой или ее полным отсутствием. Решение проблемы торможения достигается различными путями в зависимости от конкретных условий атмосферы изучаемого объекта.

2. Обзор существующих проектов по исследованию космических тел с использованием пенетратора

Рассмотрим существующие проекты по изучению космических тел с помощью зонда-пенетратора как технического средства исследования. В работах [6-10] приведены технические характеристики аппаратов, идея и задачи миссий, а также состав научной аппаратуры, необходимый для их реализации. В итоге выделено 5 проектов, для которых рассмотрены цель проекта, задачи, характеристики зонда-пенетратора этой миссии и научная аппаратура зондов.

1. Луна-Глоб (Россия) [6].

Цель: исследование полярных областей Луны для поиска водяного льда и других летучих веществ.

Задачи:

– изучение химического состава грунта;

– исследование распределения водяного льда;

– анализ сейсмической активности.

Технические характеристики пенетратора: масса – 45 кг, длина – 1 метр.

Научная аппаратура: сейсмометры, спектрометр, температурные датчики.

В итоге в проекте отказались от использования пенетраторов.

2. Марс-96 (Россия) [7].

Цель: комплексное исследование Марса, включающее атмосферные и поверхностные исследования.

Задачи:

– изучение структуры и состава марсианского грунта;

– исследование сейсмической активности Марса.

Технические характеристики пенетратора: масса – 110 кг, длина – 1,5 метра.

Научная аппаратура: сейсмометры (для измерения марсианской сейсмической активности); акселерометры (для измерения характеристик удара); спектрометры (для анализа грунта и определения его химического состава).

Проект прошел все стадии испытаний, были подготовлены летные образцы, но при переходе с околоземной на перелетную орбиту из-за некорректной работы разгонного блока орбитальная станция вместе с посадочными модулями и пенетраторами была потеряна, что привело к провалу миссии.

3. Deep Impact (США) [8].

Цель: проект NASA для исследования кометы Темпеля-1 посредством удара зонда-пенетратора.

Задачи:

- изучение состава и структуры ядра кометы;
- изучение выбросов вещества из кратера, образованного ударом.

Технические характеристики пенетратора: масса – 370 кг.

Научная аппаратура: камеры, спектрометры.

Проект успешно был реализован, аппарат внедрился в комету и передал массив данных о механическом и химическом составе кометы Темпеля-1.

4. Lunar-A (Япония) [9].

Цель: проект JAXA для изучения Луны с помощью двух зондов-пенетраторов.

Задачи:

- изучение внутренней структуры Луны;
- изучение сейсмической активности планеты.

Технические характеристики пенетратора: масса – 14 кг каждый, длина – 80 см.

Научная аппаратура: сейсмометры, температурные датчики.

Запуск был запланирован на 1997 год, но из-за ряда технических трудностей его несколько раз переносили, и в 2007 году было принято решение о завершении программы из-за того, что ранее созданный базовый блок стал непригодным к эксплуатации.

5. Huygens (Европейское космическое агентство) [10].

Цель: исследование Титана, спутника Сатурна.

Задачи:

- исследование поверхности и атмосферы Титана;
- изучение химического состава поверхности.

Технические характеристики пенетратора: масса – 318 кг.

Научная аппаратура: газовые хроматографы, масс-спектрометры, камеры, температурные датчики и барометры.

Проект был реализован, аппарат спустился в атмосфере Титана, передал изображения поверхности и данные о составе атмосферы, но после посадки был уничтожен.

Таким образом, было проанализировано 5 проектов, все они направлены на изучение механических и химических свойств грунта, температурных градиентов, а также климата различных космических объектов, причем не было разработано ни одного проекта для исследования планеты Венера. В рассмотренных проектах использовались схожие наборы научной аппаратуры, зонды различных размеров имели массы в диапазоне от 14 до 370 кг, преимущественно были использованы схемы классического внедрения, но встретились также и сверхскоростные схемы для исследования тел без атмосферы. Для торможения использовались различные аэродинамические тормозные устройства, и только проект «Deep Impact» оснащался парашютной системой.

Несмотря на огромное разнообразие теоретических расчетов, летные испытания прошли только 2 проекта, поэтому в качестве прототипа для адаптации и использования на планете Венера авторами выбран зонд-пенетратор типа «Марс-96». Использование задела данного проекта существенно сократит затраты на исследования и испытания, так как в прошлом все этапы разработки проект уже прошел. Поэтому можно адаптировать тормозную систему и корпус для торможения и функционирования аппарата на Венере.

Отметим, что при использовании пенетратора типа «Марс-96» для исследования Венеры могут возникнуть две существенные проблемы из-за плотности атмосферы: корпус

необходимо модифицировать, чтобы он выдерживал давление в 92 кг/см^2 , а также необходимо модифицировать надувное тормозное устройство (НТУ), чтобы сохранить или приблизиться к требуемой скорости внедрения в $60\text{--}80 \text{ м/с}$.

3. Математическая модель спуска пенетратора в атмосфере Венеры

Для анализа процесса спуска пенетратора в условиях атмосферы Венеры составлена математическая модель его движения в виде системы уравнений (1) [3, 4, 11], которая была верифицирована по данным циклограммы движения спускаемого аппарата проекта «Вега» [3]. Алгоритм решения системы (1) был программно реализован на языке Python.

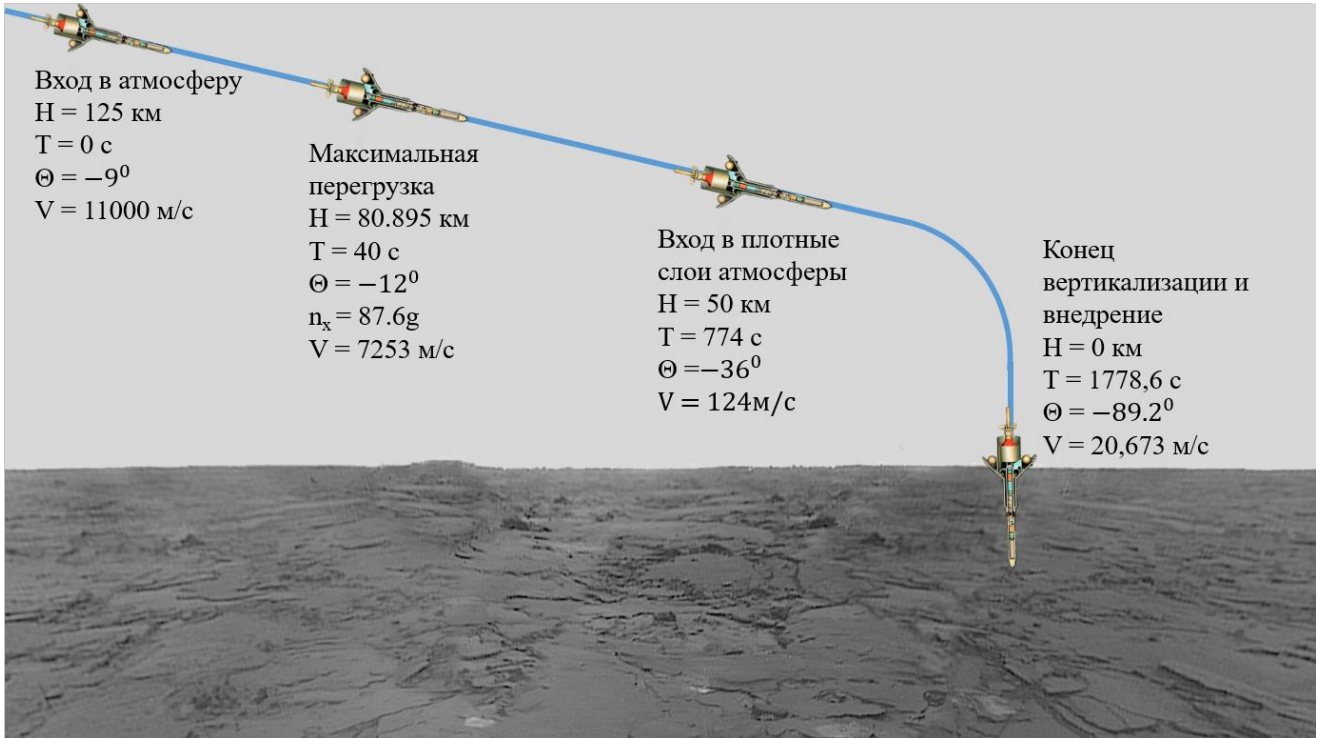


Рисунок 1. Схема спуска пенетратора при прямом входе в атмосферу.

В данной модели рассматриваются только изменения скорости, угла входа, высоты, дальности полета и времени, и считается, что аппарат движется в статичной атмосфере Венеры, при этом с высотой изменяются плотность атмосферы и, соответственно, скорость звука. Аэродинамический коэффициент C_x изменяется от скорости согласно данным, полученным при обдувке конуса раствором 90° в аэродинамической трубе. Для моделирования была взята модель атмосферы Венеры VIRА-30 (обоснование модели представлено в источниках [12–14]) и массово-габаритные характеристики пенетратора «Марс-96» [7].

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2P_x} \cdot \rho \cdot V^2 - g \cdot \sin(\theta) \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{V^2 - g \cdot R}{V \cdot R} \cdot \cos(\theta) \\ \frac{dH}{dt} = V \cdot \sin(\theta) \\ \frac{dL}{dt} = V \cdot \cos(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

Обозначения: V – скорость $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}}\right]$, g – ускорение свободного падения $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\right]$, θ – траекторный угол [град], H – высота [м], L – дальность полета [м], $P_x = \frac{m}{C_x \cdot S_m}$ – давление на мидель $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}\right]$, m – масса аппарата [кг], C_x – коэффициент лобового сопротивления, S_m – площадь миделева сечения $[\text{м}^2]$, n_x – перегрузка [g].

Начальные условия для моделирования представлены в Табл. 1.

Таблица 1. Начальные условия спуска аппарата

Масса пенетратора, кг	Диаметр пенетратора, м	Диаметр НТУ, м	Площадь миделя, м^2	Угол конуса, град.	Длина корпуса (без НТУ), м
120,0	0,40	0,8	3,14	90,0	0,54

Также были выявлены зависимости конечной скорости (скорости приближения к поверхности) пенетратора при изменении его площади миделева сечения и массы – графики представлены на Рис. 2.

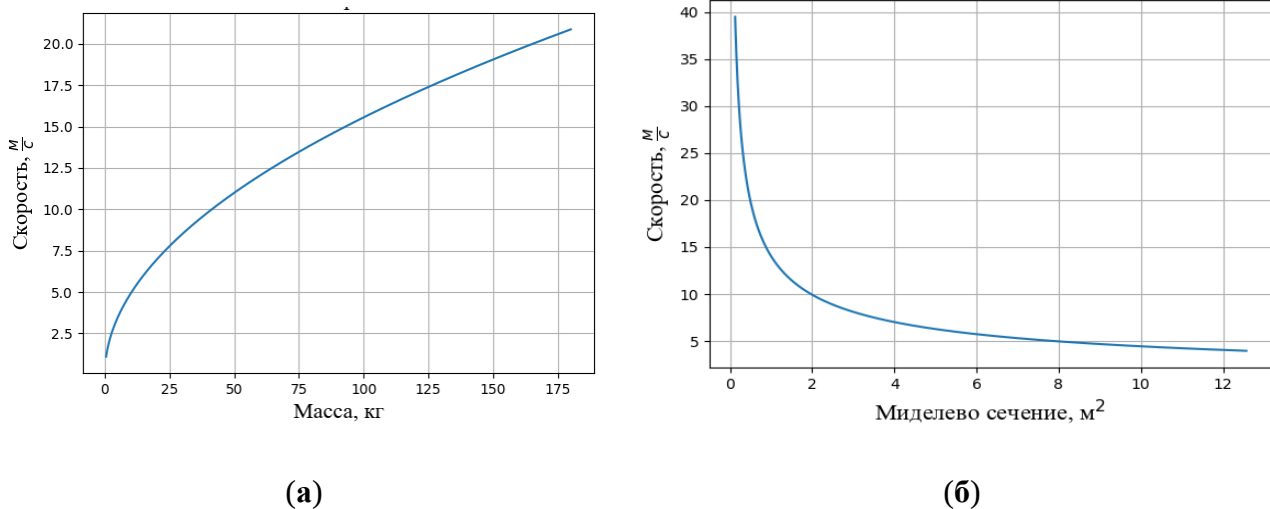


Рисунок 2. Графики зависимости: (а) – скорости от массы; (б) – скорости от площади миделева сечения.

В таблицах 2–5 представлены результаты моделирования в виде конечных параметров спуска аппарата в момент перед внедрением в грунт. Для анализа были взяты четыре варианта входа в атмосферу: прямой вход и вход с орбиты, а также проанализированы два угла входа в атмосферу Венеры: $\theta = -9^\circ$ и $\theta = -19^\circ$. В проекте «Марс-96» аппарат должен был входить в атмосферу Марса с углом входа $\theta = -9^\circ$. Из-за малого угла входа полет может занять больше времени, что крайне нежелательно в условиях Венеры, поэтому было проведено моделирование с большим углом входа $\theta = -19^\circ$, данный угол уже был использован в венерианских аппаратах, например, в аппарате «Вега». Диаметры НТУ (d) были выбраны таким образом, что в исходном проекте максимальный диаметр двух каскадов НТУ был около 4 метров, при этом первый каскад был диаметром около двух метров, в этом случае можно было бы не менять проектную конструкцию НТУ. Также был взят промежуточный вариант с НТУ диаметром 1 метр. Вариант $d=0,8$ м – это диаметр корпуса пенетратора, т.е. вариант торможения в атмосфере без НТУ. Диаметр $d = 0,4$ м предусматривает изменение конструкции корпуса аппарата, для изучения возможности достижения максимальной скорости при минимальной

модификации конструкции пенетратора. А также на рисунках 3–4 представлены графики зависимостей величин, полученных в ходе моделирования.

Таблица 2. Прямой вход, угол входа (-19°).

Скорость, м/с	Траекторный угол, град.	Дальность, м	Время, с	Диаметр, м
4,950	$-90,0$	124189,851	5847,32	4,0
9,848	$-90,0$	143871,663	2992,38	2,0
19,468	$-90,0$	165006,309	1560,70	1,0
24,232	$-90,0$	172193,909	1273,52	0,8
47,332	$-90,0$	196332,090	698,21	0,4

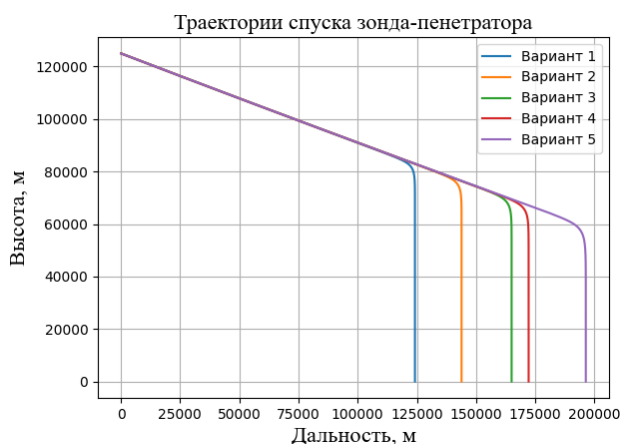
Таблица 3. Вход с орбиты, угол входа (-19°).

Скорость, м/с	Траекторный угол, град.	Дальность, м	Время, с	Диаметр, м
4,950	$-90,0$	120698,521	5854,57	4,0
9,848	$-90,0$	139812,800	3000,00	2,0
19,468	$-90,0$	160084,283	1569,02	1,0
24,232	$-90,0$	166942,459	1282,06	0,8
47,332	$-90,0$	189837,933	707,43	0,4

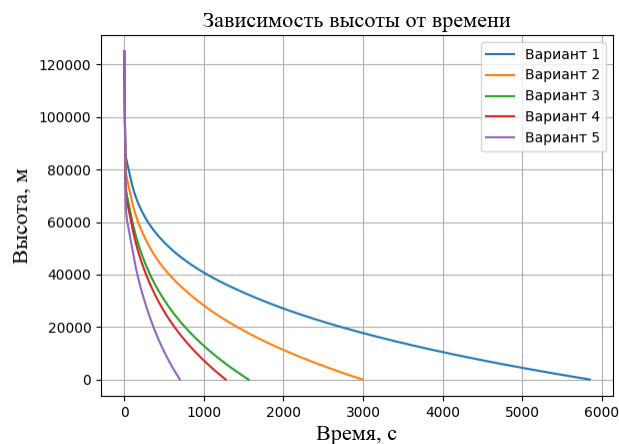
Максимальная перегрузка составила $n_{x\max} = 175g$, максимальное ускорение $a_{\max} = -1092 \text{ м/с}^2$, $n_{x\min} = 79g$, $a_{\min} = -490 \text{ м/с}^2$. Максимальная перегрузка при входе с орбиты составляет $n_{x\max} = 92g$, $a_{\max} = -480 \text{ м/с}^2$, $n_{x\min} = 75g$, $a_{\min} = -385 \text{ м/с}^2$.

3.1. Результаты моделирования при $\theta = -19^\circ$

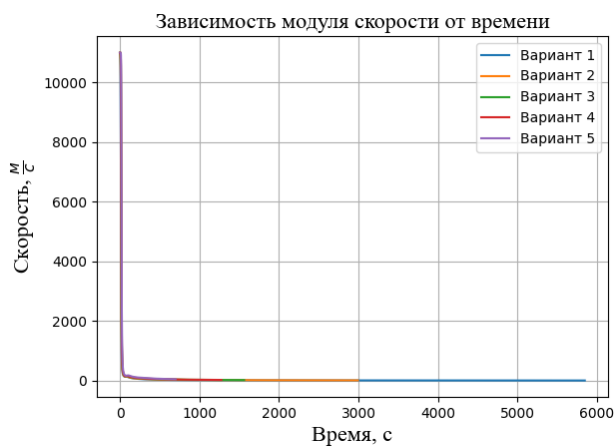
Вариант 1 – d (НТУ) = 4 м, вариант 2 – d (НТУ) = 2 м, вариант 3 – d (НТУ) = 1 м, вариант 4 – d (корпуса) = 0,8 м, Вариант 5 – d (корпуса) = 0,4 м.



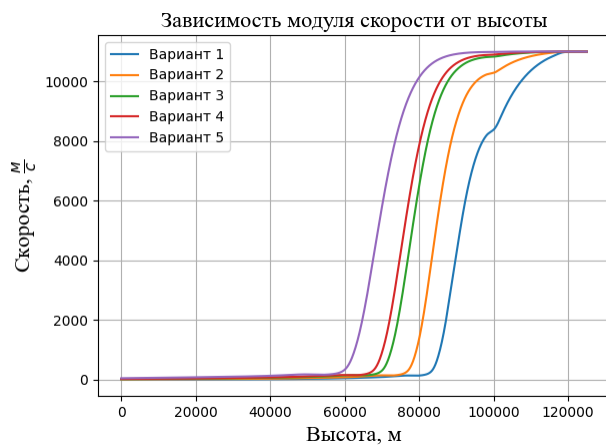
(а)



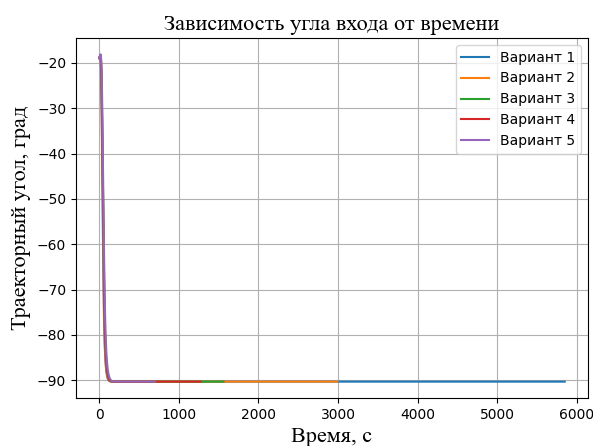
(б)



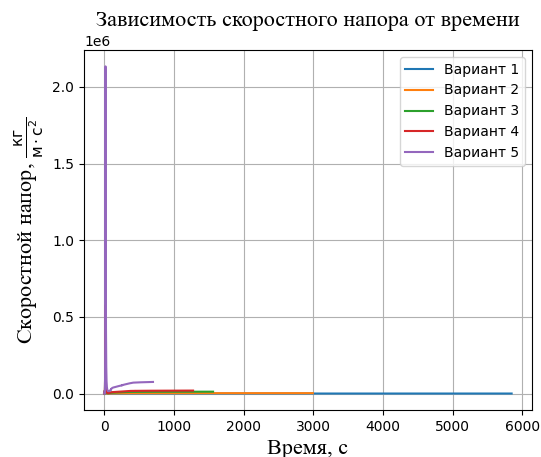
(в)



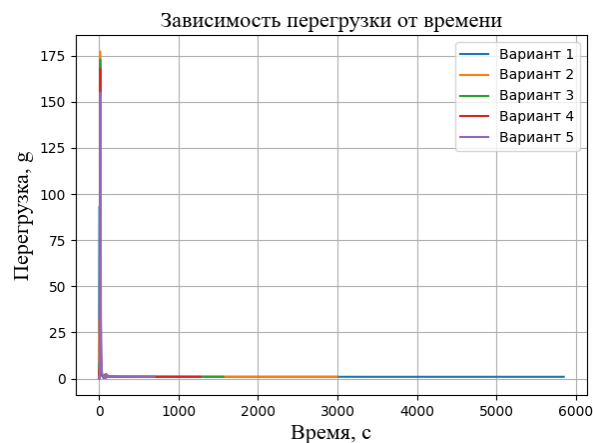
(г)



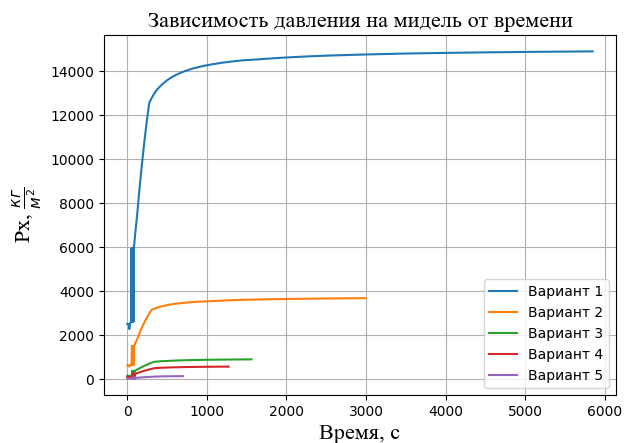
(д)



(е)



(ж)



(з)

Рисунок 3. Графики: (а) – траектория движения зонда-пенетратора; (б) – зависимость модуля высоты от времени; (в) – зависимость модуля скорости от времени; (г) – зависимость модуля скорости от высоты; (д) – зависимость траекторного угла (угла входа) от времени; (е) – зависимость скоростного напора от времени; (ж) – зависимость перегрузки от времени; (з) – зависимость давления на мидель от времени.

Таблица 4. Прямой вход, угол входа (-9°)

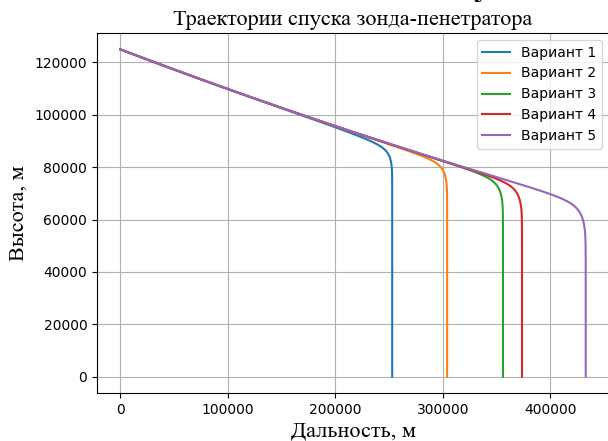
Скорость, м/с	Траекторный угол, град.	Дальность, м	Время, с	Диаметр, м
4,950	$-90,0$	253008,146	5889,92	4,0
9,848	$-90,0$	304105,136	3036,82	2,0
19,468	$-90,0$	356012,939	1609,05	1,0
24,232	$-90,0$	373712,935	1323,35	0,8
47,332	$-90,0$	432970,198	753,12	0,4

Таблица 5. Вход с орбиты, угол входа (-9°)

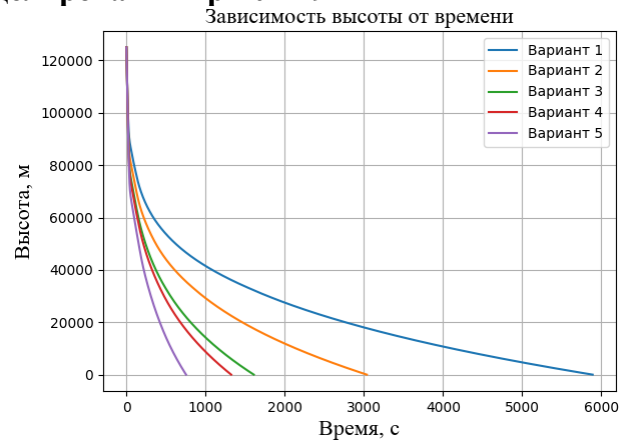
Скорость, м/с	Траекторный угол, град.	Дальность, м	Время, с	Диаметр, м
4,950	$-90,0$	385492,013	5896,21	4,0
9,848	$-90,0$	337540,347	3043,59	2,0
19,468	$-90,0$	322865,343	1615,89	1,0
24,232	$-90,0$	337540,347	1330,14	0,8
47,332	$-90,0$	385492,013	759,59	0,4

Максимальная перегрузка при прямом входе в атмосферу Венеры составляет $n_{x\max} = 91g$, максимальное ускорение $a_{\max} = -482 \text{ м/с}^2$, $n_{x\min} = 37g$, $a_{\min} = 187 \text{ м/с}^2$. Максимальная перегрузка при входе с орбиты составляет $n_{x\max} = 42g$, $a_{\max} = -230 \text{ м/с}^2$, $n_{x\min} = 29g$, $a_{\min} = -162 \text{ м/с}^2$.

3.2. Результаты моделирования при $\theta = -9^\circ$



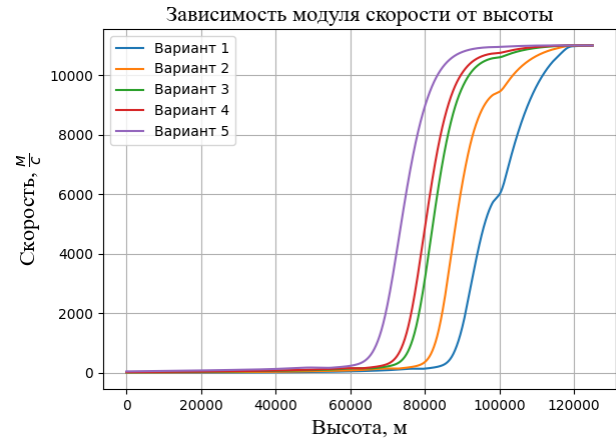
(а)



(б)



(в)



(г)

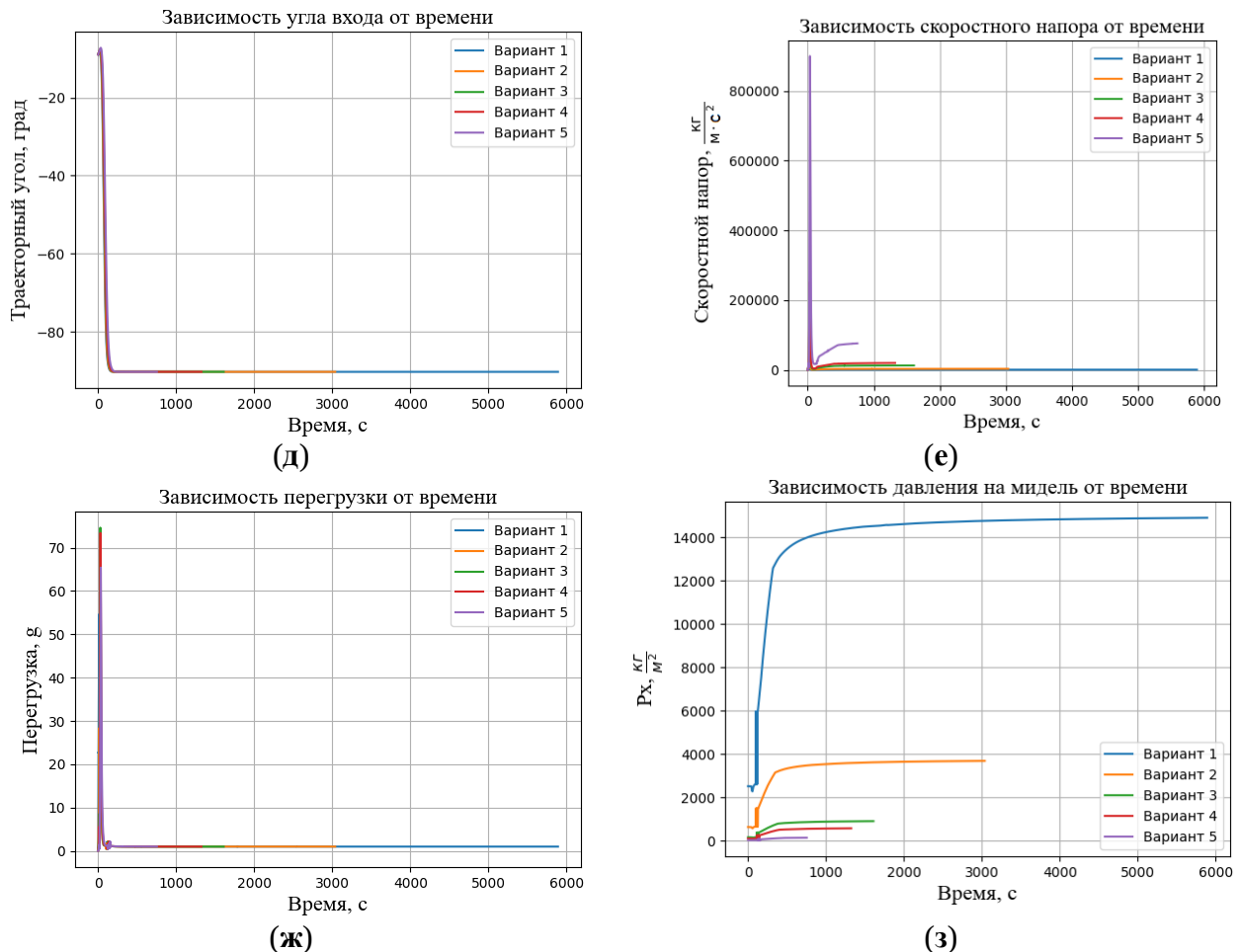


Рисунок 4. Графики: (а) – траектория движения зонда-пенетратора; (б) – зависимость высоты от времени; (в) – зависимость модуля скорости от времени; (г) – зависимость модуля скорости от высоты; (д) – зависимость траекторного угла (угла входа) от; (е) – зависимость скоростного напора от времени; (ж) – зависимость перегрузки от времени; (з) – зависимость давления на мидель от времени.

На графиках зависимости величин от времени возникают «обрывы», это происходит из-за того, что у всех вариантов диаметров НТУ различное время спуска, что приводит к тому, что у одного варианта спуск уже закончен, а у другого движение еще продолжается.

При входе с орбиты скорость составила бы около 7500 м/с, при прямом входе – 11000 м/с. Моделирование показывает, что наибольшие перегрузки испытывает аппарат при прямом входе, при варианте спуска без НТУ, $\theta = -19^\circ$, и торможения за счет жесткой конической части аппарата достигается скорость входа 38,8 м/с. Также этот вариант показывает и наименьшее время спуска – 1740 с. В случае входа с орбиты результаты немного хуже, но при этом на аппарат действуют гораздо меньшие перегрузки. Также мы можем видеть неполную вертикализацию при торможении без НТУ (хотя значение в минус 83 градуса находится в пределах допустимых границ по проекту), но, увеличив диаметр конуса до 0,6 м, можно достичь полной вертикализации аппарата со снижением конечной скорости до 26 м/с, при которой уже также можно использовать пенетратор для исследования грунта Венеры, но заглубление в грунт будет ниже.

Расчеты показывают, что в текущем варианте исполнения с минимальными доработками тормозной системы можно получить скорости для внедрения на малую глубину, близкие к проектным. Это подтверждает, что пенетратор – действительно эффективный инструмент в исследовании планет Солнечной системы, и он может быть применен на Венере, несмотря на крайне агрессивную атмосферу этой планеты.

Заключение

В статье авторами было предложено применить зонд-пенетратор, разработанный на базе проекта «Марс-96» и пригодный для условий Венеры, для исследования поверхности и грунта этой планеты. Это позволит упростить процесс создания, разработки и испытания такого технического средства, а также научного комплекса для него. Для этого была составлена математическая модель спуска пенетратора в атмосфере Венеры, а для проведения анализа был реализован алгоритм расчетов с помощью компьютерной программы на языке Python. В ходе проведения расчетов были получены конечные скорости, траекторные углы, проекция траектории, время спуска для различных диаметров аэродинамического тормозного устройства, а также получены графики изменения скорости от времени и угла входа от времени.

В заключение можно отметить, что использование зонда-пенетратора для исследования Венеры является перспективным направлением, а сам зонд-пенетратор как техническое средство исследования является эффективным инструментом для изучения грунта и других параметров венерианской поверхности, что, в свою очередь, значительно расширит наши знания о второй планете Солнечной системы и приблизит к достижению новых научных открытий.

Литература:

1. Борисов обсудил с учеными приоритетные задачи России по исследованию космоса // Сайт Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос». URL: <https://www.roscosmos.ru/38144/> (дата обращения: 20.10.2023). [in Russian] Borisov discussed with scientists Russia's priority tasks in space exploration // Website of the State Corporation for Space Activities "Roscosmos". URL: <https://www.roscosmos.ru/38144/> (date of request: 10/20/2023).
2. О работах по созданию автоматических станций для исследования Венеры // Сайт Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос». URL: <https://www.roscosmos.ru/39231/> (дата обращения: 20.10.2023). [in Russian] About the work on the creation of automatic stations for the exploration of Venus // Website of the State Corporation for Space Activities "Roscosmos". URL: <https://www.roscosmos.ru/39231/> (date of request: 10/20/2023).
3. Воронцов В.А., Малышев В.В., Пичхадзе К.М. Системное проектирование космических десантных аппаратов. Москва: Изд-во МАИ. 2021. 256с. [in Russian] Vorontsov V.A., Malyshev V.V., Pichkhadze K.M. System design of space amphibious vehicles. Moscow: Publishing house MAI. 2021. 256 p.
4. Пичхадзе К.М., Малышев В.В. Математическое обеспечение для проектно-баллистического исследования динамики неуправляемого движения спускаемых аппаратов: Монография. Москва: МАИ-ПРИНТ. 2018. 210с. [in Russian] Pichkhadze K.M., Malyshev V.V. Mathematical support for the design and ballistic study of the dynamics of uncontrolled motion of descent vehicles: Monograph. Moscow: MAI-PRINT. 2018. 210 p.
5. Обзор схем пенетраторов для контактных исследований космических объектов / Е.В. Леун [и др.] // Космическая техника и технологии. 2022. №2(37). С.103-117. [in Russian] Review of penetrator schemes for contact studies of space objects / E.V. Leun [and others] // Space Engineering and Technology. 2022. No. 2(37). pp.103-117.
6. Автоматическая межпланетная станция Луна-25 // Сайт научно-производственного объединения имени С.А. Лавочкина. URL: <https://www.laspacespace.ru/ru/activities/projects/luna-glob/> (дата обращения: 13.08.2024). [in Russian] Automatic interplanetary station Luna-25 // Website of the scientific and production association named after S.A. Lavochkin. URL: <https://www.laspacespace.ru/ru/activities/projects/luna-glob/> (date of request: 08/13/2024).
7. Автоматическая межпланетная станция «Марс-96» // Сайт научно-производственного объединения имени С.А. Лавочкина «НПО им. Лавочкина». URL:

- <https://www.laspacespace.ru/ru/activities/projects/mars-96/> (дата обращения: 13.08.2024). [in Russian] Automatic interplanetary station "Mars-96" // Website of the scientific and production association named after S.A. Lavochkin "NGO named after Lavochkin". URL: <https://www.laspacespace.ru/ru/activities/projects/mars-96/> (date of request: 08/13/2024).
8. Deep Impact // Сайт национального управления по аэронавтике и исследованию космоса «NASA». <https://www.jpl.nasa.gov/missions/deep-impact> (дата обращения: 13.08.2024). [in Russian] Deep Impact // Website of the National Aeronautics and Space Administration "NASA". <https://www.jpl.nasa.gov/missions/deep-impact> (date of request: 08/13/2024).
9. LUNAR-A // Сайт японского агентства по исследованию космоса «JAXA». URL: <https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/others/lunar-a.html> (дата обращения: 13.08.2024). [in Russian] LUNAR-A // Website of the Japanese Space Exploration Agency "JAXA". URL: <https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/others/lunar-a.html> (date of request: 08/13/2024).
10. Huygens // Сайт национального управления по аэронавтике и исследованию космоса «NASA». URL: <https://science.nasa.gov/mission/cassini-huygens/> (дата обращения: 13.08.2024). [in Russian] Huygens // Website of the National Aeronautics and Space Administration "NASA". URL: <https://science.nasa.gov/mission/cassini-huygens/> (date of request: 08/13/2024).
11. Иванов Н.М., Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. М.: Дрофа. 2004. 544 с. [in Russian] Ivanov N.M., Dmitrievsky A.A., Lysenko L.N. Ballistics and navigation of spacecraft. Moscow: Bustard. 2004. 544 p.
12. Moroz V.I., Zasova L.V. VIRA-2: a review of inputs for updating the Venus international reference atmosphere. ASR. 1997. Vol. 19. № 8. P. 1191–1201. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00270-6)
13. 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. [in Russian] Zasova L.V., Moroz V.I., Linkin V.M. The structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 km // Space Research. 2006. Vol. 44. No. 4. pp. 381-400.
14. 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. P. 124–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.04.020>

Об авторах:

ВОРОНЦОВ Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры 601 и кафедры 604, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Author ID: 840814.

ЯЦЕНКО Михаил Юрьевич, аспирант кафедры 601, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Author ID: 1130627, misha-yacenko@mail.ru.

АЛТУХОВ Евгений Сергеевич, студент кафедры 604, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

Metadata:

Title: Possibility of using a penetrator to explore the planet Venus.

Author 1: Viktor Aleksandrovich Vorontsov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department 601 and Department 604, Moscow Aviation Institute (National Research University), Author ID: 840814.

Author 2: Mikhail Yuryevich Yatsenko, postgraduate student of Department 601, Moscow Aviation Institute (National Research University), Author ID: 1130627.

Author 3: Evgeniy Sergeevich Altukhov, student of Department 604, Moscow Aviation Institute (National Research University).

Abstract: The planet Venus has specific conditions for the operation of research vehicles on it – a dense and “aggressive” atmosphere, high temperature and pressure, and strong winds. A penetrator as a technical means of research is a tool for collecting primary scientific information about the physical and 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 for the study of Venus was shown, an analysis of existing projects on this topic was carried out, a prototype was selected on the basis of which it is possible to simulate a ballistic descent in the atmosphere - this is the Mars-96 project, which included two penetrators. A mathematical model of the motion of the penetrator probe in the atmosphere of Venus has been compiled, using which evaluation calculations of the prototype with various mass-dimensional characteristics, as well as for different diameters of the inflatable braking device and without it, have been carried out.

Keywords: penetrator, Venus, soil, Mars-96 project, ballistic descent, inflatable brake device.