

**РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ПРИВОДА
ГРУНТОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОЙ
МЕЖПЛАНЕТНОЙ СТАНЦИИ «ВЕНЕРА-Д»
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

А.А. Ковешников
А.В. Палешкин

kovesh27@gmail.com
paleshkin@mai.ru

МАИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложен способ обеспечения тепловой защиты привода грунтозаборного устройства на спускаемом аппарате автоматической межпланетной станции «Венера-Д». При разработке тепловой защиты привода необходимо учитывать суровые условия эксплуатации аппаратов на поверхности Венеры, температура атмосферы которой составляет ~ 500 °С, а давление ~ 100 атм. В силу возможной нехватки места в герметичном отсеке спускаемого аппарата, привод грунтозаборного устройства размещается за пределами герметичного отсека. Способ обеспечения тепловой защиты заключается в применении в конструкции устройства теплового аккумулятора с фазовым переходом как ключевого элемента, парирующего внешние тепловые потоки. С помощью математической модели проведен вычислительный эксперимент, по результатам которого из двух материалов для теплового аккумулятора выбран наиболее подходящий и найдены оптимальные параметры геометрии тепловой защиты, обеспечивающие наименьшую массу устройства. Разработано конструктивное решение тепловой защиты, представляющее собой электромотор с редуктором, окруженный внутренним слоем теплового аккумулятора и внешним слоем из теплозащитного вещества, с выходным валом, зафиксированным радиально-упорными подшипниками, находящимися в стакане. Проведено сравнение двух технических решений, полученных в результате вычислительного эксперимента по выбору материала для теплового аккумулятора

Ключевые слова

Тепловая защита, «Венера-Д», термодинамика, теплоизоляция, тепловой аккумулятор, фазовый переход, математическая модель

Поступила 14.04.2023

Принята 25.03.2024

© Автор(ы), 2024

Введение. Исследования Венеры с помощью спускаемых аппаратов начались еще во второй половине XX в. силами советской космонавтики. Первым аппаратом, отправленным к Венере, была автоматическая межпланетная станция «Венера-1», которая 12 февраля 1961 года впервые пролетела в окрестностях исследуемой планеты. Далее была череда не только советских достаточно успешных миссий к Венере, но лишь в советских проектах успешно реализовано проникание исследовательских зондов в плотные слои атмосферы, вплоть до самой поверхности [1, 2].

Основной проблемой, препятствующей тщательному изучению поверхности Венеры, являются суровые условия ее окружающей среды — температура поверхности ~ 500 °С и давление 100 атм. Время работы советских спускаемых аппаратов — чуть более двух часов («Венера-13») [3, 4]. В таких миссиях особое внимание при разработке спускаемых аппаратов уделялось системе обеспечения теплового режима (СОТР).

В настоящее время обеспечение выживания спускаемого аппарата за счет средств СОТР в условиях атмосферы Венеры является актуальной задачей, поскольку в ближайшее время в России готовится миссия по исследованию Венеры с помощью спускаемого аппарата автоматической межпланетной станции «Венера-Д» [5, 6]. Идет активное обсуждение СОТР спускаемого аппарата, предлагаются оригинальные идеи [7, 8]. Это будет долгожданное возвращение на поверхность второй планеты от Солнца со времен советских миссий «Вега». Изначально миссии были ориентированы на совместную работу с Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА), которое обеспечило бы спускаемый аппарат электроникой, устойчивой к высоким температурам, и дополнительными собственными аппаратами [9–13]. Как и в советских миссиях «Вега», спускаемый аппарат миссии «Венера-Д» планируют оснастить грунтозаборным устройством для спектрографического анализа грунта на предмет минералогического состава грунта, состава породообразующих элементов, содержания изотопов и т. п. [14].

Грунтозаборное устройство приводится в движение электродвигателем с редуктором. В силу конструктивных особенностей спускаемого аппарата размещать электродвигатель с редуктором (далее — привод) придется, возможно, за пределами теплозащитного герметичного отсека спускаемого аппарата, что потребует разработки собственной теплозащиты привода.

В настоящей работе для обеспечения теплового режима привода грунтозаборного устройства предложена его защита с помощью теплового аккумулятора с фазовым превращением вещества. Это решение продиктовано экстремальными условиями работы, жестким ограничением по массе

спускаемого аппарата и требуемым относительно небольшим временем работы привода.

Для этого разработана математическая модель термодинамических процессов, происходящих при работе привода, позволяющая сравнить два наиболее перспективных материала, используемых в качестве теплового аккумулятора, подобрать геометрию (форму кожуха, толщину, ориентацию в пространстве) тепловой защиты для достижения наименьшей массы конструкции и проверить необходимость использования тепловой защиты при наличии в конструкции теплового аккумулятора.

Математическая модель термодинамических процессов. В теплообмене между атмосферой Венеры и двигателем участвуют два вида теплопередачи — конвекция и теплопроводность. Конвекция происходит между атмосферой и тепловой защитой двигателя, теплопроводность — между тепловой защитой и двигателем:

$$\begin{aligned} Q_k &= \alpha S (T_{\text{атм}} - T_{\text{внеш}}); \\ Q_t &= \frac{1}{R} (T_{\text{внеш}} - T_{\text{внут}}). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь Q_k и Q_t — тепловые потоки при конвекции и теплопроводности; α — коэффициент теплоотдачи; S — площадь поверхности теплового защитного кожуха; $T_{\text{атм}}$, $T_{\text{внеш}}$ — температура атмосферы Венеры и теплоизоляции; $T_{\text{внут}}$ — предельно допустимая температура двигателя;

$$R = \frac{\ln((l + d_{\text{пр}}) / d_{\text{пр}})}{2\pi\lambda_T h_{\text{ц}}} \quad (2)$$

— термическое сопротивление, l , λ_T — толщина и коэффициент теплопроводности теплоизоляции; $d_{\text{пр}}$ — диаметр привода; $h_{\text{ц}}$ — высота цилиндра теплоизоляции.

Защитный кожух имеет форму цилиндра, площадь его поверхности определяется по формуле

$$S = \pi \left(\frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 \cdot 2 + 2\pi \frac{d_{\text{ц}}}{2} h_{\text{ц}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{ц}}$ — диаметр цилиндра теплоизоляции.

Процесс конвекции является вынужденным, так как в атмосфере Венеры у поверхности присутствует ветер, хотя и несильный [15]. Направление теплового потока параллельно плоскости поверхности из-за направ-

ления ветра [16–18]. Процессы поведения газа, из которого состоит атмосфера (96,5 % CO₂), описываются критериями подобия Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля [19, 20]:

$$\text{Nu} = \alpha \frac{L}{\lambda_{\text{атм}}}, \quad (4)$$

где L — характерный размер тела; $\lambda_{\text{атм}}$ — коэффициент теплопроводности атмосферы Венеры;

$$\text{Re} = \frac{\upsilon L}{\nu}, \quad (5)$$

где υ — скорость ветра у поверхности Венеры; ν — кинематическая вязкость;

$$\text{Pr} = \frac{\nu \rho_{\text{атм}} c_{\text{атм}}}{\lambda_{\text{атм}}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{атм}}$, $c_{\text{атм}}$ — плотность и теплоемкость атмосферы Венеры (CO₂ в условиях высоких температуры и давления).

Число Нуссельта для вынужденной конвекции определяется следующим образом:

$$\text{Nu} = C \text{Re}^n + \text{Pr}^\eta \varepsilon_\varphi, \quad (7)$$

где C , n , η — коэффициенты, зависящие от числа Рейнольдса (табл. 1) [19]; ε_φ — угловой коэффициент, зависящий от расположения объекта относительно направления вектора теплового потока.

Таблица 1

**Зависимость коэффициентов C , n , η
от числа Рейнольдса**

Re	C	n	η
1–40	0,72	0,4	0,37
41–1000	0,52	0,5	0,37
1001–200 000	0,26	0,6	0,37
200 001–10 ⁷	0,23	0,8	0,4

Значения углового коэффициента ε_φ , зависящие от угла φ между направлением теплового потока и продольной осью стержня, приведены в табл. 2 [19].

Таблица 2

Зависимость значений углового коэффициента ϵ_ϕ от угла ϕ

Угловой коэффициент	Угол ϕ , град							
	90	80	70	60	50	40	30	20
ϵ_ϕ	1	1*	0,99	0,95	0,86	0,75	0,65	0,5
* Из-за округления углового коэффициента ϵ_ϕ до двух знаков после запятой его значения при $\phi = 90^\circ$ и 80° тождественны								

Учитывая тепловой поток Q_T , приходящий непосредственно на привод с тепловой защитой (1), и тепловой поток от мотора Q_M , можно определить массу теплового аккумулятора из соотношений:

$$\begin{aligned}
 qm_{т.а} &= Q_T \tau_2; \\
 c_{т.а} m_{т.а} \frac{dT}{d\tau_1} &= Q_T + Q_M; \\
 \tau_{общ} &= \tau_1 + \tau_2,
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

где q — теплота фазового перехода теплового аккумулятора; τ_2 — время фазового перехода теплового аккумулятора; $c_{т.а}$ — теплоемкость теплового аккумулятора; T — разность предельно допустимой $T_{внут}$ и начальной $T_{нач}$ температур двигателя; τ_1 — время нагрева теплового аккумулятора до температуры фазового превращения; $\tau_{общ}$ — требуемое общее время работы теплового аккумулятора.

Температура теплоизоляции $T_{внеш}$ и масса $m_{т.а}$ теплового аккумулятора находятся из выражений (1)–(8):

$$T_{внеш} = \frac{\alpha S T_{атм} + \frac{1}{R} T_{внут}}{\frac{1}{R} + \alpha S};
 \tag{9}$$

$$m_{т.а} = \frac{(Q_T + Q_M) \left(\tau_{общ} - \frac{q \tau_{общ}}{q + (T_{внут} - T_{нач}) c_{т.а}} \right)}{c_{т.а} (T_{внут} - T_{нач})}.
 \tag{10}$$

Предлагаемые конструктивные решения. Вещество теплового аккумулятора должно быть равномерно распределено в технологическом зазоре — пространстве между приводом и теплоизоляцией. При проекти-

ровании тепловой защиты необходимо знать толщину слоя размещаемого теплового аккумулятора.

Толщину слоя Δ можно найти из геометрических уравнений объема, занимаемого приводом ($V_{пр}$) и приводом вместе с тепловым аккумулятором (бойлером) (V_6). Разность этих объемов равна объему теплового аккумулятора $V_{т.а}$ (графически аккумулятор показан на рис. 1), который известен из его массы и плотности:

$$V_{т.а} = \frac{m_{т.а}}{\rho_{т.а}}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_{пр} &= \pi r_1^2 h_{пр}; \\ V_6 &= \pi (r_1 + \Delta)^2 (h_{пр} + 2\Delta), \end{aligned} \quad (12)$$

где r_1 — радиус привода.

Графическое представление объема теплового аккумулятора можно записать как разность двух объемов

$$V_{т.а} = V_6 - V_{пр}. \quad (13)$$

Подставив в уравнение (13) значение объемов V_6 и $V_{пр}$ из (11) и преобразовав его, получим кубическое уравнение, позволяющее найти Δ :

$$2\Delta^3 + \Delta^2 (4r_1 + h_{пр}) + \Delta (2r_1^2 + 2r_1 h_{пр}) - \frac{V_{т.а}}{\pi} = 0. \quad (14)$$

В результате математических преобразований выразим аргумент Δ . Это дает возможность найти Δ для различных технических решений, в которых могут применяться разные материалы тепловой защиты и теплового аккумулятора, с учетом некоторых вариантов геометрических размеров тепловой защиты.

Далее необходимо определить общую массу всей СОТР привода. Для этого найдем объем теплоизоляции

$$V_{тиз} = V_{ц} - V_{пр};$$

$$V_{ц} = \pi r_2^2 h_{ц};$$

$$V_{пр} = \pi r_1^2 h_{пр},$$

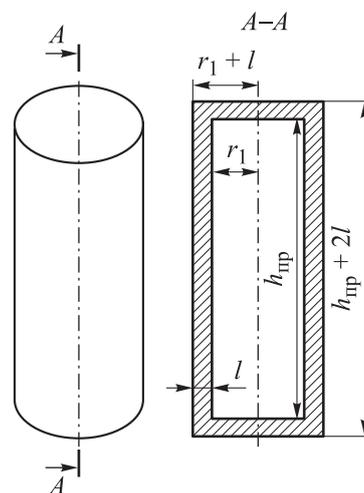


Рис. 1. Графическое представление объема теплового аккумулятора

где

$$V_{\text{тиз}} = \pi r_1^2 h_{\text{пр}} - \pi r_2^2 h_{\text{пр}} \quad (15)$$

— объем теплоизоляции; $V_{\text{ц}}$, r_2 — объем и радиус теплового защитного цилиндра.

Далее запишем массу теплоизоляции как

$$m_{\text{тиз}} = V_{\text{тиз}} \rho_{\text{тиз}}, \quad (16)$$

где $\rho_{\text{тиз}}$ — плотность теплоизоляции.

Общую массу теплоизоляции и теплового аккумулятора M , характеризующую оптимальность выбранных значений ($M \rightarrow \min$), определяем так:

$$M = m_{\text{тиз}} + m_{\text{т.а.}} \quad (17)$$

Конструктивное исполнение тепловой защиты привода грунтозаборного устройства, представляющее собой привод, окруженный внутренним слоем теплового аккумулятора и внешним слоем из теплового защитного материала, с выходным валом, зафиксированным радиально-упорными подшипниками, находящимися в стакане, показано на рис. 2 в виде схемы и на рис. 3 в виде 3D-модели.

Сравнительный анализ двух технических решений, полученных в результате вычислительного эксперимента. Расчет проводился для случая работы спускаемого аппарата на поверхности Венеры при соответствующих значениях параметров окружающей среды (температуры, теплопроводности, теплоемкости, кинематической вязкости, плотности атмосферы, скорости ветра).

Для расчета в качестве привода использовалась связка — бесколлекторный двигатель ЕС Ø22 мм мощностью $Q_{\text{м}} = 80$ Вт и редуктор GP 32 HP Ø32 мм, 4...8 Н·м швейцарской компании Maxon, специализирующейся на производстве высококачественных электроприводов для ракетно-космической промышленности и медицины. Высота привода $h_{\text{пр}}$ складывается из высоты двигателя (96,5 мм) и редуктора (63,7 мм), за диаметр привода $d_{\text{пр}}$ для простоты расчетов принимается диаметр редуктора (32 мм).

Необходимое время активного существования привода для обеспечения работы грунтозаборного устройства 5 мин. Требования к тепловому режиму привода не предъявляются.

Начальная температура двигателя $T_{\text{нач}}$ принята равной нулю, а предельно допустимая температура $T_{\text{внут}}$ — 70 °С.

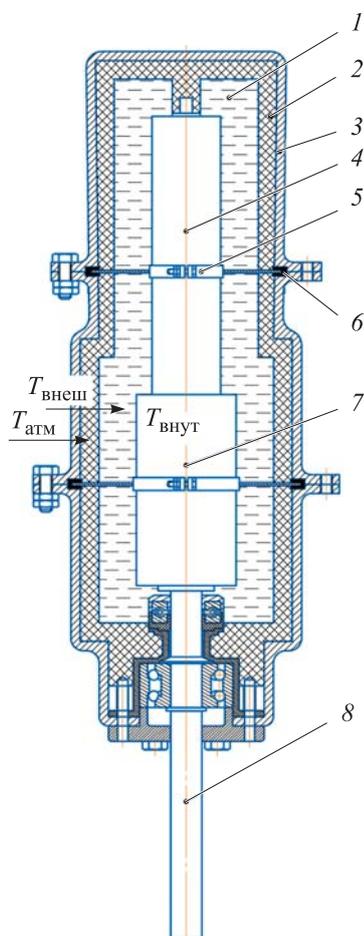


Рис. 2. Общий вид защищаемого привода и тепловых потоков:

1 — тепловой аккумулятор; 2 — теплоизоляционный материал; 3 — металлический корпус; 4 — двигатель; 5 — крепления привода; 6 — теплоизоляционные прокладки; 7 — редуктор; 8 — выходной вал

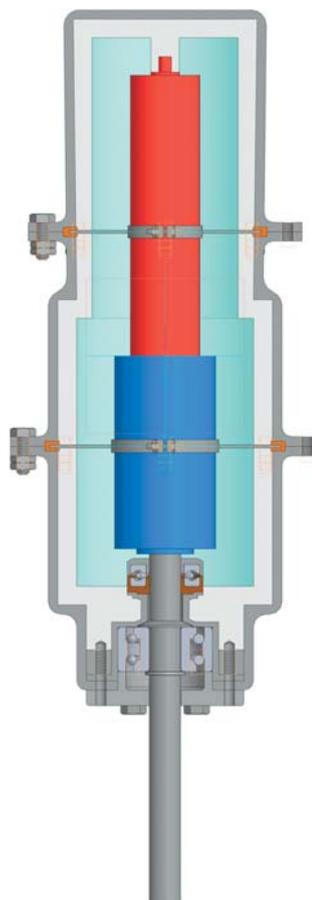


Рис. 3. Трехмерная модель защищаемого привода

При расчете рассматривались два технических решения: в первом в качестве теплового аккумулятора использовалась вода, а во втором — трехводный азотистый литий. Основной характеристикой этих веществ является теплота фазового перехода: $q = 171\,000$ Дж/кг для трехводного азотистого лития и $q = 2\,500\,000$ Дж/кг для воды при испарении. Для каждого варианта рассматривалась теплоизоляция различной толщины l в диапазоне от 2 мм до 4 см с шагом 2 мм, состоящая из кремнеземных волокон, соединенных каолином.

Общий алгоритм вычисления оптимальных параметров

1. Исходные данные следующие:
 - $l, d_{\text{пр}}, h_{\text{пр}}$;
 - $\tau_{\text{общ}}, T_{\text{атм}}, T_{\text{внут}}, T_{\text{нач}}, \lambda_{\text{т}}$;
 - $c_{\text{LiNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}, \rho_{\text{LiNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}, c_{\text{H}_2\text{O}}, \rho_{\text{H}_2\text{O}}, \nu, \rho_{\text{атм}}, c_{\text{атм}}, \lambda_{\text{атм}}, \nu$.
2. Задание неизвестных параметров $d_{\text{ц}} = f(l, d_{\text{пр}})$, $h_{\text{ц}} = f(l, h_{\text{пр}})$, $S = f(d_{\text{ц}})$.
3. Расчет оптимальных параметров (Re, Pr, Nu ($\alpha = f(Re, Pr, Nu)$); $R = f(l, \lambda_{\text{т}}, S)$; $T_{\text{внеш}}$; $Q_{\text{т}}$; $V_{\text{т.а}}$; Δ)).
4. Расчет массогабаритных характеристик $m_{\text{т.а}}, V_{\text{т.а}}, \Delta, V_{\text{тиз}}, m_{\text{тиз}}, M = f(m_{\text{тиз}}, m_{\text{т.а}})$.

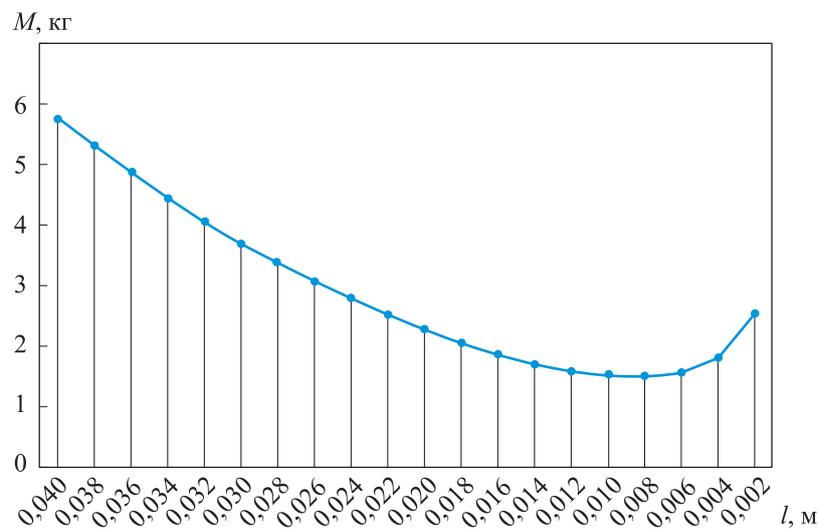
В результате расчетов при использовании трехводного азотистого лития суммарная масса теплового аккумулятора достигает минимума 1,51 кг при толщине 8 мм (рис. 4, а).

При использовании воды суммарная масса теплового аккумулятора принимает наименьшее значение (0,66 кг) при почти наименьшем значении толщины теплоизоляции (4 мм), а затем при уменьшении толщины суммарная масса начинает расти (рис. 4, б).

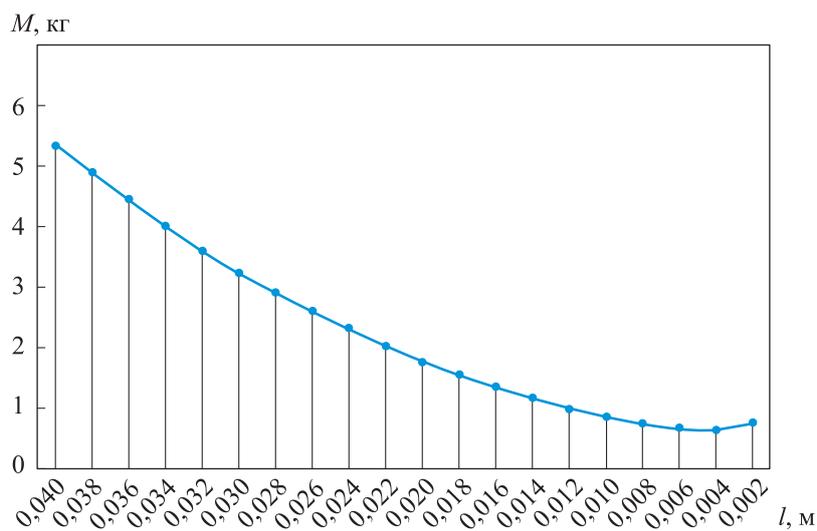
Следовательно, в результате расчетов определены оптимальные значения толщины теплоизоляции при использовании двух различных материалов для теплового аккумулятора, позволяющие достичь наименьшей массы конструкции. Это доказывает необходимость использования теплоизоляции как элемента, составляющего СОТР привода, несмотря на то что теплозащитная эффективность ее единицы массы меньше, чем теплозащитная эффективность единицы массы теплового аккумулятора.

Применение воды в качестве теплового аккумулятора (при фазовом переходе в пар) связано с такими дополнительными трудностями при проектировании спускаемого аппарата, как обеспечение сброса пара для регулирования давления и теплового режима воды в диапазоне от 0 до 100 °С от заправки воды в технологический зазор и до посадки на поверхность планеты. Важно при этом не допустить разрушения конструкции из-за расширения воды при замерзании и преждевременного испарения. Если данные трудности будут преодолены, применение воды останется наиболее рациональным решением.

Решение с трехводным азотистым литием по массе сильно проигрывает решению с водой, но оно уже отработано и останется простым в реализации.



a



б

Рис. 4. Зависимость суммарной массы от толщины теплоизоляции при использовании в качестве теплового аккумулятора трехфазного азотистого лития (*a*) и воды (*б*)

Заключение. В настоящей работе с помощью математической модели и разработанного алгоритма расчета проведены поиск геометрических параметров и сравнительный анализ двух вариантов теплового аккумулятора (на основе воды и трехфазного азотистого лития).

В результате вычислительных экспериментов выбран материал теплового аккумулятора и рассчитаны геометрические параметры теплоизоляции. Найден технологический зазор между приводом и его теп-

лоизоляции для размещения в нем теплового аккумулятора. Выполнен расчет общей массы СОТР для двух вариантов технических решений с учетом критерия минимальной массы, а также приведено конструктивное решение облика тепловой защиты двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воронцов В.А., Карчаев Х.Ж., Мартынов М.Б. и др. Программа исследования Венеры и международное сотрудничество. *Труды МАИ*, 2016, № 86.
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=65702>
- [2] Маров М.Я., Хантресс У.Т. Советские роботы в Солнечной системе. М., ФИЗМАТЛИТ, 2018.
- [3] Ксанфомалити Л.В. Планета Венера. М., Наука, 1985.
- [4] Кузьмин А.Д. Планета Венера. М., Наука, 1981.
- [5] Phase I. Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *Отчет объединенной научной рабочей группы «Venera-D»*. М., ИКИ РАН, 2017.
- [6] Засова Л.В., Горинов Д.А., Эйсмонт Н.А. и др. «Венера-Д» — проект автоматической станции для исследования Венеры. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2018, № 3, с. 13–17. EDN: VKMNPS
- [7] Борисенко А.В. Выбор хладагента и оптимизация параметров цикла системы термостатирования посадочного аппарата «Венера-Д». *Молодежный научно-технический вестник*, 2015, № 2, с. 10. EDN: TMNEFB
- [8] Reid E. Long-term researcher of Venus. Kalamazoo, Western Michigan University, 2021. URL: https://scholarworks.wmich.edu/honors_theses/3384
- [9] 17th meeting of the Venus research group. Lunar and Planetary Institute, 2019. *lpi.usra.edu: веб-сайт*. URL: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/meetings/vexag-17> (дата обращения: 24.06.2024).
- [10] Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *Отчет объединенной научной рабочей группы «Venera-D» по второму этапу работы*. М., ИКИ РАН, 2017, с. 1–93.
- [11] Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *Заключительный отчет объединенной научной рабочей группы «Venera-D»*. М., ИКИ, 2019, с. 1–174.
- [12] Zasova L., Gregg T., Burdanov A., et al. Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *EPSC-DPS Joint Meeting*, 2019, vol. 13, art. EPSC-DPS2019-1938-1.
- [13] Долгополов В.П., Пичхадзе К.М., Суханов К.Г. Проект «Вега» — космическая экспедиция к Венере и комете Галлея. *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2011, № 5, с. 41–50. EDN: OJNPLR

- [14] Зеленый Л.М., ред. Венера-Д. Сопровождение по моделированию Венеры. М., ИКИ РАН, 2018.
- [15] Бронштэн В.А. Планета Венера. М., Знание, 1971.
- [16] Кондратьев К.Я., Крупенин Н.Н., Селиванов А.С. Планета Венера. Л., Гидрометеоиздат, 1987.
- [17] Келлог У., Саган К. Атмосфера Марса и Венеры. М., ИИЛ, 1962.
- [18] Изаков М.Н. О глобальной циркуляции атмосферы Венеры. М., ИКИ РАН, 1989.
- [19] Поршнева Г.П. Проектирование систем обеспечения теплового режима роботов-планетоходов. Дис. ... д-ра техн. наук. СПб., СПбПУ, 1998.
- [20] Финченко В.С., Котляров Е.Ю., Иванков А.А. Системы обеспечения тепловых режимов автоматических межпланетных станций. Химки, НПО им. С.А. Лавочкина, 2018.

Ковешников Александр Александрович — студент магистратуры кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Палешкин Андрей Вячеславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ковешников А.А., Палешкин А.В. Расчет тепловой защиты привода грунтозаборного устройства автоматической межпланетной станции «Венера-Д» в экстремальных условиях эксплуатации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 3 (150), с. 4–18. EDN: WGLVOV

**COMPUTING THERMAL PROTECTION
OF THE SOIL-SAMPLING MECHANISM DRIVE
OF THE VENERA-D AUTOMATIC INTERPLANETARY STATION
EXPOSED TO EXTREME OPERATION CONDITIONS**

A.A. Koveshnikov
A.V. Paleshkin

kovesh27@gmail.com
paleshkin@mai.ru

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper proposes a method for ensuring thermal protection of the soil-sampling mechanism drive installed on the Venera-D mission descent module. Thermal protection design and development for the missions to Venus requires taking into account the

Keywords

Thermal protection, Venera-D, thermodynamics, thermal insulation, heat accumulator, phase transition, mathematical model

systems harsh operation conditions on the planet surface, where atmospheric temperature is ~ 500 °C and pressure is ~ 100 atm. As the descent module sealed compartment is possibly lacking space, the drive should be installed outside the sealed compartment, which requires design and development of the drive thermal protection. The method for providing thermal protection lies in introducing a phase-change heat accumulator in the mechanism as a key element that counteracts the external heat flows. Computational experiment was conducted using a mathematical model, which resulted in selecting the most suitable of two materials for the heat accumulator and finding optimal parameters of the thermal protection geometry making it possible to ensure the system lowest mass. Design solution for the thermal protection was developed. It included electric motor with a gearbox surrounded by the heat accumulator internal layer and by external layer of the heat-protective material, and with an output shaft fixed by the radial thrust bearings installed in a cup. Two technical solutions in selecting material for the heat accumulator obtained as a result of a computation experiment were compared

Received 14.04.2023

Accepted 25.03.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Vorontsov V.A., Karchaev Kh.Zh., Martynov M.B., et al. Venus exploration program and international cooperation. *Trudy MAI*, 2016, no. 86 (in Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=65702>
- [2] Huntress J.R., Marov M.Ya. Soviet robots in the Solar system. New York, Springer, 2011.
- [3] Ksanfomaliti L.V. Planeta Venera [Planet Venus]. Moscow, Nauka Publ., 1985.
- [4] Kuzmin A.D. Planeta Venera [Planet Venus]. Moscow, Nauka Publ., 1981.
- [5] Phase I. Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *Final Report of the Joint Science Definition Team*. Moscow, IKI RAS Publ., 2017.
- [6] Zasova L.V., Gorinov D.A., Eysmont N.A., et al. Venera-D: a design of automatic space station for Venus exploration. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2018, no. 3, pp. 13–17 (in Russ.). EDN: VKMNPS
- [7] Borisenko A.V. Vybor khladagenta i optimizatsiya parametrov tsikla sistemy termostirovaniya posadochnogo apparata “Venera-D”. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik*, 2015, no. 2, p. 10. EDN: TMNEFB

- [8] Reid E. Long-term researcher of Venus. Kalamazoo, Western Michigan University, 2021. Available at: https://scholarworks.wmich.edu/honors_theses/3384
- [9] 17th meeting of the Venus Research Group. Lunar and Planetary Institute, 2019. *lpi.usra.edu: website*. Available at: <https://www.lpi.usra.edu/vexag/meetings/vexag-17> (accessed: 24.06.2024).
- [10] Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *Phase II Final Report of the Joint Science Definition Team*. Moscow, IKI RAS Publ., 2017, pp. 1–93.
- [11] Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *Final report of the Joint Science Definition Team*. Moscow, IKI RAS Publ., 2019, pp. 1–174.
- [12] Zasova L., Gregg T., Burdanov A., et al. Venera-D: expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. *EPSC-DPS Joint Meeting*, 2019, vol. 13, art. EPSC-DPS2019-1938-1.
- [13] Dolgopолов V.P., Pichkhadze K.M., Sukhanov K.G. “Vega” project — the space mission towards Venus and Halley comet. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2011, no. 5, pp. 41–50 (in Russ.). EDN: OJNPLR
- [14] Zelenyy L.M., ed. Venera-D. Soveshchanie po modelirovaniyu Venery [Venera-D. Venus modeling workshop]. Moscow, IKI RAS Publ., 2018.
- [15] Bronshten V.A. Planeta Venera [Planet Venus]. Moscow, Znanie Publ., 1971.
- [16] Kondratyev K.Ya., Krupenio N.N., Selivanov A.S. Planeta Venera [Planet Venus]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987.
- [17] Kellogg W., Sagan K. The atmospheres of Mars and Venus. Washington, National Research Council, 1961.
- [18] Izakov M.N. O globalnoy tsirkulyatsii atmosfery Venery [On global circulation of Venus atmosphere]. Moscow, IKI RAS Publ., 1989.
- [19] Porshnev G.P. Proektirovanie sistem obespecheniya teplovogo rezhima robotov-planetokhodov. Dis. d-ra tekhn. nauk [Designing of the systems of thermal regime support for robotic planetary vehicles. Dr. Sc. (Eng.). Diss.]. St. Petersburg, SPbPU, 1998 (in Russ.).
- [20] Finchenko V.S., Kotlyarov E.Yu., Ivankov A.A. Sistemy obespecheniya teplovykh rezhimov avtomaticheskikh mezhplanetnykh stantsiy [Systems for providing thermal modes of automatic interplanetary stations]. Khimki, NPO im. S.A. Lavochkina Publ., 2018.

Koveshnikov A.A. — Master’s Degree Student, Department of Operation Management of Rocket and Space Systems, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Paleshkin A.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Operation Management of Rocket and Space Systems, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Koveshnikov A.A., Paleshkin A.V. Computing thermal protection of the soil-sampling mechanism drive of the Venera-D automatic interplanetary station exposed to extreme operation conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 3 (150), pp. 4–18 (in Russ.).

EDN: WGLVOV