

Тепловой режим солнечного зонда с учетом ударного воздействия высокоскоростных частиц пыли

Салосина М. О.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

E-mail: salosina.m@yandex.ru

Аннотация

Представлены основные сведения о пространственной плотности, составе и динамике пылевых частиц на трассе функционирования солнечного зонда. Приведены оценки возможной степени разрушения материала теплозащитного экрана КА в результате столкновений с высокоскоростными частицами в ближайшей окрестности Солнца. Показано, что ударное воздействие пылевых частиц не оказывает существенного влияния на тепловое состояние КА и разрушение его тепловой защиты.

Ключевые слова: космический аппарат, исследование Солнца, тепловая защита, высокоскоростные частицы, ударное воздействие

Введение

Космические исследования Солнца и околосолнечного пространства представляют огромный научный интерес и вносят решающий вклад в понимание основных физических процессов, происходящих на Солнце и в его короне,

эволюции Солнечной системы и воздействия солнечной активности на Землю и околоземное космическое пространство. Использование космических аппаратов (КА) для исследования Солнца и солнечно-земных связей позволило значительно расширить знания о сложных и многообразных явлениях на Солнце и в околосолнечном пространстве. Однако многие вопросы физики Солнца остаются до конца неразрешенными и требуют дальнейших научных исследований, сочетающих в себе прямые измерения солнечного ветра вблизи Солнца с дистанционными наблюдениями поверхности Солнца с высоким пространственным разрешением.

Исследование Солнца с гелиоцентрических орбит с низким перигелием предполагается провести в проектах “*Интергелио-Зонд*”, “*Solar Probe Plus*” и “*Solar Orbiter*”, научные задачи которых включают изучение механизмов нагрева солнечной короны, динамики солнечной атмосферы и параметров солнечного ветра, вспышек на Солнце, магнитных полей в его полярных областях и формирование солнечного цикла [1, 2].

На материалы и конструкции солнечных зондов воздействует ряд внешних факторов, влияющих на тепловое состояние КА и разрушение его тепловой защиты. Ориентацию аппарата в пространстве, возможные способы пассивной тепловой защиты и выбор средств отвода тепла, обеспечивающих условия нормальной работы приборов и радиоаппаратуры, а также постановку и проведение научных экспериментов определяет в первую очередь тепловое излучение Солнца, интенсивность которого непрерывно возрастает в течение полета и определяется траекторией космического аппарата.

На минимальном расстоянии от Солнца на космические аппараты “*Solar Orbiter*” и “*Интергелио-Зонд*” будет воздействовать тепловой поток плотностью соответственно $\sim 17\,000\text{ Вт/м}^2$ и $\sim 14\,000\text{ Вт/м}^2$. В перигелии орбиты космического аппарата “*Solar Probe Plus*” плотность теплового потока составит $\sim 0.7 \cdot 10^6\text{ Вт/м}^2$.

Тепловая защита аппаратуры космических аппаратов в околосолнечном пространстве обеспечивается за счет использования специальных экранов, защищающих зонды от воздействия прямого солнечного излучения.

В проекте “*Интергелио-Зонд*” защитные экраны выполнены в виде двухкаскадной схемы, в состав которой входят два экрана (главный и дополнительный), расположенные друг за другом. Экраны выполнены из термостойкого композиционного материала КАМА-УУКМ на основе тканопрошивного каркаса из углеродной ткани УТ-900 толщиной 2 мм. Материал имеет плотность $1,57\text{ г/см}^3$ и выдерживает температуру до 2000 К в вакууме.

Теплозащитный экран солнечного зонда “*Solar Probe Plus*” [2 - 4], представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из слоя сетчатого стеклоуглерода ERG RVC толщиной $\sim 15\text{ см}$, расположенного между слоями углерод-углеродного материала на основе углеродной ткани Т300 толщиной 0.076 см.

Наряду с интенсивным тепловым излучением Солнца необходимо учитывать и солнечный ветер, высокая концентрация частиц которого может привести к повреждениям молекулярной структуры и деградации материалов тепловой защиты.

Существенным фактором, определяющим надежность функционирования космического аппарата и его систем в ближайшей окрестности Солнца, является воздействие частиц пыли, которые могут поражать внешние элементы конструкции КА со скоростями, достигающими ~ 60 км/с на трассе полета КА “*Интергелио-Зонд*” и 350 км/с в перигелии орбиты КА “*Solar Probe Plus*” [5].

Ударное воздействие высокоскоростных частиц может привести к ухудшению теплоизоляционных свойств теплозащитного экрана, нарушению структурной целостности и работоспособности аппарата и должно учитываться при проектировании тепловой защиты солнечных зондов.

Особенности метеорных условий функционирования солнечного зонда

Необходимость оценки метеорных условий на трассе полета солнечного зонда обусловлена значительной (около 5 – 7 лет) продолжительностью экспедиции [6, 7] и большими значениями концентрации частиц по сравнению с околоземным космическим пространством.

Источниками пыли в околосолнечном пространстве являются межзвездная пыль и частицы пыли, образовавшиеся при разрушении астероидов и комет. Сведения о пыли в ближайшей окрестности Солнца получены на основе анализа измерений солнечного света, рассеиваемого пылевыми частицами (зодиакальный свет, F-корона Солнца), экстраполяции данных о распределении пыли в околоземном космическом пространстве на меньшие расстояния от Солнца и локальных измерениях частиц вплоть до расстояния 0.3 а.е. от Солнца.

Прямые измерения плотности потока пыли были получены в области околосолнечного пространства (0.3 - 5) а.е. [8, 9]. Согласно этим данным поток пыли существенно не изменяется на гелиоцентрических расстояниях от 2 а.е. до 5 а.е. и составляет $10^{-6} - 10^{-5} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$.

По данным КА “*Helios*” в пределах 0.3...1 а.е. от Солнца плотность потока пылевых частиц изменяется, приблизительно следуя зависимости $r^{-2.5 \pm 0.8}$, где r – гелиоцентрическое расстояние, достигая на расстоянии 0.3 а.е. величины $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. Примерно 70% зарегистрированных космическим аппаратом пылевых частиц имело вектор скорости, направленный в антисолнечную полусферу; частицы с большей массой двигались по орбитам, близким к круговым, частицы с меньшей массой – по гиперболическим орбитам в сторону от Солнца. Детекторы, установленные на борту космического аппарата “*Helios*”, позволяли регистрировать частицы с массами более 10^{-12} г при скоростях 10...20 км/с относительно космического аппарата [10].

Измерения зодиакального света, выполненные на космическом аппарате “*Helios*” в 1974-1976 гг. позволили установить, что пылевые частицы представляют собой конгломераты более мелких частиц; обладающих неоднородной плотностью и состоящих из диэлектрика с вкраплениями Fe и Al; около 80% частиц имеют размер от 1 мкм до 100 мкм. Зависимость плотности пыли от гелиоцентрического расстояния в области пространства 0.08...1.2 а.е. соответствует закону: $n \sim r^{-1.3}$

Наземные фотометрические измерения F-короны Солнца [11, 12], проведенные во время солнечных затмений, показывают, что на расстоянии около

4...5 радиусов Солнца, существует пылевое облако, состоящее из частиц, имеющих радиус ~ 1 мкм; концентрация частиц в кольце достигает величины $\sim 10^{-11}$ см $^{-3}$. Сдвиг линий поглощения указывает на движение частиц пыли по круговым орбитам вблизи плоскости эклиптики с абсолютной скоростью ~ 50 км/с. Вблизи солнечного полюса на расстояниях 6...7 радиусов Солнца регистрировались потоки пыли в антисолнечном направлении со скоростями 130 км/с.

На основании этих данных был предложен ряд модельных распределений частиц пыли.

Согласно [13] зависимость пространственной плотности частиц пыли от гелиоцентрического расстояния вплоть до 0.1 а.е. (~ 20 радиусов Солнца) для орбит с эксцентриситетом $e > 0$ имеет следующий вид:

$$n(r) = n_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\nu}, \quad (1)$$

где n_0 - плотность на расстоянии $r_0 = 1$ а.е. от Солнца;

ν - показатель степени, орбитам с эксцентриситетом $e = 0$ соответствует $\nu = 1$, для орбит с эксцентриситетом $e > 0$ можно принять $\nu = 1.3$.

Поток частиц пыли с массами, большими m на расстоянии $r_0 = 1$ а.е., полученный на основе локальных измерений, обычно аппроксимируется степенной функцией:

$$F(m, r_0) = (c_4 m^{g_4} + c_5)^{g_5} + c_6 (m + c_7 m^{g_6} + c_8 m^{g_7})^{g_8} + c_9 (m + c_{10} m^{g_9})^{g_{10}}, \quad (2)$$

где $F(m, r_0)$ – поток частиц пыли, $m^{-2} \cdot c^{-1}$; m – масса, г; $c_4 = 2.2 \cdot 10^3$, $c_5 = 15$, $c_6 = 1.3 \cdot 10^{-9}$, $c_7 = 10^{11}$, $c_8 = 10^{27}$, $c_9 = 1,3 \cdot 10^{-16}$, $c_{10} = 10$; $g_4 = 0.306$, $g_5 = -4.38$, $g_6 = 2$, $g_7 = 4$, $g_8 = -0.36$, $g_9 = 2$, $g_{10} = -0.8$;

Полагая поток изотропным:

$$F(m, r) = \frac{v(r)N(m)}{4}, \quad (3)$$

где $N(m, r)$ – интегральная плотность частиц;

$v(r)$ - средняя скорость соударения частиц (относительная скорость).

$$v(r) = v_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-0,5}, \quad (4)$$

$v_0 = 20$ км/с – средняя скорость соударения на расстоянии $r_0 = 1$ а.е.

Для орбит частиц радиусом $r < 1$ а.е.:

$$F(m, r) = F(m, r_0) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-1,5}, \quad (5)$$

Приведенная модель распределения частиц по размерам справедлива для широт $\leq 30^\circ$. Средние значения потока частиц ($m^{-2}c^{-1}$), воздействующих на КА, движущийся по круговой орбите в плоскости эклиптики, на различных расстояниях от Солнца представлены в табл. 1.

Измерения в инфракрасном диапазоне, проведенные на космическом аппарате “IRAS” в 1984, позволили установить, что пыль сосредоточена в основном вблизи плоскости эклиптики (плоскость симметрии пылевого облака составляет с плоскостью эклиптики угол около 3°), и с увеличением расстояния от плоскости эклиптики её плотность уменьшается [13].

Таблица 1. Средние значения потока частиц на различных расстояниях от Солнца

Расстояние от Солнца	Широта	Поток частиц ($\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$)		
		0.5–2.0 $\mu\text{м}$	2–10 $\mu\text{м}$	> 10 $\mu\text{м}$
8–10 R_c	< 30 °	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$
	> 30 °	$6 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-6}$	—
6–8 R_c	< 30 °	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	> 30 °	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	—
4–6 R_c	< 30 °	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	> 30 °	$3 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$	—
2–4 R_c	< 30 °	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	> 30 °	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	—

На основе этих измерений была предложена следующая формула для определения пространственной плотности частиц пыли:

$$n(r, z) \propto r^{-s} \exp\left(-B \frac{z}{r}\right), \quad (6)$$

где r - гелиоцентрическое расстояние; z - расстояние до плоскости эклиптики; $s = 1.3$; $B = 2.6$.

Для грубой оценки интегральной плотности частиц на широтах > 30° можно использовать следующие соотношения [14]:

$$N(m, r)|^{i>30^\circ} = 0.10N(m)|_{r_0}^{i\leq 30^\circ} r^{-1.5} \text{ для частиц с диаметром } < 5 \mu\text{м}, \quad (7)$$

$$N(m, r)|^{i>30^\circ} = 0.50N(m)|_{r_0}^{i\leq 30^\circ} r^{-1.5} \text{ для частиц с диаметром } \geq 5 \mu\text{м}. \quad (8)$$

Реальная пространственная плотность частиц с массами > 10^{-7} может оказаться значительно ниже рассчитанной по приведенным формулам (рис. 1), так как эти частицы чаще всего разрушаются в результате столкновений [15]. Пространственная плотность частиц пыли с массами $10^{-12} < m < 10^{-7}$, наиболее часто образующихся в

результате столкновений, напротив, может в 2-5 раз превышать рассчитанное значение. Плотность частиц с массой $< 10^{-12}$ может оказаться ниже, так как эта составляющая облака пыли, вероятно, будет вынесена из ближайшей окрестности Солнца силой давления солнечного света.

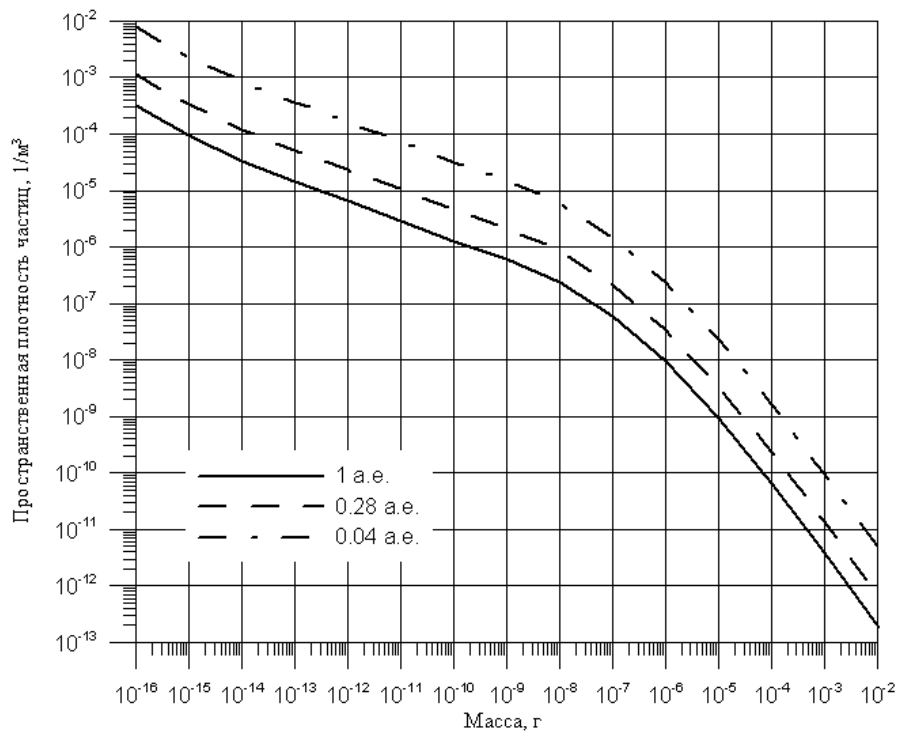


Рис. 1. Пространственная плотность частиц на различных расстояниях от Солнца

Основную долю (94 %) метеорных частиц в пространстве между 0.3 – 1 а.е. составляют каменные частицы с плотностью $2.3-3.5 \text{ г/см}^3$, доля железных ($\rho = 7.8 \text{ г/см}^3$) и железо-каменных ($\rho = 5.5 \text{ г/см}^3$) частиц составляет соответственно 5 и 1 % [16].

По данным о составе частиц, собранных в стратосфере Земли, основными формами кремнийсодержащих минералов в частицах межпланетной пыли являются пироксен и оливин [13]. Считается, что крупинки пироксена сублимируют на

расстоянии 4-6 R_c (R_c – радиус Солнца), а крупинки оливина на расстоянии 10-13 R_c (табл. 2).

Таблица 2. Зона сублимации для различных веществ

Графит	$\leq 5 R_c$
Стеклоуглерод	4 R_c
Магнетит	10-40 R_c
Железо	11-24.3 R_c
Лед	1-2.8 а.е.
Обсидиан с низким содержанием FeO	1.9-7 R_c
Обсидиан с высоким содержанием FeO	2.9-6 R_c
Андезит	9-10.5 R_c
Базальт	6 R_c
Кварц	1.5-4 R_c
Силикат	14 R_c
Кристаллический оливин с высоким содержанием Mg	10 R_c
Аморфный оливин с высоким содержанием Mg	13.5-15.5 R_c
Кристаллический пироксен с высоким содержанием Mg	5 R_c
Аморфный пироксен с высоким содержанием Mg	5.5-6.5 R_c

Частицы с оптическими свойствами, близкими к свойствам обсидиана (вулканического стекла) с низким содержанием FeO в зависимости от размера могут существовать очень близко к Солнцу (вплоть до 2 R_c). Углеродосодержащие частицы, такие как графит или стеклоуглерод, сублимируют на расстоянии 4 R_c .

Пористые частицы пыли в зависимости от химического состава могут достигать 2-3 R_c.

Образующиеся при разрушении комет и астероидов пылинки движутся по орбитам с параметрами, близкими к параметрам орбит родительских тел: астероидов ($i < 30^\circ$ и $e < 0,1$) и комет ($i < 40^\circ$ и $e < 0,4$). Однако в результате воздействия сил различной природы первоначальные параметры орбит частиц постепенно изменяются.

Орбитальная эволюция пылевых частиц, определяемая в первую очередь гравитационной силой и радиационным давлением, требует учета большого количества факторов, которые зависят от материала частиц, их размеров, заряда, температуры нагрева и т.д. [17, 18].

Частицы с массами, превосходящими 10^{-10} г, для которых отношение силы давления солнечного света и сил тяготения $\beta < 0.5$, движутся по круговым или эллиптическим орбитам с наклоном $i \leq 30^\circ$.

На пылинки, с массами $10^{-16} < m < 10^{-10}$ г сильное воздействие оказывает давление солнечного света, формирующее поток пыли в антисолнечном направлении. Максимальное давление радиации испытывают частицы радиусами 0.15 – 0.3 мкм. Движение таких частиц описывается уравнением:

$$\ddot{r} + \frac{GM_{\odot}(1-\beta)}{|r|^3} r = 0 \quad (9)$$

где M_{\odot} - масса Солнца, G – гравитационная постоянная.

Частицы, размеры которых менее 0.15 мкм, приближаются к Солнцу по спирали в соответствии с законом торможения Пойнтинга-Робертсона в течение промежутка времени, оцениваемого в 10^5 - 10^6 лет.

Ударное воздействие высокоскоростных частиц на тепловую защиту солнечного зонда

Столкновение с высокоскоростными частицами по характеру воздействия на материал сходно с взрывом [5]. В момент контакта большое количество энергии выделяется на маленькой площади за короткий промежуток времени, в результате чего происходит выталкивание материала с образованием кратера и возникновение в материале преграды сильной ударной волны. Начальная плотность энергии за волной на два — три порядка превышает удельную энергию испарения, поэтому в волне разгрузки некоторая часть вещества полностью испаряется. По мере затухания ударной волны испарение становится частичным, а затем сменяется плавлением и механическим дроблением вещества. Выход ударной волны на тыльную сторону экрана может вызвать отколы [19].

Распространение ударной волны в высокопористых углерод-углеродных материалах сопровождается необратимым уплотнением пор и высокотемпературными фазовыми переходами, давление которых зависит от начальной плотности материала. Так, углерод-углеродные материалы с высокой

плотностью переходят в твердые фазы алмаза и металлическую, материалы с низкой плотностью переходят в фазу графита и жидкую фазу [5].

Совокупность физических и химических явлений в материале, вызванных столкновением с высокоскоростной частицей, зависит, прежде всего, от скорости соударения, т.е. от исходной кинетической энергии, выделяющейся в области соударения [16]. При скоростях удара менее 2-3 км/с возможны лишь процессы деформации и механического разрушения частицы и преграды. Плавление вещества начинается при скоростях удара, превышающих 2-3 км/с. При скоростях соударения выше 10-15 км/с начинается испарение вещества, сопровождающееся частичной термической ионизацией образующегося пара, а при скоростях более 20-25 км/с процесс термической ионизации происходит очень интенсивно, в результате чего из области соударения выбрасывается облако плазмы с температурой $\sim 10^4$ К.

Имеющаяся в настоящее время информация о высокоскоростном ударе относится к области скоростей, не превышающих 20 км/с, и получена, в основном, экспериментальным путем [20].

Особый интерес к проблеме высокоскоростного удара возник в 80-е годы в связи с разработкой трех проектов запуска космических аппаратов в окрестность кометы Галлея. Скорость движения запущенных в декабре 1984 г аппаратов “*Vega-1*” и “*Vega-2*” через газопылевую оболочку ядра кометы составляла от 60 до 80 км/с. Плотность потока частиц достигала $10^2 - 10^3 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Эти условия предъявляли весьма высокие требования к системе противопылевой защиты аппаратов. Для космических аппаратов “*Vega*” наиболее опасным считался удар микрометеорита с

плотностью $\sim 1 \text{ г/см}^3$ и размером $\sim 1 \text{ мм}$. При столкновении такой частицы с экраном энергия $\sim 3 \text{ кДж}$ выделяется в течение 10 нс [20]. В микрометеорите и экране образуются сильные ударные волны с начальным давлением в десятки мегабар [21].

Скорость столкновения частиц пыли с теплозащитным экраном КА на расстоянии 9.5 солнечных радиусов от Солнца может достигать 350 км/с . Давления и температуры, создаваемые при этом в теплозащитном материале, достигают феноменально высоких значений. При столкновении частицы кремния с кремниевой мишенью со скоростью 300 км/с давление в точке контакта достигает значения $6.2 \times 10^4 \text{ ГПа}$, а температура – $1.9 \times 10^6 \text{ К}$ [5]. При таких высоких температурах все теплозащитные материалы полностью распадутся и, по крайней мере, частично ионизируются, что приведет к существенному локальному изменению теплофизических свойств материала теплозащитного экрана КА [22, 23].

Прямое экспериментальное изучение взаимодействия пылевых частиц с защитными экранами космических аппаратов в настоящее время невозможно из-за отсутствия лабораторных методов безнагревного ускорения твердых тел до столь высоких скоростей. В связи с этим особое значение приобретает теоретический анализ и численное моделирование высокоскоростных ударных явлений.

В [5] приводятся оценки степени разрушений, которым подвергнется материал теплозащитного экрана солнечного зонда “*Solar Probe Plus*” при столкновении с высокоскоростными частицами пыли, в предположении, что температура экрана меняется от 1650 К в верхнем слое до 800 К в нижнем слое, а скорость столкновения

достигает 100 км/с и направлена по нормали к экрану. Рассматривался теплозащитный экран, состоящий из трех слоев – 0.01 см (100 мкм) Al_2O_3 , 0.083 см углерод-углеродного композиционного материала, и 15 см сетчатого стеклоуглерода. Предполагалось, что углерод-углеродный композиционный материал и сетчатый стеклоуглерод имеют однородную микроструктуру.

Согласно расчетам [5] частица со средней плотностью 2.5 г/см^3 и диаметром 100 мкм, движущаяся со скоростью 100 км/с, создает в мишени кратер диаметром 0.16 - 0.18 см и повреждает окружающий материал в зоне, в несколько раз превышающей размер кратера. Кратер заполнен парожидкостной смесью, отделенной от твердой фазы тонким слоем расплавленного вещества.

Струя материала с небольшим количеством осколков проникает в сетчатый стеклоуглерод, достигая глубины 0.22 см. Открытая структура пор материала не является препятствием для газов струи, распространяющихся как в боковом направлении, так и в направлении удара.

Под воздействием ударной волны углерод-углеродный композиционный материал уплотняется в области радиусом 0.14 см, в хрупком материале Al_2O_3 вокруг центрального кратера образуются трещины, расходящиеся на расстояние 0.18 см. Углерод-углеродный композиционный материал подвергается большему сжатию, чем Al_2O_3 , вследствие чего два слоя расслаиваются на расстоянии 0.2 см от точки удара.

Согласно принятой модели пылевой обстановки на траектории полета КА, движущегося по орбите с параметрами: радиус перигелия $9.736 R_{\text{sun}}$, радиус афелия

0.763 а.е., в течение периода 93.762 суток, удары частиц массой $> 10^{-6}$ г представляют собой достаточно редкие события (рис. 2). Их вклад в суммарную площадь поврежденной части экрана пренебрежимо мал. Основная часть повреждения поверхности экрана происходит от ударов частиц, масса которых находится в диапазоне $10^{-16} < m < 10^{-6}$ г, движущихся в направлении от Солнца.

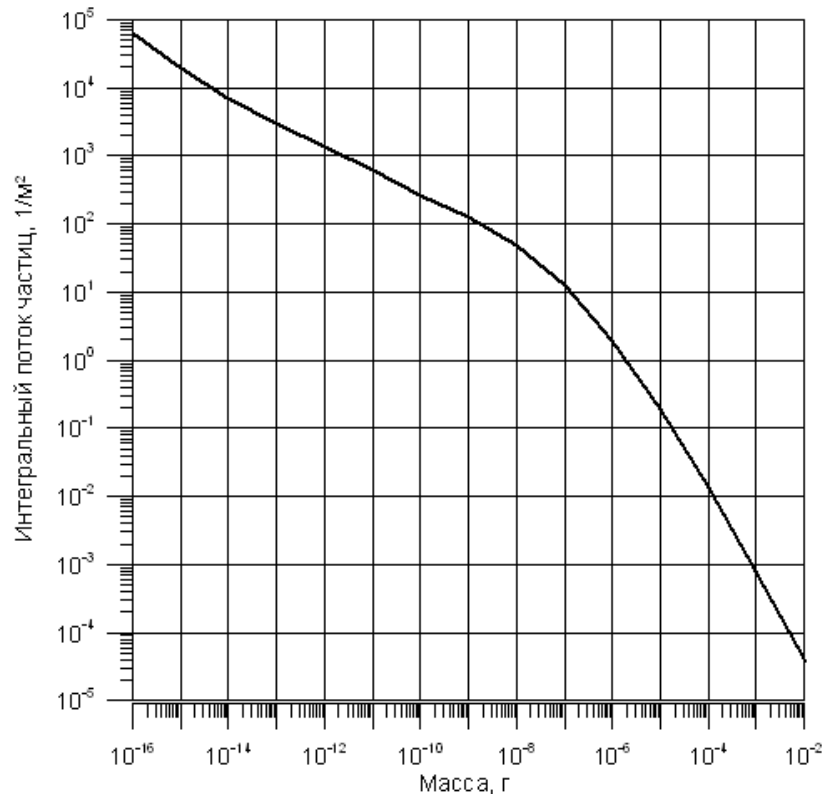


Рис. 2. Интегральный поток частиц, воздействующий на КА

Для оценки размеров пробиваемых в элементах конструкции КА отверстий можно воспользоваться формулой [24]:

$$D = d \cdot [1 + (D_k/d)^{1-\mu} (h/d)^\mu], \quad (10)$$

где $\mu = 0.35$; $D_k = 3.2 \cdot (mv^2/\rho_s c^2)^{1/3}$ – диаметр кратера в полубесконечной преграде; m – масса частицы, движущейся со скоростью v ; ρ_s – плотность материала экрана; c – скоростью звука в мишени; h – толщина экрана; d – диаметр частицы.

Глубину кратера δ_{∞} и предельную толщину пробивания экрана δ^* можно определить по эмпирическим зависимостям [21]: $\delta_{\infty}=6.2d^{1.056}$; $\delta^*=17.5d^{1.056}$.

Приведенное соотношение (10) получено в результате обработки экспериментальных данных по пробиванию тонкого никелевого экрана алюминиевым ударником массой $m \sim 1.66 \cdot 10^{-4}$ г при скоростях до 11 км/с [24]. Предполагаемые плотности частиц пыли и скорости их столкновения с конструкцией КА, а также механические и термодинамические свойства высокопористых углеродных материалов, основных материалов теплозащитного экрана, далеки от использованных в лабораторном эксперименте. На данный момент экспериментальные данные о параметрах отверстий, пробиваемых в теплозащитных материалах высокоскоростными частицами в широком диапазоне масс и скоростей, отсутствуют, а попытка использования известных эмпирических соотношений при $v = 100$ км/с и $\rho = 2.5$ г/см³ приводит к завышению диаметров кратеров по сравнению с [5] в 2-3 раза.

Согласно численному моделированию [5] для частиц с массами $10^{-16} < m < 10^{-6}$ г диаметры кратеров, создаваемых в теплозащитном экране, не превысят 2 мм.

Ввиду малого размера налетающей частицы время действия высокого давления оказывается ограниченным $10^{-11} - 10^{-13}$ с, поэтому ударная волна в материале быстро затухает и энергия, сообщаемая веществу, становится недостаточной для его испарения и плавления. На некотором удалении от места удара оказывается возможным только локальное повышение температуры до нескольких сотен К, не оказывающее заметного влияния на равновесную

температуру экрана [4]. Обеспечение необходимой стойкости теплозащитного экрана КА к ударному воздействию высокоскоростных частиц может быть достигнуто за счет выбора конструкции экрана (уменьшения площади поверхности экрана), толщины слоев, а также материалов, устойчивых к ударным воздействиям.

В заключение, необходимо отметить, что защита конструкции солнечного зонда от высокоскоростных ударов будет обеспечиваться [14, 25] многослойным теплоизоляционным покрытием, состоящим из 20 слоев металлизированной пленки: внешнего и внутреннего толщиной 25 мкм и 18 промежуточных слоев толщиной 7 мкм, разделенных прокладками толщиной 140 мкм. В [25] проведена оценка экранирующей способности многослойного теплоизоляционного покрытия толщиной 0.0176 см расположенного на расстоянии 2.54 см от защищаемого элемента конструкции КА для диапазона скоростей 30 - 150 км/с. При столкновении с внешним экраном происходит разрушение пылевой частицы и части экрана, прилегающей к месту удара. Струя продуктов разрушения, состоящая в основном из материала экрана и находящаяся в плазменной и мелкодисперсной конденсированных фазах, при движении в вакуумном промежутке между многослойным теплоизоляционным покрытием и элементом конструкции КА успевает заметно расширяться. При этом воздействие плазменной струи на конструкцию КА оказывается уже не столь резко локализованным, как первоначальное воздействие.

Толщина фольги, пробиваемая пылевой частицей, определяется по формуле [26]:

$$T \approx cm^{0.4} v^{0.88} \rho^{0.33}, \quad (11)$$

где T – толщина в см; c – коэффициент ~ 1.5 ; m , v , ρ – соответственно масса, скорость и плотность пылевой частицы.

Критический диаметр частицы, способной пробить многослойную теплоизоляцию, равен 610 мкм для скорости 30 км/с и 500 мкм для скорости 150 км/с [25].

Список литературы

1. Проект "Интергелиозонд" / Под ред. В.Д. Кузнецова. - Таруса, ИЗМИРАН, 2011. – 192 с.
2. D.J. McComas, L.W. Acton, R.A. Mewaldt, M. Guhathakurta, W.S. Lewis. Solar Probe Plus: Report of the Science and Technology Definition Team, pre-publication version, 2008. – 167 p.
3. D.J. McComas, L.W. Acton, M. Balat-Pichelin, V. Bothmer, R.B. Dirling. Solar Probe Plus: Report of the Science and Technology Definition Team / National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center. – Greenbelt, Maryland, 2008. – 119 p.
4. Solar Probe Thermal Protection System Risk Mitigation Study: FY 2006 Final Report, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, Maryland, 2006. – 129 p.
5. G.I. Kerley. Equation of state and constitutive models for numerical simulations of dust impacts on the Solar Probe: Report on contract 949182 / Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory. – Laurel, Maryland, 2009. – 85 p.

6. Константинов М.С., Мин Тейн. Оптимизация траектории выведения космического аппарата на рабочую гелиоцентрическую орбиту // Электронный журнал «Труды МАИ», 2013, выпуск № 67: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41510>
7. Константинов М.С., Мин Тейн. Анализ одной схемы полета космического аппарата для исследования Солнца // Электронный журнал «Труды МАИ», 2013, выпуск № 71: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=46802>
8. E. Grün. Micrometeoroid data from the first two orbits of Helios 1, J. Geophys., 42, 1977. - pp. 717-726.
9. E. Grün. Galileo and Ulysses dust measurements: from Venus to Jupiter, Geoph. Res. Left., 19(12), 1992. – pp. 1311-1314.
10. N. Altobelli, E. Grün, and M. Landgraf. A new look into the Helios dust experiment data: presence of interstellar dust inside the Earth's orbit. Astronomy and Astrophysics, 448, 2006. – pp. 243–252.
11. J. Lasue, A. C. Levasseur-Regourd, N. Fray, and H. Cottin. Inferring the interplanetary dust properties from remote observations and simulations. Astronomy and Astrophysics, 473, 2007. – pp. 641–649.
12. H. Kimura and I. Mann. Brightness of the solar *F*-corona. Earth Planets Space, 50, 1998. – pp. 493–499.
13. I. Mann. Dust near the sun. Space Sci Rev, 110, 2004. - pp. 269–305.

14. C. Carrasco, D. Eng, K. Potocki, I. Mann. Preliminary dust-impact risk study for the “Solar Probe” spacecraft. *International Journal of Impact Engineering*, 33, 2006. – pp. 133–142.
15. H. Ishimoto. Collisional evolution and the resulting mass distribution of interplanetary dust. *Earth Planets Space*, 50, 1998. – pp. 521–529.
16. Модель космоса. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. Т. 2. / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. – М.: КДУ, 2007. – 1144 с.
17. E. Grün, P. Staubach, M. Baguhl, D. P. Hamilton, H. A. Zook. South–North and Radial Traverses through the Interplanetary Dust Cloud. *Icarus* 129, 1997. – pp. 270–288.
18. D. Nesvorn, P. Jenniskens, H.F. Levison, W.F. Bottke, D. Vokrouhlick and M. Gounelle. Cometary origin of the zodiacal cloud and carbonaceous micrometeorites implications for hot debris disks. *The Astrophysical Journal*, № 2, 2010. – pp. 816–836.
19. Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Константинов А.Б., Сагдеев Р.З., Сугак С.Г., Фортов В.Е. Физика разрушения при высокоскоростном ударе // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1984. Т. 39, № 1. С. 9-12.
20. Анисимов С.И., Демидов Б.А., Рудаков Л.И., Сагдеев Р.З., Фортов В.Е. Моделирование разрушения защитных экранов космического аппарата «Вега» с помощью сильноточных РЭП // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1985. Т. 41, № 11. – С. 455 - 457.

21. Агурейкин В.А., Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Карягин В.П., Константинов А.Б. и др. Теплофизические и газодинамические проблемы противометеоритной защиты космического аппарата «Вега» // Теплофизика высоких температур. 1984. Т. 22. № 5. С. 964-983.
22. Алифанов О.М., Иванов Н.А., Колесников В.А., Меднов А.Г. Определение температурных зависимостей теплофизических характеристик анизотропных материалов из решения обратной задачи // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16, № 5. С. 247-254.
23. Алифанов О.М., Черепанов В.В. Идентификация моделей, определение и прогноз свойств высокопористых теплозащитных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 4. С. 48-57.
24. Анисимов С.И., Карягин В.П., Ковтуненко В.М., Константинов А.Б. и др. Регистрация пылевых частиц в окрестности ядра кометы Галлея прибором «Фотон» // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 6. С. 860 – 866.
25. K.A. Iyer, D.S. Mehoke, R.C. Batra. Interplanetary Dust Particle Shielding Capability of Spacecraft Multilayer Insulation. Journal of spacecraft and rockets, Vol. 52, No. 2, 2015. pp. 584-594.
26. Вайсберг О.Л., Смирнов В.Н., Горн Л.С., Иовлев М.В. Массовый спектр и пространственное распределение пыли в голове кометы Галлея по данным прибора СП-1 на КА «Вега-1» и «Вега-2» // Космические исследования. 1987. Т. 25. № 6. С. 867 – 883.