

УДК 621.389

МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЛУННОЙ ПЫЛИ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2013 Н. Д. Сёмкин, А. С. Видманов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье приведены основные физические параметры лунной пыли, рассмотрены модели движения пыли над поверхностью Луны под действием факторов космической среды, дан обзор методов получения потоков пыли в лабораторных условиях.

Луна, лунный реголит, левитация пыли, ускоритель, инжектор заряженных частиц.

Введение

Малая сила тяжести (ускорение свободного падения) на Луне составляет $g=1,62 \text{ м/с}^2$ и практически полное отсутствие механизмов постоянной подпитки газовой оболочки Луны делает спутник Земли типичным безатмосферным телом. Суммарная плотность газовых частиц в лунной атмосфере в дневное время составляет менее 10^4 молекул/см³. Из-за отсутствия атмосферы лунная поверхность, в отличие от Земли, подвержена сильному воздействию солнечного ветра, космического излучения, ультрафиолетового излучения и других факторов космической среды. Подобные условия способствуют возникновению потоков заряженных пылевых частиц. К тому же деятельность человека или автоматических станций на лунной поверхности (посадка аппаратов, передвижение по поверхности) может привести к локальному подъёму частиц реголита. Заряженные частицы в условиях Луны обладают повышенными адгезионными способностями, что вносит свои ограничения в использование космических систем на её поверхности [1]. Предполагается, что эффективность адгезии лунной пыли к любой поверхности космических аппаратов зависит от угла падения солнечного света и времени лунного

дня. В ночное время эффективность адгезии лунной пыли снижается. В первую очередь, адгезия лунной пыли может ухудшить работу солнечных батарей, радиаторов системы терморегулирования и оптического оборудования лунных объектов. Механизмы вращения аппаратов будут подвергаться абразивному воздействию пыли. Электростатическая адгезия лунной пыли является серьёзной технологической и экологической проблемой для будущих лунных экспедиций. К тому же скорости движения некоторых частиц достигают 1 км/с, что приводит к возможности повреждения элементов систем при высокоскоростном ударе.

Ещё одним фактором, способным повлиять на работоспособность оборудования долговременных лунных миссий, является метеорный поток. При практическом отсутствии газовой оболочки Луны даже самые малые метеороидные частицы достигают её поверхности, вызывая интенсивную эрозию поверхностных слоёв. Средняя скорость падения на лунную поверхность частиц составляют 10 км/с [2]. Согласно оценкам разных авторов, общий поток падающих на Луну твёрдых тел составляет около $4 \times 10^{-16} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при учёте как микрометеороидов, так и крупных объектов [3].

Поэтому для прогнозирования поведения аппаратуры в условиях лунной экзосферы необходимо проводить лабораторные эксперименты по влиянию лунной пыли на материалы и сами аппараты.

Состав и свойства лунного реголита

Основным источником взвешенной заряженной пыли на Луне служит реголит, покрывающий всю поверхность со слоем от нескольких сантиметров до нескольких метров в районах лунных морей. Плотность материала реголита находится в диапазоне от 1,3 до 3,1 г/см². Химический состав реголита показан в табл. 1.

О дисперсном составе поверхностного слоя Луны можно судить по результатам, полученным при исследовании образцов, доставленных на Землю в результате миссий «Apollo» [4]. Гистограммы распределения частиц по размерам показаны на рис. 1.

Средний размер пыли – около 70 мкм, однако имеется фракция с размерами

ниже 1-3 мкм. Часть лунной пыли может иметь поверхности с низкой степенью окисления, обладающие высокой концентрацией свободных радикалов, что резко повышает их адгезию и токсичность в закрытых обитаемых лунных объектах.

Таблица 1. Химический состав реголита

Оксиды	Процентное соотношение, %
SiO ₂	46,67
TiO ₂	1,71
Al ₂ O ₃	15,79
Fe ₂ O ₃	12,5
FeO	8,17
MnO	0,19
MgO	9,39
CaO	9,9
Na ₂ O	2,83
K ₂ O	0,78
P ₂ O ₂	0,71
LOI	0,01

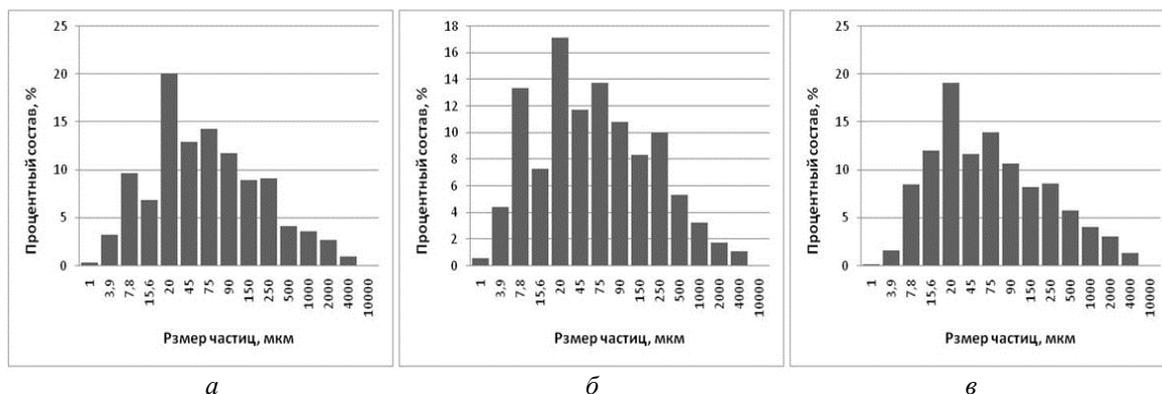


Рис. 1. Дисперсный состав реголита:
а – образец № 72440; б – образец №72460; в – образец №72500

Модели левитации частиц над поверхностью Луны

Данных о концентрации пыли над лунной поверхностью практически нет. Параметры распределения частиц по высотам, размерам, скоростям находятся из математических моделей, построенных с использованием известных параметров потоков электронов и ионов солнечного

ветра и распределения фотоэлектронов в приповерхностном слое.

С помощью измерений автоматических станций и аппаратуры миссий «Apollo» получены сведения о потенциале лунной поверхности («Lunar Prospector»), о параметрах солнечной плазмы, об интенсивности потоков микрочастиц на поверхности (LEAM эксперимент миссии «Apollo 17»). Данные о величине электро-

статического поля лунной поверхности были получены с помощью электронного рефлектометра, установленного на «Lunar Prospector». Потенциал поверхности в тени составляет примерно 100 В, при нахождении Луны в магнитном хвосте Земли потенциал увеличивается и составляет от -200 до -1 кВ. Максимальный зафиксированный потенциал ночной стороны лунной поверхности составил -4 кВ. Измерение потенциала освещённой стороны Луны электронным рефлектометром

затруднено из-за наличия большого числа фотоэлектронов, полученные значения потенциала составляют 5-10 В [5].

В ходе миссии «Apollo 17» на поверхности Луны устанавливался прибор, позволяющий фиксировать микрочастицы. Данные, полученные в ходе LEAM эксперимента, показаны на рис. 2. Как видно из графика, интенсивность потока частиц зависит от времени суток, ярко выраженные максимумы зафиксированы в моменты захода и восхода Солнца [6].

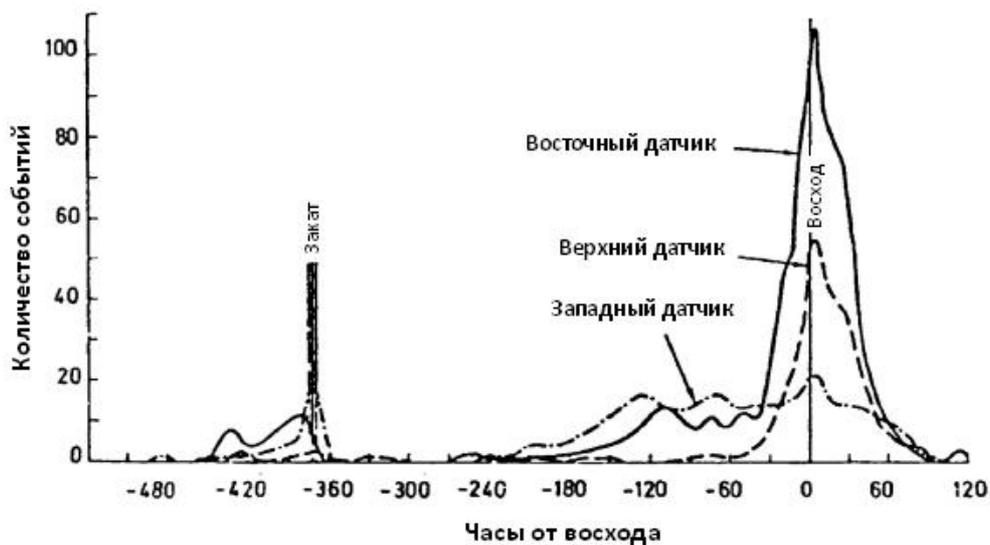


Рис. 2. Данные LEAM эксперимента

Некоторые особенности поведения лунной пыли при её взаимодействии с ионизирующим излучением, заряженными поверхностями и фотоэмиссионными электронами были определены в ряде лабораторных экспериментов [7, 8, 9]. В [7] показана возможность левитации пыли над поверхностью, находящейся под постоянным потенциалом. Эксперимент наглядно продемонстрировал «расползание» образца по графитовой пластинке, на которую подаётся потенциал $-40 \div -100$ В. В работе [8] частицы с размерами 125-150 мкм имитатора лунного реголита JCS-1 при контакте с металлической поверхностью с потенциалом -20 В заряжались до 106e. В эксперименте [9] исследован процесс заряда микрочастиц различных материалов (Zn, Cu, графит, JCS-1, JCS-Mars-

1) под воздействием ультрафиолетового излучения, созданного дуговой 1 кВ лампой. Средний заряд частиц составил $4,5 \times 10^4 e$. Полученные экспериментальные данные и данные измерений параметров лунной среды используются для построения моделей и оценки плазменно-пылевой обстановки на поверхности Луны.

Для описания процесса подъёма и переноса пыли в условиях лунной экзосферы разработано несколько математических моделей. В работах [10, 11, 12, 13] проводится анализ приповерхностной пылевой плазмы. В [10] определены условия подъёма частиц реголита. Расчёты проводились для проводящих микрочастиц. Концентрация фотоэлектронов оценивались исходя из того, что поверхность Луны и левитирующая частица покрыты мо-

нослоем водорода. При этом распределение электронов над поверхностью описывается распределением Максвелла:

$$f(v) = n_0 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \cos\theta, \quad (1)$$

где v – скорость движения электрона, m – масса электрона, $n_0 = 2 \cdot 10^8$ см⁻³; $kT = 0,1$ эВ; θ – угол между местной нормалью и направлением на Солнце (зенитный угол).

Заряд пыли определяется, исходя из условия равенства фотоэлектронного тока с поверхности частиц и тока электронов приповерхностной фотоэлектронной плазмы. Распределение электростатического потенциала в зависимости от высоты находится из решения системы уравнений Власова–Пуассона с заданной функцией распределения (1):

$$\varphi(z) = -\frac{2kT}{e} \ln(1 + Gz\sqrt{\cos\theta_0}), \quad (2)$$

где e – заряд электрона, z – высота над поверхностью Луны, θ_0 – угол падения солнечных лучей на поверхность, $G = \sqrt{2\pi n/kT}$.

В расчётах не учитывалось влияние электронов и ионов солнечного ветра, так как их поток более чем на порядок меньше потока фотоэлектронного слоя. Результатом работы является определение критического угла падения солнечного света, при котором возможна левитация частиц лунного реголита. Так, для частицы радиусом 0,1 мкм угол падения солнечного света составил 76, 14°.

В работе [11], исходя из тех же условий, решается уравнение динамики движения пылевой частицы. Рассчитанное время зарядки пылевой частицы позволяет считать заряд частицы постоянным для всей траектории движения. Построенные графики траектории движения пылинки носят периодический характер. Амплитуда и период колебания частицы слабо зависят от угла падения солнечного света на поверхность. Так, для периода колебания

1,9÷2,1 с амплитуда составляет 0,33÷0,51 м, средняя скорость движения частицы – 0,21÷0,325 м/с.

Пылевая система на освещённой части Луны рассмотрена в [12]. В отличие от предыдущих работ, в расчёте заряда пылинки учитываются токи потоков ионов и электронов солнечного ветра. Рассматриваются два варианта: поверхность Луны покрыта и не покрыта монослоем водорода. Для первого случая работа выхода фотоэмиссии составляет 9 эВ, для второго – 4 эВ.

Для нахождения концентрации фотоэлектронов и электрических полей решаются системы уравнений, состоящие из стационарного кинетического уравнения для функции распределения фотоэлектронов и уравнения Пуассона для электростатического потенциала с соответствующими граничными условиями, характеризующими поведение электронов у линии поверхности и на бесконечном удалении от неё.

Поведение пылевых частиц в приповерхностном слое описывается уравнениями, выражающими их динамику и зарядку, а также уравнением электростатического поля над поверхностью:

$$m_d \frac{d^2 z}{dt^2} = q_d E(z, \theta) - m_d g z; \quad (3)$$

$$\frac{dq_d}{dt} = I_e(q_d) + I_i(q_d) - I_{ph}(q_d) + I_{e,ph}(q_d); \quad (4)$$

$$E(z, \theta) = \frac{T_{e,ph}}{e} \frac{\sqrt{\cos\theta/2}}{\lambda_D + z\sqrt{\cos\theta/2}}. \quad (5)$$

Здесь z – высота подъёма частицы над поверхностью Луны, q_d – заряд пылевой частицы; m_d – масса пылевой частицы; $T_{e,ph}$ – температура фотоэлектронов; $\lambda_D = \sqrt{T_{e,ph}/4\pi n_0 e^2}$ – дебаевский радиус; $I_e(q_d)$, $I_i(q_d)$, $I_{ph}(q_d)$, $I_{e,ph}(q_d)$ – токи электронов солнечного ветра, ионов солнечного

ветра, фототок с частицы, ток фотоэлектронов на частицу, соответственно; g – ускорение свободного падения; e – элементарный заряд.

Зависимость концентрации фотоэлектронов и электрического поля $E(z, \theta)$ от зенитного угла θ обусловлена различием значений интенсивности потока поглощённого поверхностью солнечного излучения.

Зависимость концентрации частиц от высоты вычисляется по вероятности пребывания частицы на данной высоте. В свою очередь вероятность пребывания частицы на высоте пропорциональна времени нахождения частицы на этой высоте.

На рис. 3 для $\theta=77^\circ$ и 88° показаны зависимости концентрации частиц на различных высотах от радиуса частицы.

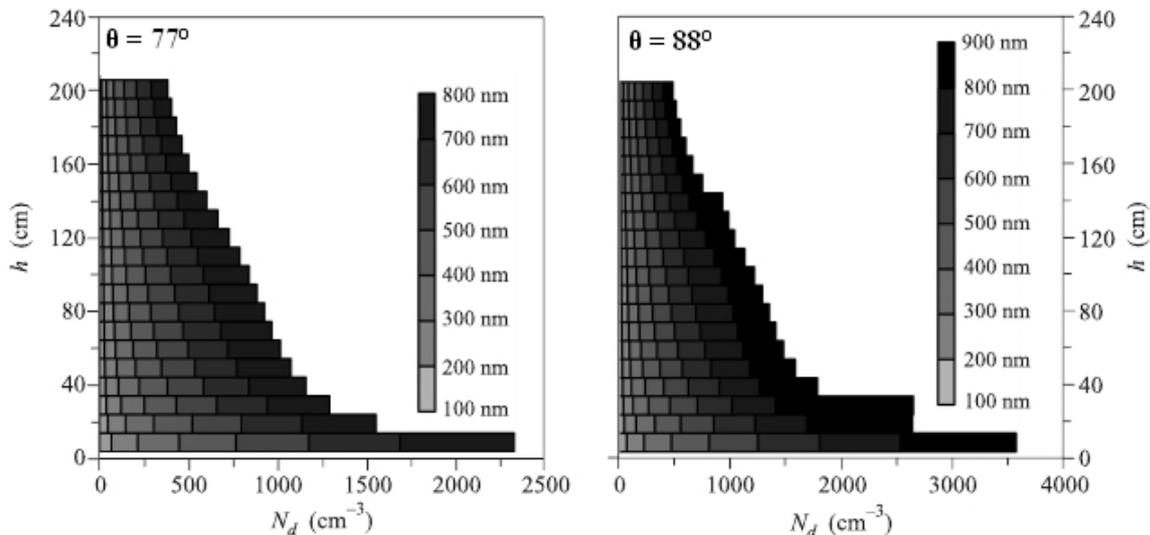


Рис. 3. Распределение пылевых частиц над лунной поверхностью для условий реголита без монослоя водорода

Зависимость максимальной высоты подъёма от угла θ , полученная из системы уравнений (3)-(5), показана на рис. 4 для поверхности, покрытой только реголитом, и для поверхности, покрытой реголитом с монослоем водорода. Как видно из представленных графиков, для частиц существует «мёртвая зона», в которой подъём частиц невозможен, что следует из решения системы уравнений (3)-(5). Наличие «мёртвой зоны» обусловлено тем, что при углах, меньших критического, подъёмная электростатическая сила меньше гравитационной из-за того, что заряд частицы компенсируется электронами фотоэлектронной оболочки. Однако концентрация фотоэлектронов значительно уменьшается

с расстоянием от поверхности. Поэтому подъём частицы посредством сторонних сил даже на 1 мм над поверхностью приводит к дальнейшему подъёму частицы под действием электростатической силы. Причиной отрыва пылинки от поверхности может служить нагрев частицы пыли солнечным излучением и её последующее охлаждение. В результате могут возникнуть силы, выталкивающие частицу из слоя реголита. Кроме того, подъём частицы за пределы слоя с большой концентрацией фотоэлектронов может происходить из-за неоднородностей поверхности Луны. Возможность подъёма частиц в «мёртвой зоне» на рис. 4 показана пунктирной линией.

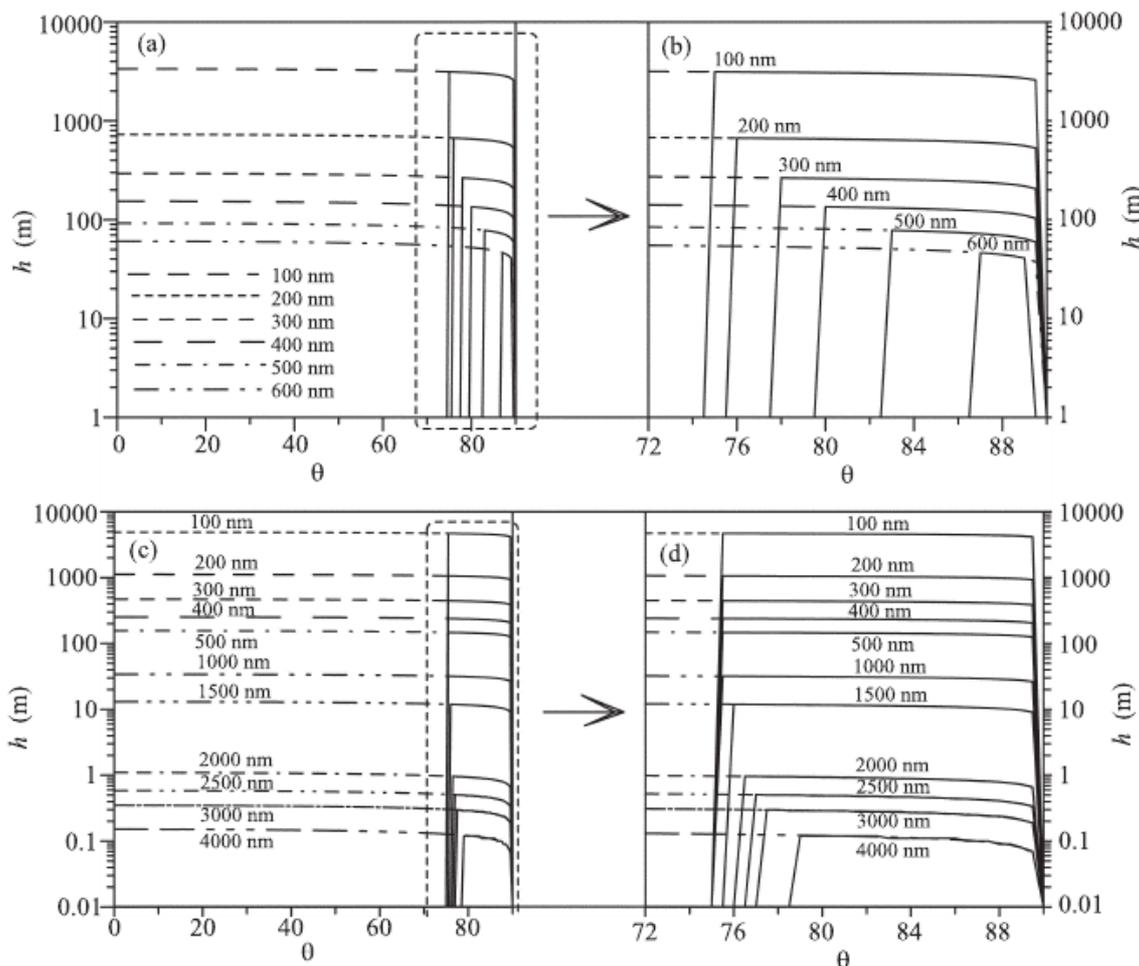


Рис. 4. Максимально возможные высоты подъема пылевых частиц над участками лунного реголита (а), (b) и над участками поверхности Луны, обогащённой водородом (с), (d), в зависимости от угла θ для разных размеров частиц

В модели, описанной в [13], частицы пыли взлетают с поверхности, ускоряются в приповерхностном электрическом поле и двигаются по баллистической траектории. Пыль взлетает с поверхности при условии выполнения неравенства:

$$F_q = F_g + F_c, \tag{6}$$

где F_q – электростатическая сила, F_g – сила гравитации, F_c – сила адгезии. Частица ускоряется в слое фотоэлектронов, высота которого равна радиусу Дебая. С увеличением расстояния от слоя фотоэлектронов начинает преобладать гравитационная сила, что приводит к оседанию частиц пыли на поверхность.

Напряжённость поля над поверхностью Луны при одномерном дебаевском экранировании равна:

$$E_s = \frac{\varphi_s}{\lambda_D}, \tag{7}$$

где φ_s – электрический потенциал поверхности.

Ускорение частицы, полученное при прохождении слоя фотоэлектронов, и максимальная высота подъёма определяются соответственно:

$$a_q = \frac{qE_s}{m_d} = \frac{3\varepsilon\varphi_s^2}{\rho\lambda_D r_d^2}; \tag{8}$$

$$Z_{max} = \frac{3\varepsilon\varphi_s^2}{\rho g r_d^2}; \tag{9}$$

где $q=4\pi\varepsilon_0 r_d \varphi_s$, ε_0 – диэлектрическая постоянная, ρ – плотность материала частицы, r_d – радиус частицы.

На рис. 5 показана зависимость высоты подъёма частиц от радиуса при различных зенитных углах θ .

В рассмотренной модели сделано несколько допущений: не учитываются

силы адгезии ($|F_q|+|F_g| \gg |F_c|$), не учитываются вторичные электроны, не рассматриваются горизонтальные электрические поля вблизи терминатора, не принимается в расчёт влияние заряженных частиц друг на друга. «Мёртвая зона», показанная на графике (рис. 4), возникает в области изменения потенциала поверхности освещённой ($\varphi_s > 0$) и неосвещённой части Луны ($\varphi_s < 0$), и в этой зоне значение величины потенциала близко к нулю.

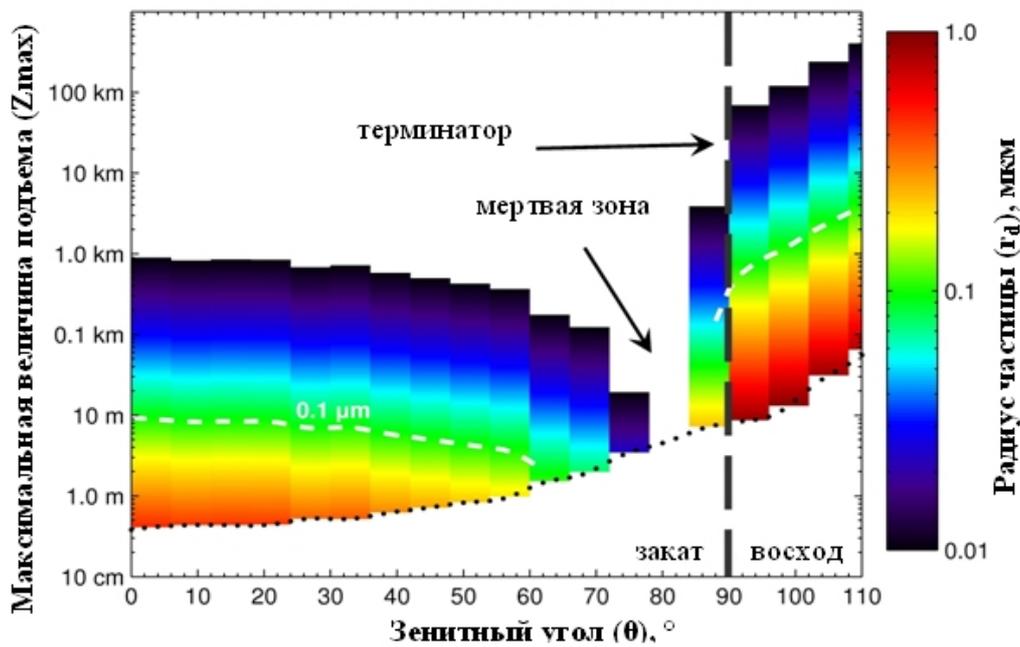


Рис. 5. Распределение частиц по высоте в зависимости от радиуса и зенитного угла

Механизм горизонтального транспорта пыли около терминатора описан в работе [14]. Основная идея заключается в том, что солнечное ультрафиолетовое излучение создаёт значительный положительный электрический потенциал на освещённой стороне кратера. Подобный потенциал возникает на поверхности миникратеров и возвышенностях, размеры которых во много раз меньше радиуса Дебая электронов фотослоя ($b \ll \lambda D$), и может достигать значений 10-20 В. Потенциал поверхности равен сумме общего потенциала и локального ($\varphi_s = \varphi_{общ.} + \varphi_{лок}$). Напряжённость необходимого

электрического поля для подъёма частицы пыли в области миникратера определяется из выражения:

$$qE_c = \frac{4\pi}{3} \rho r_d^3 g; \tag{10}$$

где $q \sim r_d^2 E_n$; $E_n = 100$ В/см – нормальный потенциал поверхности.

Авторы показали возможность подъёма частицы над поверхностью и движение в горизонтальном направлении. Уравнение движения, выведенное в [14], решалось численными методами для ча-

стицы с $rd = 0,1$ мкм. Было определено расстояние, на которое частица может пролететь в горизонтальном направлении. Оно составило 10 см за время 0,4 с, то есть средняя скорость частицы составила 0,25 м/с.

Другим немаловажным фактором подъёма реголита является деятельность людей [15]. По имеющимся оценкам, скорость частицы от удара ботинок о поверхность (при скорости ходьбы 1,8 м/с) может составить 3,6 м/с, а высота подъёма частицы может составлять около 4 м. Передвижение лунохода со скоростью 3,56 м/с создаёт поток частиц с максимальной скоростью 7,12 м/с, при этом максимальная дистанция пролёта частиц составляет около 31 м. Посадка и взлёт лунных модулей приводит к образованию локального пылевого облака.

По наблюдениям астронавтов миссий «Apollo 12» и «Apollo 14», высота такого облака составляла 37 м, и оценочно для подъёма на такую высоту начальная скорость частицы должна равняться 11 м/с. Диаметр облака пыли при такой начальной скорости движения может достигать 297 м. За время посадки на один квадратный метр оседает до 3×10^{11} частиц. По оценке экспертов, микрочастицы под действием реактивных струй посадочного двигателя лунного модуля могут разгоняться до скоростей порядка $0,3 \div 2$ км/с. Частицы с такими скоростями могут в значительной степени повлиять на работоспособность аппаратуры лунных миссий.

Описанные модели показывают возможность подъёма и переноса микропылинок над поверхностью Луны. В зависимости от высоты их размер может составлять от 0,01 мкм до 15 мкм. Высота подъёма составляет 100 км. У поверхности общая концентрация может достигать 4×10^3 см⁻³, на больших высотах – 500 см⁻³. Скорость движения частицы может быть порядка $10^{-1} \div 10^3$ м/с.

Генераторы заряженных пылевых частиц

Рассмотрим конструкции генераторов (инжекторов), которые применяются для получения потоков заряженных частиц пыли. Инжекторы частиц являются неотъемлемой частью ускорителей различных типов. Основной задачей инжектора является передача ускоряемой частице максимально возможного заряда, что позволяет получить большее приращение скорости в ускорительном тракте. Максимальный заряд частицы пропорционален максимальной напряжённости электрического поля у поверхности частицы. Для положительно заряженных частиц максимальная поверхностная напряжённость поля составляет 10^{10} В/м, для отрицательно заряженных частиц – 10^9 В/м. Дальнейшее увеличение заряда невозможно вследствие автоионной или автоэлектронной эмиссии.

По методу заряда частиц инжекторы можно разделить на контактные и бесконтактные.

В контактных инжекторах заряд микрочастиц осуществляется при непосредственном контакте микрочастицы с зарядным электродом. В бесконтактных инжекторах частицы приобретают заряд в результате воздействия на них ионизирующего излучения.

Инжектор частиц бесконтактного типа описан в [16,17], а его конструкция приведена на рис. 6.

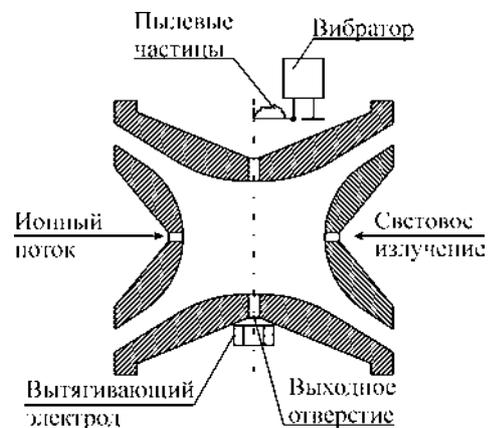


Рис. 6. Конструкция инжектора бесконтактного типа

Под действием вибраций пылевые частицы покидают бункерную камеру и под действием силы тяжести поступают в зарядную камеру. Вследствие действия ионизирующего излучения они приобретают некоторый заряд и после этого через выходное отверстие поступают в ускорительный тракт.

Специальные электроды обеспечивают удержание частиц гиперболическим полем в точке действия ионизирующих излучений. За выходным отверстием устанавливается вытягивающий электрод, который создаёт электрическое поле, способное вытянуть из инжектора заряженную частицу. Получение частицей максимального заряда занимает один час. В процессе зарядки автоионная эмиссия сглаживает все неровности частицы, что позволяет сообщить ей максимально возможный заряд. Вследствие достаточно продолжительного времени заряда бесконтактные инжекторы не получили широкого распространения.

Генераторы твёрдых заряженных частиц контактного типа в своей конструкции содержат бункерную камеру, бункерный электрод, зарядную камеру и зарядный электрод. Типовая конструкция инжектора контактного типа, описанного в [16], приведена на рис. 7.

В этом инжекторе частицы, помещённые в бункерную камеру, вытягиваются из неё с помощью электрического поля, создаваемого импульсным напряжением на бункерном электроде. Частицы покидают инжектор, как только коснутся острия зарядного электрода. При диаметре острия 4 мкм и потенциале 8 кВ частицы диаметром 0,1 – 10 мкм получают заряд, соответствующий поверхностной напряжённости электрического поля $6,5 \times 10^9 - 10^9$ В/м. Данный тип инжектора способен генерировать поток заряженных частиц с широким статистическим распределением масс и скоростей.

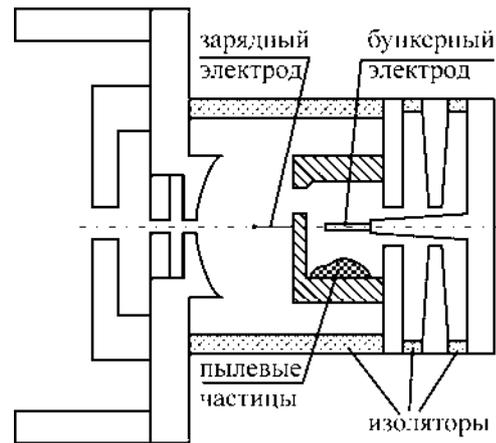


Рис. 7. Конструкция инжектора контактного типа

Конструкции инжекторов, описанные в [17, 18], показаны на рис. 8, 9. В отличие от предыдущего генератора твёрдых пылевых частиц на бункерный электрод инжекторов подаётся постоянное напряжение. С помощью добавления в конструкцию промежуточной камеры решается проблема загрязнения тракта ускорителя. Эти два инжектора функционируют схожим образом. При подаче высокого напряжения на бункерный электрод частицы микропорошка приходят в движение под действием электрического поля. В результате хаотического движения частиц в бункерной камере через соединительную втулку происходит выброс частиц в полость зарядной камеры, образованной левой и правой полусферами и зарядным электродом. В зарядной камере частицы микропорошка продолжают своё хаотическое движение, пока не коснутся острия иглы. При соприкосновении частицы с иглой ей сообщается заряд, и под действием электрического поля частица покидает зарядную камеру через выходное отверстие. Особенностью инжектора, показанного на рис. 8, является наличие высокоомного резистора, который соединяет бункерный электрод с корпусом (заземлённым контактом). Это приводит к уменьшению потенциала бункерного электрода при увеличении концентрации частиц в бункерной камере, что в свою очередь приводит к уменьшению потока частиц на выходе инжектора.

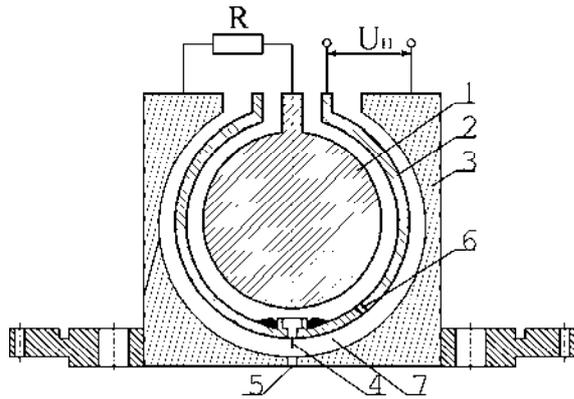


Рис. 8. Конструкция инжектора заряженных частиц с постоянным напряжением на бункерном электроде:
 1 – бункерный электрод, 2 – зарядный электрод,
 3 – корпус, 4 – игла, 5 – выходное отверстие,
 6 – отверстие между бункерной и зарядной камерами, 7 – зарядная камера

Особенностью генератора твёрдых пылевых частиц, показанного на рис. 9, является наличие двух бункерных камер. Это позволяет использовать одновременно два образца пыли. Частицы алюминиевой пудры «ПАП-1» с помощью данного инжектора приобретали скорость от 200 м/с до 1550 м/с (соответственно для диапазона масс $9 \times 10^{-10} \div 1,1 \times 10^{-8}$ г или диапазона диаметров 1–3 мкм). Заряд частиц соответствовал диапазону поверхностной напряжённости электрического поля частицы $10^9 \div 7,5 \times 10^9$ В/м. Наиболее вероятная поверхностная напряжённость электрического поля частицы составила 2×10^9 В/м.

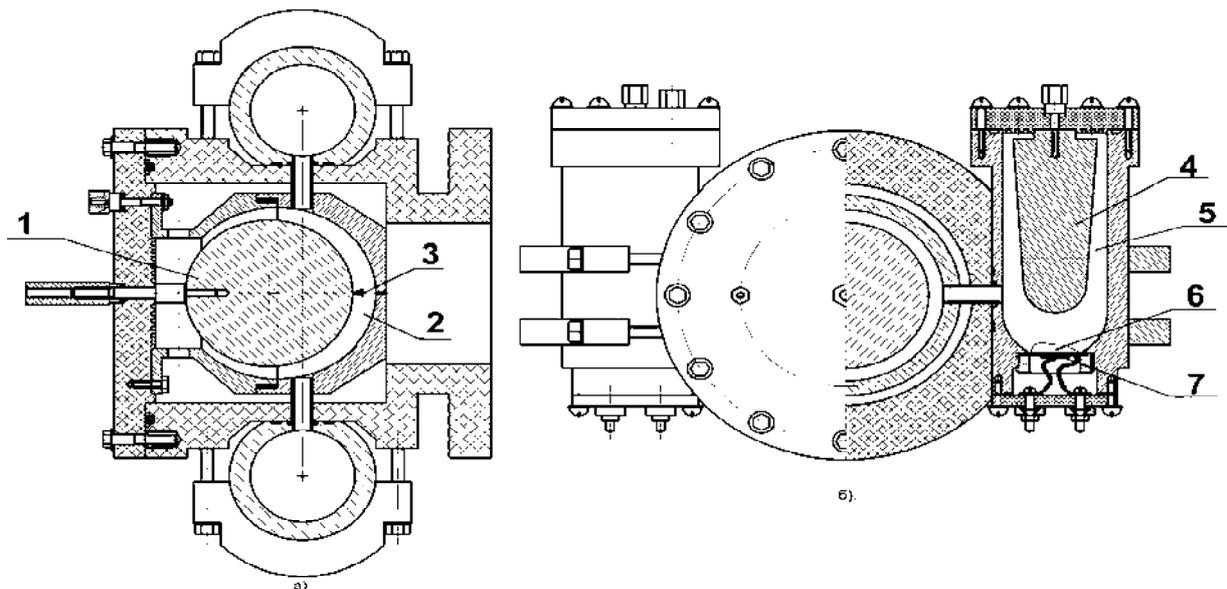


Рис. 9. Конструкция инжектора с двумя бункерными электродами:
 1 – зарядный электрод, 2 – зарядная камера, 3 – игла или «метёлка»,
 4 – бункерный электрод, 5 – бункерная камера, 6 – микропорошок,
 7 – пьезоизлучатель

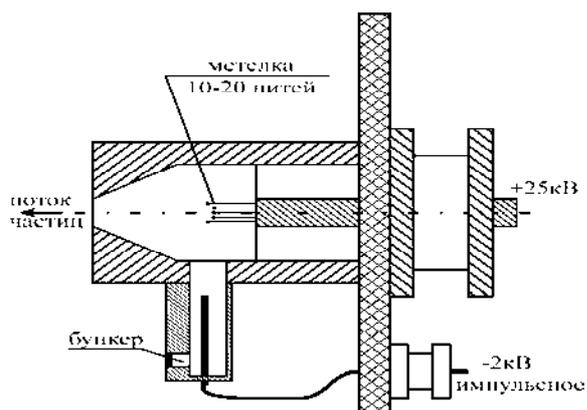


Рис. 10. Конструкция инжектора контактного типа

Одним из путей уменьшения вероятности загрязнения камеры ускорителя пылевыми частицами является конструкция инжектора (рис. 10), описанная в [19].

В данной конструкции бункерная камера конструктивно выполнена в нижней части зарядной, что делает возможным проникновение в область зарядной камеры числа частиц, пропорционального импульсу напряжения на бункерном электроде. Как отмечается в [19], частицы диаметром 1^{-10} мкм на выходе инжектора имеют скорость до 3 км/с.

Конструкция инжектора, позволяющая создать поток частиц со значительно большей средней скоростью, чем у описанных ранее инжекторов, показана на рис. 11 [20].

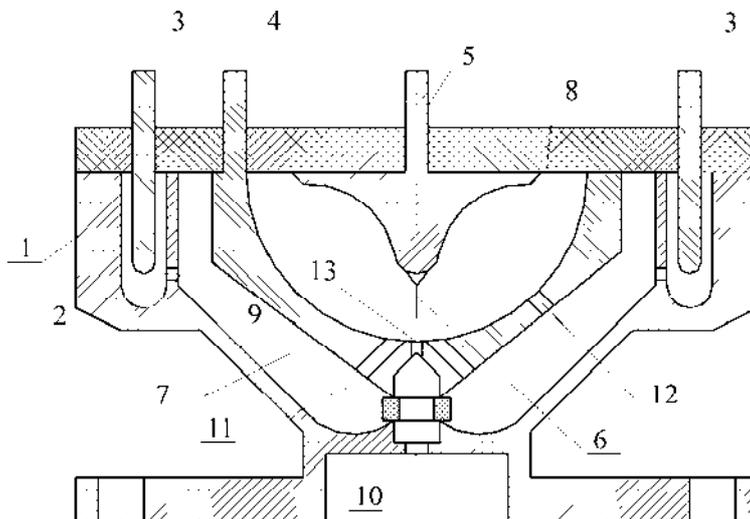


Рис. 11. Конструкция инжектора:

1 – корпус; 2 – бункерная камера; 3 – бункерный электрод; 4 – промежуточный электрод; 5 – зарядный электрод; 6 – игла; 7 – промежуточная камера; 8 – зарядная камера; 9, 10, 11, 12, 13 – отверстия

Устройство работает следующим образом. Пылевые частицы находятся в бункерной камере 2, которая соединена через отверстие 9 с объёмом промежуточной камеры 7, образованной корпусом 1, промежуточным электродом 4. В общем случае таких бункерных камер в источнике заряженных пылевых частиц может быть несколько – каждая для своего сорта пылевых частиц. При подаче напряжения на бункерный электрод 3 пылевые части-

цы начинают через отверстия 9 поступать в промежуточную камеру 7, где, двигаясь по силовым линиям электрического поля, через отверстия 11 попадают в область зарядного электрода 5 и иглы 6 зарядной камеры 8. Если пылевая частица после зарядки не попала в выходное отверстие 13 или если не коснулась иглы 6, то она смещается в зону слабого поля в районе отверстий 12, через которые она попадает обратно в промежуточную камеру 7. Че-

рез отверстие 10 микрочастицы поступают в тракт ускорителя.

Генератор, описанный в [21], разработан в Калифорнийском институте лунных исследований (США) для 3МВ ускорителя. Конструкция инжектора показана на рис. 12. Инжектор функционирует следующим образом. На зарядный электрод (вольфрамовая игла) подаётся постоянное напряжение, в то время как на бункерный электрод подаётся импульсное напряжение. Под действием переменного электрического поля частицы начинают хаотически двигаться. После соприкосновения с иглой частица ускоряется и, пройдя коллиматор, попадает в ускорительный тракт. С помощью данного инжектора можно получать заряженные частицы с радиусами не более 200 мкм и максимальной плотностью заряда 13,4 кулон/кг, что соответствует 4×10^9 В/м напряжённости поля для металлической частицы диаметром 1 мкм.

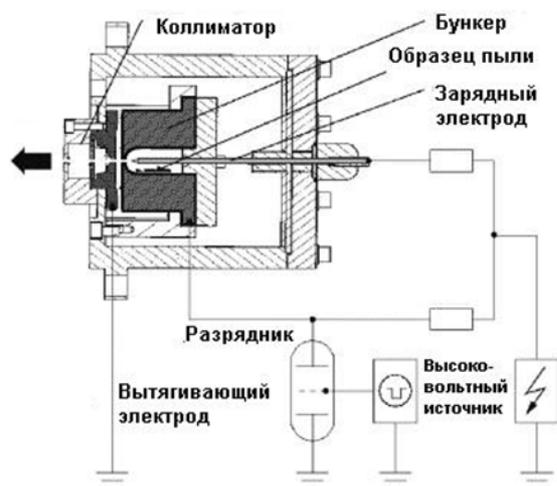


Рис. 12. Инжектор заряженных пылевых частиц

Описанные инжекторы способны создавать потоки заряженных частиц до 1000 частиц/с. Ускорители микрочастиц, в состав которых входят данные инжекторы, разгоняют частицы до скоростей более 1,5 км/с, что вполне перекрывает диапазон скоростей частиц лунной пыли.

Направлением усовершенствования инжекторов может служить повышение плотности потока пыли и улучшение эксплуатационных характеристик (уменьшение загрязнения тракта ускорителя, увеличение времени работы без развакуумирования системы, повышение уровня заряда частицы и т. д.).

Заключение

Рассмотрены физические свойства лунной пыли, и показан ряд моделей движения частиц над поверхностью Луны. Моделирование динамики подъема и движения микрочастиц показывает возможность существования над Луной низкоскоростной пылевой плазмы. Рассмотрены конструкции существующих генераторов твёрдых заряженных частиц. Показано, что подобные инжекторы можно применять для моделирования воздействия лунной пыли на материалы и конструкции космических аппаратов. Необходимо увеличить поток частиц, создаваемый инжекторами, и улучшить эксплуатационные характеристики генераторов заряженных пылевых частиц.

Библиографический список

1. Walton, O.R. Adhesion of Lunar Dust [Text] / O.R. Walton // Scientific report of NASA CR-2007-214685. – 2007. – 48 p.
2. Zook, H.A. The state of meteoritic material on the Moon [Text] / H.A. Zook // Processing of the Lunar Science Conference – 1975. – V. 6. – P. 1653-1672.
3. Шевченко, В.В. Современная селенология [Текст] / В.В Шевченко. – М.: Наука, 1980. – 288 с.
4. Graf, J.C. Lunar Soils Grain Size Catalog [Text] / J.C. Graf // NASA Reference Publication 1265. – 1993. – P. 466.
5. Halekas, J.S. Lunar Prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents [Text] / J.S. Halekas, G.T. Delory, R.P. Lin, T.J. Stubbs, W.M. Farrell // Journal of Geophysical Research – 2008. – V.113. – P. 202-209.

6. Stubbs, T.J. Impact of Dust on Lunar Exploration [Text] / T.J. Stubbs, R.R. Vondrak, W.M. Farrell // Workshop on Dust in Planetary Systems. – 2005. – P. 239-243.
7. Lunar Dust Levitation [Text] / E. C. Joshua, R. R. Scott, H. Mahdall [et al] // Journal of Aerospace Engineering. – 2009. – V. 29. – P. 2-9.
8. Contact charging of lunar and Martian dust stimulants [Text] / Z. Sternovsky, S. Robertson, A. Sickafoose, J. Colwell, M. Horányi // Journal of Geophysical Research: Planets – 2002. – V. 107. – P. 15-1 – 15-8.
9. Experimental investigations on photoelectric and triboelectric charging of dust [Text] / A. A. Sickafoose, J. E. Colwell, M. Horányi, S. Robertson // Journal of Geophysical Research. – 2001. – V. 106. – P. 8343-8356.
10. Колесников, Е.К. Условия электростатической левитации микрочастиц лунного реголита [Текст] / Е.К. Колесников, А. Б. Яковлев // *Астрономический вестник*. – 1997. – Т. 31. – №1. – С. 70-71.
11. Яковлев, А. Б. Динамика левитирующих микрочастиц лунного реголита [Текст] / А. Б. Яковлев // *Астрономический вестник*. – 1998. – Т. 22. – №4. – С. 398-400.
12. Голубь, А.П. Плазменно-пылевая система в приповерхностном слое освещенной части Луны [Текст] / А.П. Голубь, Г.Г. Дольников, А.В. Захаров // *Письма в ЖЭТФ*. – 2012. – Т. 93. – №4. – С. 198-204.
13. Stubbs, T.J. A Dynamic Fountain Model for Lunar Dust [Text] / T.J. Stubbs, R.R. Vondrak, W.M. Farrell // *Advances and Space Research*. – 2005. – V. 37. – P. 59-66.
14. Borisov, N. Charging and motion of dust grains near the terminator of the moon [Text] / N. Borisov, U. Mall // *Planetary and Space Science*. – 2006. – V. 54. – P. 572-580.
15. Katzan, C.M. Lunar Dust Transport and Potential Interactions With Power System Components [Text] / C.M. Katzan, J.L. Edwards // *NASA Contractor Report 4404*. – 1991. – P. 42.
16. Fechtig, H. Laboratory simulation [Text] / H. Fechtig, E. Grun, J. Kissel // *Institute für Kernphysik, Heidelberg 1, FRG*. – 1989. – V. 96. – P.594-601.
17. Акишин, А.И. Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов [Текст] / А.И. Акишин, Л.С. Новиков. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. – 90 с.
18. Инжектор заряженных пылевых частиц [Текст] / Н.Д. Семкин, А.В. Пияков, К.Е. Воронов, Н.Л. Богоявленский, С.М. Шепелев // *Приборы и техника эксперимента*. – 2006. – №3. – С. 154-159.
19. Wang, Z. Hypervelocity dust beam injection for national spherical torus experiment [Text] / Z. Wang, G. A Wurden // *Review of Scientific Instruments*. – 2004. – V. 75. – P. 3436–3438.
20. Пат. 2242849 Российская Федерация, МПК⁷H05H5/02 Источник заряженных пылевых частиц [Текст] / Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов, Л.С. Новиков, А.С. Пияков; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. – № 20003100867/06; заявл. 10.01.2002; опубл. 10.08.2004, Бюл. № 21. – 3 с.
21. Stübig, M. Laboratory simulation improvements for hypervelocity micrometeorite impacts with a new dust particle source [Text] / M. Stübig, G. Schäfer, Ho Tra-Mi // *Planetary and Space Science*. – 2001. – V. 49. – P. 853–858.

MODELS OF LUNAR DUST MOTION DYNAMICS AND METHODS OF PRODUCING STREAMS OF CHARGED DUST PARTICLES IN A LABORATORY ENVIRONMENT

© 2013 N. D. Syomkin., A. S. Vidmanov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The article presents basic physical parameters of lunar dust, models of its motion over the surface of the moon under the influence of space environment factors and a review of methods for obtaining dust streams in a laboratory environment.

Moon, lunar regolith, dust levitation, accelerator, injector of charged particles.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Видманов Алексей Сергеевич, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: jkt13@rambler.ru. Область научных интересов: ускорительная техника, космическое приборостроение.

Syomkin Nikolay Danilovich, doctor of technical science, professor, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: semkin@ssau.ru. Area of research: high-speed impact, mass spectrometry, space device engineering.

Vidmanov Aleksei Sergeevich, postgraduate student, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: jkt13@rambler.ru. Area of research: accelerator technology, space device engineering.