

## **Раздел 4. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

### **4.1 Методы детектирования межпланетных пылевых частиц**

1) Получены экспериментальные данные, подтверждающие работоспособность методов детектирования межпланетной пыли с помощью солнечных панелей космических аппаратов. Опыты проводились с помощью небольшого фрагмента ( $\sim 200 \text{ см}^2$ ) солнечной панели с приклеенными к его поверхности пьезоэлектрическими датчиками для регистрации механического импульса, подключаемых напрямую или через усилитель к осциллографу. На разные участки этой поверхности с высоты 10 см производилось сбрасывание одиночных сферических металлических частиц, при свободном падении приобретающих импульсы, предположительно, входящие в диапазон значений, характерных для межпланетной космической пыли субмикронного размера. Было показано, в частности, что сигнал от частицы размером 0,2 мм может быть зарегистрирован даже в отсутствие усиления, а использование системы регистрации из 3 датчиков позволяет при известной скорости распространения акустических волн в материале с хорошей точностью рассчитывать место попадания частицы в солнечную панель. Эти данные указывают на возможность использования метода для оценки одиночных или суммарных импульсов частиц, встречающихся на пути движения космического аппарата, а также для определения потоков таких частиц.

Метод позволяет производить наблюдения за межпланетной и орбитальной пылью с апертурой детектора более  $1 \text{ м}^2$ , достигаемой за счет использования элементов конструкции аппарата (солнечных панелей), т. е. при минимальных массовых потребностях (масса одного пьезодатчика не превышает 10 г). Также с помощью таких датчиков возможно наблюдать степень сохранности солнечной панели основываясь на регистрации частоты колебаний панели.

2) Разработан и проверен метод детектирования заряженных пылевых частиц при помощи геометрического форм-фактора, соответствующего цилиндру Фарадея. Предполагается, что такая конструкция датчика позволит улучшить чувствительность прибора при регистрации дрейфующих в приповерхностной экзосфере частиц в безатмосферных условиях.

Для регистрации частиц с помощью электрода цилиндра была выбрана схема регистрации с помощью зарядочувствительного усилителя.

Для подтверждения работоспособности такой датчик был установлен в вакуумную камеру с инжектором пылевых частиц. При проверке использовались частицы вольфрама диаметром 30 мкм. При попадании таких частиц в электрод датчика регистрировался сигнал со значительным превышением над уровнем шума, что подтверждает работоспособность метода.

### **4.2 Изучение особенностей и характеристик лабораторной установки при моделировании потока пылевых частиц и физических свойств аналогов межпланетной пыли**

1) Эксперименты с адсорбцией пыли

Опыты проводились с целью уточнения размерных характеристик образцов частиц, которые использовались при функциональных испытаниях и калибровке пьезодатчиков, а также с целью изучения особенностей поведения этих частиц в аэродинамическом потоке, создаваемом в испытательной установке.

В ходе эксперимента производился сбор частиц, налетающих в потоке на специально подготовленную клейкую поверхность, с последующим визуальным и компьютерным анализом картины адсорбированных частиц.

Использовались пробы частиц песка и андезита одинакового размерного диапазона 100-150 мкм, взятыми в количестве 0,1 и 1 г из сыпучих образцов, приготовленных мелкодисперсным дроблением с последующим размерным фракционированием с помощью вибрационной просеивающей машины Retsch AS 200 basic. Каждая из таких проб высыпалась через воронку за время  $\sim 1 \text{ с}$  в аэротрубу после установления в ней

стационарного состояния потока со скоростью  $\sim 4,5$  м/с в области центральной продольной оси рабочей области трубы.

Результаты эксперимента позволили скорректировать представления о картине движения частиц после вбрасывания их в потоки оценить распределение этих частиц по размерам, что важно для правильной интерпретации результатов, получаемых при проведении калибровки и функциональных испытаний пылеударных детекторов в аэродинамической трубе.

#### 2) Детектирование траекторий пылевых частиц в ветровых потоках

С целью наблюдения за траекториями пылевых частиц в аэродинамической установке и оценки их скоростей была создана система оптической регистрации, которая включает в себя блок подсветки частиц стробированным лазерным излучением и оптическую камеру, производящую видеосъемку со скоростью 100 кадров в секунду. С помощью данной системы были получены данные о характере потока пылевых частиц в аэродинамической установке, которые также необходимы при испытаниях пылеударных детекторов.

#### 3) Изучение и оценка морфологии аналогов лунного грунта

Для понимания морфологических свойств используемых в экспериментальной работе пылевых частиц и их аналогов была проведена работа совместно с ОИВТ РАН по получению изображений этих частиц с помощью электронного микроскопа.

В результате анализа изображений была составлена параметрическая модель для описания частиц по их сферичности, округлости и форме, которая может быть использована при интерпретации различий в результатах опытов с использованием отличающихся образцов пыли.

### 4.3 Метод оценки запыленности поверхностей КА

Предложен оптический метод оценки запыленности поверхностей КА. При этом происходит измерение отраженного от пылевого слоя света, излученного прибором. В настоящее время существует ряд решений формата System-On-a-Chip, позволяющих компактно размещать источник и приемник излучения. Такой метод был создан и проверен при различных условиях запыленности (как и при различных условиях внешней засветки). По результатам исследований сделан вывод о том, что при помощи подобных компактных систем на технологическом уровне можно контролировать покрытие слоем пыли поверхностей космических аппаратов.

### 4.4. Анализ процессов на поверхности реголита Луны и других безатмосферных тел, при которых под действием УФ солнечного излучения может происходить отрыв и левитация пылевых частиц

Наиболее вероятной причиной левитации пылевых частиц над освещенной поверхностью безвоздушных тел является электростатический механизм. Однако есть две существенные проблемы, возникающие при объяснении этого эффекта. Первая из них связана с вопросом о том, как большой электрический заряд (несколько единиц или даже десятков элементарных зарядов  $e^-$ ), необходимый для левитации в поле двойного электрического слоя, может накапливаться на пылинке, лежащей на поверхности. Вторая проблема связана с выяснением природы силы, которая отрывает частицу пыли от поверхности, преодолевая адгезионную силу Ван-дер-Ваальса. Анализ этих проблем показал, что плотность заряда, возникающая на освещенной поверхности в результате фотоэффекта, очень мала только при усреднении по областям макроскопического размера. В субмикронном масштабе поверхность представляет собой совокупность хаотических «зарядовых пятен», имеющих положительный или отрицательный заряды. Эти пятна возникают из-за флуктуаций потоков фотоэлектронов, вылетающих и падающих обратно на поверхность, а модуль плотности заряда внутри этих пятен в миллионы раз превышает значение плотности заряда, усредненное по макроскопическим областям. Число положительно заряженных пятен ненамного превышает число отрицательно заряженных пятен, что объясняет малость средней плотности заряда. Локальная плотность заряда внутри пятен достаточна для того, чтобы частицы размером около 0,1 мкм или менее

получили заряд, достаточный для их левитации в двойном электрическом слое на высоте около 1 мкм или более, где напряженность поля двойного слоя находится на уровне порядка  $10 \text{ Вм}^{-1}$ . Электростатическое поле непосредственно над центром пятна заряда пропорционально локальной, а не средней плотности заряда и, по-видимому, на несколько порядков больше. Следовательно, сила, действующая на пылинку, лежащую внутри пятна заряда непосредственно на поверхности, пропорциональна квадрату локальной плотности заряда, и ее величина может достигать десятых долей пиконьютона, что, вероятно, достаточно для частицы, чтобы преодолеть силу адгезии Ван-дер-Ваальса и совершить взлет.

Результаты проведенного анализа опубликованы в журнале *Icarus*.