

Т.С. Бакиров, В.М. Генералов

Пробоотборник «Ловушка» для частиц биогенного происхождения в космосе

НИИ аэриобиологии ГНЦ ВБ «Вектор», пос. Кольцово, Новосибирская обл.

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

Описан пробоотборник для частиц биогенного происхождения (осуществляющего отбор частиц с плавным торможением до малых скоростей) в верхних слоях атмосферы и космическом пространстве. Столкновение частиц биогенной природы со стенкой обычного пробоотборника может разрушить их. Следовательно, прежде чем захватить биочастицы, их необходимо замедлить. Пробоотборник сформирован в системе высокочастотных резонаторов ускорителя нейтральных частиц, которые используются для замедления биологических частиц. Разработка основана на экспериментальном материале поведения биологических частиц (бактерий, клеток, вирусов) в высокочастотном переменном электромагнитном поле.

Введение

Проблема пробоотбора частиц биогенного происхождения с помощью космических аппаратов усложняется необходимостью плавного торможения этих частиц с целью сохранения их жизнеспособности. Соударение частиц с жесткой стенкой недопустимо, так как это может привести к полному или частичному разрушению частиц.

В настоящей статье рассматриваются устройство для отбора биочастиц в открытом космосе и некоторые аспекты его эксплуатации на борту международной космической станции (МКС).

Перечисленные проблемы могут быть решены с помощью ускорителя нейтральных частиц [1 – 4, 6], работающего в режиме торможения. Такой режим работы ускорителя позволит уменьшить кинетическую энергию налетающей частицы до энергии, близкой к тепловой. Ускоритель нейтральных частиц может быть реализован на основе последовательно установленных резонаторов, в которых возбуждается стоячая электромагнитная волна. В полости каждого резонатора формируются электрический компонент напряженности поля E_x , направленный перпендикулярно оси движения резонатора, и магнитный компонент B_y . Зависимость амплитуды этих полей от времени выражается следующими соотношениями:

$$E_x = E_0 \sin \omega t; \quad B_y = B_0 \cos \omega t. \quad (1)$$

Частица, попавшая в полость резонатора, поляризуется под действием высокочастотного электрического поля. При взаимодействии с электрическим компонентом напряженности поля E_x в частице наводится дипольный момент

$$d_x = \alpha \epsilon_0 E_x = \alpha \epsilon_0 E_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

где α – коэффициент поляризуемости частицы [5]; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Изменение напряженности электрического поля во времени приводит к возникновению поляризационного тока в частице

$$j_x = \frac{1}{l} \frac{dd_x}{dt} = \frac{1}{l} \alpha \epsilon_0 \omega E_0 \cos \omega t. \quad (3)$$

Поляризационный ток взаимодействует с магнитным полем резонатора и это приводит к возникновению тормозящей силы F_z , действующей на частицу со стороны магнитного поля:

$$F_z = j_x B_y l = \alpha \epsilon_0 \omega E_0 B_0 \cos^2 \omega t, \quad (4)$$

где l – длина частицы.

Среднее значение ускорения направлено навстречу частицам и не зависит от знака заряда:

$$a_z = \frac{F_z}{m} = \frac{\alpha \epsilon_0 \omega E_0 B_0}{2m}. \quad (5)$$

Пусть, например, $\alpha = 10^{-18} \text{ м}^3$, $E_0 = 10^6 \text{ В/м}$, $B_0 = 10^{-2} \text{ Тл}$, $m = 10^{-23} \text{ кг}$, $\omega = 10^9$. Подставив эти значения в (5), получим $a_z = 5 \cdot 10^7 \text{ м/с}^2$.

При таком ускорении частица, летящая со скоростью 8 км/с, затормозится на расстоянии 1 м до малой скорости, при которой она притянется к высоковольтным электродам, не испытав разрушительного удара о подложку.

В условиях космического вакуума с помощью ускорителя нейтральных частиц с высокими значениями напряженности высокочастотного электромагнитного поля в предлагаемом ускорителе нейтральных частиц реально добиться ускорения частиц $a = 5 \cdot 10^7 \text{ м/с}^2$. При таких значениях ускорения не происходит разрушения у частиц размерами меньше $10^{-10} \times 10^{-10} \times 10^{-6} \text{ м}$. Такой размер является предположительно характерным для частиц биогенного происхождения в космосе (например, фрагменты молекул ДНК и РНК).

Биочастицы размером меньше 10^{-9} м будут тормозиться за счет вязкого трения в атмосфере остаточного газа в полости «Ловушки». Плотность остаточного газа в ловушке будет превышать плотность газа в окружающем пространстве за счет скоростного давления набегающего потока и низкой температуры пробоотборника и составит $10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$

Полный поблочный состав аппаратуры «Ловушка»

В «Ловушку» входят:

1. Источник питания, состоящий из преобразователя высоковольтного постоянного напряжения $U = 1$ кВ с мощностью 1 Вт и генератора переменного тока напряжением 2 кВ с мощностью в непрерывном режиме 600 Вт.
2. Резонатор, включающий в себя две пластины конденсатора и соленоид.
3. Два съемных пробоотборных коллектора (верхний и нижний).
4. Блок управления и измеритель тока на высоковольтных преципитаторах.

Краткое описание, габаритные размеры, масса каждого блока и обоснование необходимого энергопотребления аппаратуры

1. Источник питания предназначен для преобразования постоянного электрического тока от бортовой энергосистемы около 40 А с напряжением 23–32 В (потребляемая мощность 800–900 Вт) в постоянное напряжение 1–2 кВ с током 1–2 мкА, а также в переменное напряжение 1–2 кВ с током 0,8 – 0,4 А. Источник собран на высокочастотных транзисторах, трансформаторе и высоковольтных диодах. Масса источника около 1 кг. Габариты 100 × 100 × 100 мм.

2. Резонатор схематически представлен на рис. 1. Габаритные размеры вместе со съемными коллекторами – 300 × 550 × 1150 мм. Резонатор соединяется с высокочастотным выводом источника питания. Благодаря высокой добротности резонатора ($Q = 600$) на пластинах конденсатора развивается напряжение 100 кВ. Размеры пластин конденсатора $S = 500 \times 900$ мм. Расстояние между пластинами конденсатора $d = 100$ мм. Емкость конденсатора $C = \epsilon_0 S/d = 8 \cdot 10^{-11}$ Ф. Энергия резонатора, запасенная в электрическом и магнитном полях, $W = C U^2/2 = V_c \cdot B^2/2m_0 = 0,4$ Дж. Индуктивность соленоида $L = 3 \cdot 10^{-4}$ Гн. Количество витков 50. Поперечные размеры соленоида 200 × 1000 мм. Длина соленоида 500 мм. Длина намотки 120 м. Поперечное сечение проводника 8 мм². Активное сопротивление соленоида 0,25 Ом. Масса обмотки 8,5 кг, если она изготовлена из меди. Если изготовить соленоид из алюминия, то сечение проводника должно быть 13 мм², а масса – 4,3 кг. Масса пластин конденсатора, если их изготовить из листового алюминия толщиной 1 мм, составит 2,5 кг, а масса боковых стенок резонатора, изготовленных из тефлона толщиной 2 мм, – 1,5 кг.

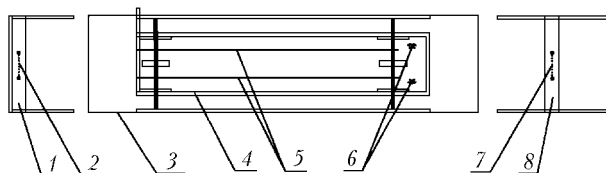


Рис. 1. Схема устройства «Ловушки»: 1 – нижний съемный пробоотборный коллектор; 2 – электроды нижнего преципитатора; 3 – корпус резонатора; 4 – соленоид; 5 – пластины конденсатора; 6 – электронные пушки; 7 – электроды верхнего преципитатора; 8 – верхний съемный пробоотборный коллектор

Для устойчивой работы разрядной камеры предусмотрен источник электронов с энергией около 1–2 кэВ с током 1 мА. Для этого за пределами конденсатора устанавливается электронная пушка для ленточного пучка электронов, включающая в себя катод в виде нити накаливания с оксидным покрытием и анод с напряжением 1–2 кВ.

Электроны, попадающие в область магнитного поля $B = 0,58 \cdot 10^{-2}$ Тл, будут вращаться с частотой ниже $\omega_B = eB/m_e = (1,6 \cdot 10^{-19})(0,58 \cdot 10^{-2})/(0,91 \cdot 10^{-30}) = 10^9$, и радиусом около

$$r = m v / (e B) = (0,91 \cdot 10^{-30}) (2,65 \cdot 10^7) / (1,6 \cdot 10^{-19}) \times \\ \times (0,58 \cdot 10^{-2}) = 2,6 \text{ см.}$$

Благодаря длительному времени пребывания в разрядной камере, электроны ионизируют молекулы остаточного газа и сообщают заряд улавливаемым частицам при их столкновении с электронами и молекулами остаточного газа.

3. Два съемных пробоотборных коллектора (верхний и нижний) предназначены для сбора частиц биогенной природы и транспортировки на Землю. Пробоотборники должны быть стерильными и транспортироваться в стерильном пакете с молекулярным фильтром, обеспечивающим выравнивание давления в пакете и окружающей атмосфере для предупреждения механических повреждений и деформаций из-за разности давлений. Коллекторы вынимаются из пакетов непосредственно перед установкой и прикрепляются к корпусу резонатора. К ним подсоединяются контакты от высоковольтного источника постоянного тока ($U = 1-2$ кВ, $I = 1-2$ мкА). Это напряжение подается на электроды преципитатора. Коллекторы в развернутом состоянии имеют размеры 50 × 100 × 500 мм (рис. 2). В собранном (транспортном) состоянии размер их меньше 10 × 100 × 500 мм. Масса коллекторов 0,5 кг.

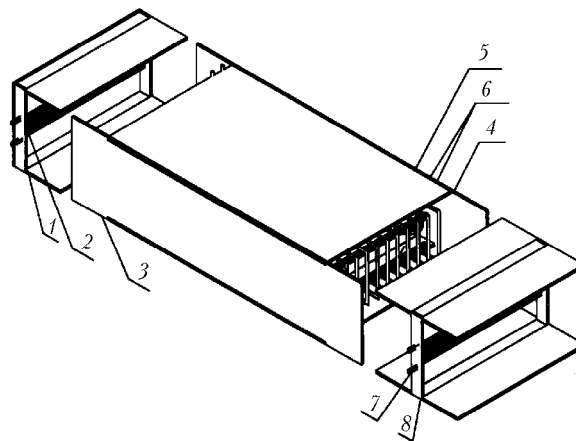


Рис. 2. Внешний вид «Ловушки». Обозначения те же, что и на рис. 1

4. Блок управления и измеритель тока на высоковольтных преципитаторах устанавливаются на пульте управления научными экспериментами в гермоотсеке. Блок управления предназначен для подключения (отключения) источника питания к бортовой энергосистеме. Блок

должен обеспечивать коммутацию тока $I = 40$ А при напряжении $U = 32$ В. Измеритель тока на высоковольтных электродах преципитатора определяет через пересчетный коэффициент поток частиц, осевших на электроды. Пересчетный коэффициент перенесенного заряда в количество частиц должен быть принят в наземных экспериментах. Чувствительность измерителя тока должна быть около 1 нА. Масса блока управления не более 1 кг. Габариты приблизительно $100 \times 100 \times 100$ мм. Масса измерителя тока 0,2 кг. Габариты $30 \times 50 \times 50$ мм.

Краткое описание блока управления «Ловушкой», требования к его размещению

Блок управления «Ловушкой» включает в себя коммутатор бортовой сети для подачи питания на высоковольтный преобразователь напряжения. В качестве устройства, регистрирующего функционирование «Ловушки», используется измеритель тока на высоковольтных преципитаторах. Блок управления «Ловушкой» и измеритель тока желательно установить в гермоотсеке на пульте управления научными экспериментами.

Циклограмма энергопотребления аппаратуры при работе в периодическом режиме

Предполагается, что «Ловушка» будет смонтирована за пределами станции. Периодически (раз в год) будут сниматься и устанавливаться новые съемные коллекторы частиц. При демонтаже и монтаже коллекторов должно быть отключено питание преобразователя. Предполагается, что подача напряжения на преципитаторы будет постоянной. Энергопотребление на преципитаторах составляет 1 Вт.

Включение «Ловушки» в режиме торможения частиц при энергопотреблении 800 Вт может осуществляться на любой период – от долей секунды до нескольких суток. При этом желательно фиксировать длительность периодов работы для того, чтобы определить при обработке экспериментов, какова плотность частиц биогенной природы в космических условиях. Включение «Ловушки» может осуществляться тогда, когда есть свободные энергоресурсы. При включении могут быть электромагнитные наводки и помехи в связи, поэтому преобразователь для питания резонатора нужно отключать во время сеансов связи. Высоковольтный преобразователь постоянного напряжения для питания электродов преципитатора маломощный (1 Вт) и его можно экранировать, так что не будут создаваться помехи для связи и он будет работать постоянно.

Обслуживание аппаратуры «Ловушка»

При демонтаже и монтаже коллекторов должно быть отключено питание преобразователя и выводы преобразователя должны иметь электрическое соединение для обеспечения электробезопасности экипажа при монтаже ловушки. Экипаж, принимающий участие в установке съемных коллекторов, должен снять коллектор, сложить его в транспортное положение, уложить в стерилизованный пакет, снабженный молекулярным фильтром, который служит для выравнивания давления в пакете. Далее необходимо извлечь новый коллектор из стерильного пакета, привести его в рабочее положение и

установить на место снятого. После этого соединить контакты выхода высоковольтного преобразователя с контактами электродов преципитатора.

Средства контроля заполнения пробоотборных коллекторов и регистрации попадания частиц

Для контроля потока частиц, осевших на электроды, используется измеритель тока на высоковольтных электродах преципитатора, который определяет через пересчетный коэффициент поток частиц, осевших на электроды. Шкала измерителя тока должна быть около 1 мкА. Для контроля полного количества частиц, осевших за все время пробоотбора, предполагается установить схему, регистрирующую полный заряд, попадающий на электроды. Коэффициент пересчета заряда в количество частиц должен быть установлен в наземных экспериментах.

Объемная производительность пробоотбора составляет $400 \text{ м}^3/\text{с}$. Площадь пробоотбора – $0,05 \text{ м}^2$. По справочнику [7], масса метеоритного вещества с массой частиц меньше 0,003 г, выпадающего на Землю, составляет $20 \cdot 10^6 \text{ г/сут}$. Полное количество метеоритного вещества, включающего и частицы биогенной природы с массой $\approx 10^{-21} \text{ г}$, собранного за год в объеме резонатора, составит в зависимости от направления пробоотбора 0,7 – 700 мкг.

Требования к телеметрии

По каналам телеметрии необходимо передавать на Землю ежедневно или дважды в сутки значения тока и прошедшего заряда на электродах преципитатора. Сброс телеметрических параметров с блока управления необходимо осуществлять по двум каналам (для верхнего и нижнего коллектора). Эта информация может служить для определения закономерностей изменения потока частиц на солнечной и затененной части орбиты станции и влияния солнечной активности на поток частиц. Возможны и другие корреляции, связанные с положением орбиты Земли.

Требования к ориентации относительно вектора скорости МКС, Земли

Ориентация «Ловушки» должна максимально точно соответствовать вектору скорости МКС. При таком направлении частицы будут максимально эффективно тормозиться в электромагнитном поле резонатора и в атмосфере остаточного газа. При перпендикулярном к вектору скорости МКС и радиусу Земли направлению резонатора не улавливаются частицы, двигающиеся по направлению к Земле. Измерения тока на преципитаторах при таком направлении ловушки определяют фоновое значение тока. При перпендикулярном к вектору скорости МКС и при радиальном от Земли направлении резонатора улавливаются только высокоскоростные частицы, двигающиеся по направлению к Земле.

Предварительная схема электрических соединений блоков аппаратуры

Схема электрических соединений представлена на рис. 3. Напряжение на резонатор от высоковольтного преобразователя подается на один виток соленоида. Из-за высокой добротности резонатора напряжение на пластинах конденсатора возрастает до 100 кВ.

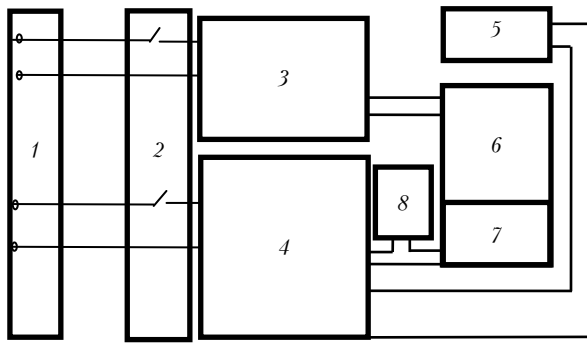


Рис. 3. Схема электрических соединений блоков аппаратуры «Ловушка»: 1 – бортовая энергосистема $U = 27$ В, $I = 40$ А; 2 – блок управления; 3 – высоковольтный преобразователь напряжения для резонатора $U = 2$ кВ, $I = 0,4$ А, $f = 1$ МГц; 4 – высоковольтный преобразователь напряжения для электродов преципитатора $U = 1$ кВ, $I = 1$ мкА; 5 – верхний коллектор; 6 – резонатор; 7 – нижний коллектор; 8 – измеритель тока на электродах $I = 1$ мкА

Время занятости экипажа

Экипаж будет занят один день в год при установке и снятии коллекторов на ловушке. В обычные дни экипаж должен следить за включением и выключением тумблера подачи напряжения на высоковольтный преобразователь напряжения для резонатора.

Длительность сеанса космической экспедиции (КЭ)

Время от момента доставки аппаратуры на борт МКС до момента снятия аппаратуры с борта должно составлять 10 лет. При этом раз в год необходимо снимать коллекторы и доставлять их в лабораторию для выделения и идентификации частиц биогенного происхождения, собранных на орбите. Сепарация и идентификация частиц биогенного происхождения будут осуществляться в лаборатории по их поляризуемости в неодно-

родном переменном электрическом поле и методами полимеразной цепной реакции.

Число сеансов КЭ

Предположительно может быть несколько сеансов КЭ. Каждая последующая КЭ может доставлять более усовершенствованную «Ловушку» с учетом данных, полученных в предыдущей экспедиции. Корректировку числа сеансов КЭ можно будет осуществить после первых экспериментов с «Ловушкой», поскольку пока неизвестно, какова концентрация частиц биогенного происхождения на орбите МКС.

Выводы

Предложена конструкция пробоотборного устройства, позволяющего в шадящем режиме тормозить частицы биологической природы, отделив их от частиц неорганической природы.

Определены основные требования к ориентации пробоотборного устройства, телеметрии, средствам регистрации улавливаемых частиц, энергопотреблению и длительности пробоотбора.

1. *Топорков В.С., Бакиров Т.С., Генералов В.М., Сафатов В.С.* Отбор биологических частиц в верхних слоях атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 549–552.
2. *А.с. 625559 СССР, МКИ Н05Н7/00.* Способ ускорения нейтральных частиц / Т.С. Бакиров. Оpubл. в БИ. 1974. № 6.
3. *А.с. 879675 СССР, МКИ Н05Н7/00.* Способ ускорения нейтральных частиц / Т.С. Бакиров. Оpubл. в БИ. 1981. № 6.
4. *А.с. 1417783 СССР, МКИ Н05Н7/00.* Способ ускорения нейтральных частиц / Т.С. Бакиров. Оpubл. в БИ. 1987. № 6.
5. *А.с. 1642353 СССР, МКИ G 01 N 27/22.* Способ определения поляризационных характеристик частиц / Т.С. Бакиров, В.М. Генералов, В.М. Чермашенцев. Оpubл. в БИ. 1991. № 14.
6. *Пат. 2105815 СССР, МКИ G 6 C 12 Q 1/00.* Способ отбора биологических проб из потока частиц / Т.С. Бакиров, В.М. Генералов, В.С. Топорков. Оpubл. в БИ. 1998. № 6.
7. *Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.*

T.S. Bakirov, V.M. Generalov. Sampler «Trap» of biogenic particles in space.

New spare sampler (sampling with small velocities of particles motion), of biological particles and alive microorganisms in top atmosphere and space is designed. The collision of fast driven biological particle in space with a wall of a sampler not only inactivates biological particles, but also destroys them. Therefore, before to catch particles, it is necessary to decelerate them. The sampler is designed on the basis of the system of high frequency resonators of neutral particles accelerator used for deceleration of biological particles in this case. The basis for this sampler is our theoretical and experimental data on the biological particles (bacteria, cells, and viruses) behaviour in high frequency electromagnetic field.