

## Концепция прибора на основе сеточной конструкции для измерения параметров микрометеороидов

К. Е. Воронов, А. М. Телегин, Д. М. Рязанов

*Приведена конструкция прибора для измерения параметров заряженных микрочастиц (микрометеороидов) на основе сеток. Основное внимание уделено вопросам расчета погрешностей при измерении заряда, массы и скорости таких микрочастиц. Разработана 3D-модель прибора и проведены расчетные соотношения для параметров заряженных микрочастиц.*

*Ключевые слова:* микрометеороиды, прибор, наведенный сигнал, заряженная микрочастица, погрешность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-73-80

### Введение

Теоретические и экспериментальные работы по изучению параметров микрометеороидов в космическом пространстве проводят исследователи и научные коллективы по всему миру [1–4].

Для исследования параметров микрометеороидов было разработано большое количество приборов, основанных на самых различных принципах [2]. Авторами этой статьи предложена концепция прибора на основе сеток для регистрации параметров заряженных микрочастиц (микрометеороидов). Конструкция сетки в данном варианте представляет собой модуль, состоящий из металлической сетки или проводников-электродов, закреплённых на жёстком каркасе. Цель данной работы – уделить основное внимание вопросам расчета

погрешностей при измерении заряда, массы и скорости таких микрочастиц.

### Постановка работы

Рассмотрим принцип действия нескольких приборов сеточной структуры подобного типа действия [5–8]. Микрочастицы (микрометеороиды), находясь в околоземном пространстве, заряжаются под влиянием факторов космического пространства до некоторого потенциала [9]. При сближении с измерительным электродом (обычно в качестве такого электрода используется проводящая сетка или металлический провод) на нём наводится потенциал, пропорциональный параметрам движущейся частицы.

В работе [5] описана конструкция прибора, состоящего из позиционно чувствительной электродной системы. Для измерения траектории движения частицы в данном датчике используются 4 измерительных плоскости, каждая из которых состоит из 16 электродов. Электроды каждой плоскости расположены параллельно между собой в одной плоскости и ортогональны по отношению к электродам соседних плоскостей. Датчик обладает высокой прозрачностью и механической прочностью, большой чувствительной областью. Недостатками такого прибора являются боль-

**Воронов Константин Евгеньевич**<sup>1,2</sup>, директор, доцент, к.т.н.

**Телегин Алексей Михайлович**<sup>1,2</sup>, с.н.с., доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: talex85@mail.ru

**Рязанов Дмитрий Михайлович**<sup>1,2</sup>, инженер.

<sup>1</sup> Институт космического приборостроения (ИКП–214).

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34а.

<sup>2</sup> Самарский университет.

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

Статья поступила в редакцию 26 мая 2021 г.

© Воронов К. Е., Телегин А. М., Рязанов Д. М., 2021

шое количество усилителей и конструктивная сложность прибора.

В устройстве, приведенном в работе [6], дополнительно установлен источник напряжения с целью измерения массы высокоскоростных микрочастиц путем контроля отклонения их траектории под действием электрического поля.

В работе [10] описано устройство для определения двух составляющих вектора скорости при условии, что при измерении пренебрегают третьей составляющей вектора скорости. Такое устройство можно использовать для регистрации потоков микрочастиц, летящих с заранее заданного направления.

В работе [11] предложен новый подход к измерению траектории заряженной частицы пыли. Для вычисления скорости и траектории частиц применяется анализ формы сигнала, наведенного на два полукруглых сеточных электрода. Моделирование, проведенное авторами, показало, что выбранный метод измерения является эффективным для маломощных и маломассивных датчиков траектории движения микрочастиц.

В работе [11] приведена плоская конструкция измерителя вектора скорости, что является, с нашей точки зрения, наиболее перспективным направлением для использования в космическом приборостроении, несмотря на возможное снижение точности измерения из-за особенностей обработки информации. Подобный принцип измерения также был применен в работе [12]. В качестве измерителей координат пролета микрочастиц используются параллельные электроды в виде проводников, к которым подключены усилители. Для достоверной оценки координат пролета микрочастицы заранее просчитаны несколько возможных выходных сигналов с измерительных усилителей для различных траекторий движения микрочастиц. Точность измерения составила порядка 0,5 мм.

### Описание конструкции

Разрабатываемый прибор должен оценивать следующие параметры микрометеороидов: скорость (от 10 м/с до 10 км/с, причем верхняя планка ограничена максимальной

скоростью ускорителя микрочастиц, на котором предполагается проводить испытания, тогда как реальная максимальная скорость может достигать 72 км/с), массу и заряд (отношение  $Q/m = 1 \div 100$  Кл/кг).

Принцип действия предлагаемого устройства (рис. 1) основан на явлении электростатической индукции [6, 13]. Прибор конструктивно состоит из отдельных модулей-сеток 1–10, к которым при необходимости подключаются предусилители. Под моментом времени в данной работе будем понимать момент пролета микрочастицей одной из сеток, под временным интервалом – время пролета между двумя сетками.

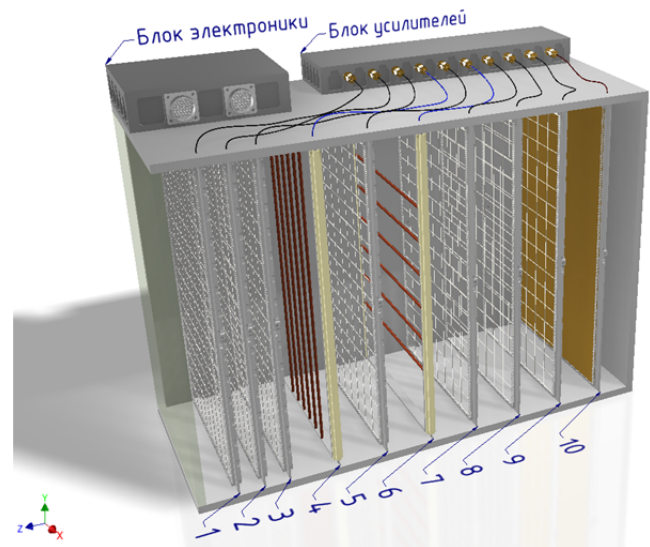


Рис. 1. Модель прибора для регистрации параметров микрометеороидов.

Заряженная микрочастица (массой  $m$  и скоростью  $\vec{V}(V_x, V_y, V_z)$ ) пролетает сетки 1–9 и ударяется в мишень 10. Сетки 4 и 6 выполнены в виде отдельных электродов-проводников, к каждому из которых подключен предусилитель. При этом на сетках 4 и 6 наводится электрический заряд согласно координате пролета микрочастицы. Путем обработки сигналов с этих электродов выносится решение о месте пролета микрочастицы [5]: с помощью сетки 4 измеряется координата пролета по оси  $X$ , с помощью сетки 6 измеряется координата пролета по оси  $Y$ . Сетки 7, 8, 9 образуют систему для измерения отношения заряда частицы к её массе  $Q/m$ . 10 – координатная мишень, рабочая поверхность которой

представляет собой резистивный материал, нанесенный на диэлектрик. При ударе микро-частицы в мишень 10 по ней растекаются заряды, при этом в зависимости от места удара на разных концах мишени с помощью усилителей регистрируется соответствующий сигнал. Сетки 1, 3, 5, 7, 9 – экранирующие. На сетку 2 подано напряжение –5 кВ для защиты от внешнего электронного потока. На рис. 2 приведена эквивалентная схема входной части измерительной схемы.

Заряженная микрочастица, подлетая к сеткам 4, 6 и 8, наводит на них импульс тока. Форму импульса тока можно рассчитать с использованием теоремы Шокли–Рамо. Согласно этой теореме, если в пространстве, в котором располагаются электроды, со скоростью  $\vec{V}$  движется заряд  $Q$ , то на  $k$ -й электрод наводится ток [14]:

$$i_k(t) = Q(\vec{V} \vec{E}_k)$$

где  $\vec{E}_k$  – эффективная (взвешенная) напряжённость поля в точке, где находится заряд  $Q$  в момент времени  $t$ , рассчитанная по схеме: заряд удалён на бесконечность, потенциал проводника, с которого снимается ток, равен 1, потенциал оставшихся проводников равен 0;  $(\vec{V} \vec{E}_k)$  – скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряженности.

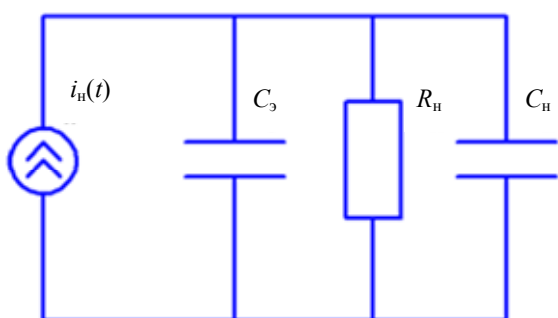


Рис. 2. Эквивалентная схема входной части измерительной схемы.

Измеряя время возникновения импульсов на сетках 4, 6 и 8, можно определить основные параметры микрочастицы. Измерение проводится путем снятия сигнала с входного сопротивления усилителя  $R_n$ , параллельно которому включены паразитная емкость электрода  $C_3$  и входная емкость предусилителя  $C_n$ .

Примем, что вместо двух емкостей существует одна обобщенная емкость  $C = C_3 + C_n$ . Тогда на входе усилителя мы будем наблюдать колоколообразный импульс напряжения, получившийся в результате интегрирования наведенного тока на обобщенной емкости  $C$ , причем передний фронт данного импульса соответствует периоду времени, когда микро-частица подлетает к измерительной сетке, задний фронт – когда микрочастица удаляется от измерительной сетки, а пик наблюдается в момент пролета микрочастицей сетки. Следует отметить, что при пролете микро-частицы через электроды сеток 4 и 6 импульс напряжения имеет максимальное значение на ближайших электродах, на остальных же электродах будет в этот момент «впадина», обусловленная экранированием ближайшими электродами электрического поля заряженной микро-частицы.

Для определения координаты микро-частицы по оси  $X$  при пролете сетки 4 и по оси  $Y$  при пролете сетки 6 предлагается использовать методику обработки сигналов, выполненную по аналогии с работами [15, 16].

### Расчетные соотношения

Компоненты вектора скорости микро-частицы определяются согласно выражениям:

$$\begin{aligned} V_z &= d_{4-6} / t_{4-6}, \\ V_y &= (y_{10} - y_6) / t_{6-10}, \\ V_x &= (x_{10} - x_4) / t_{4-10}, \end{aligned}$$

где  $d_{4-6}$  – расстояние между сетками 4 и 6;  $t_{4-6}$  – время пролета микро-частицей между сетками 4 и 6;  $y_6$  – координата по оси  $Y$  пролета микро-частицей сетки 6;  $y_{10}$  – координата по оси  $Y$ , вычисляемая при ударе микро-частицы в мишень 10;  $x_{10}$  – координата по оси  $X$ , вычисляемая при ударе микро-частицы в мишень 10;  $x_4$  – координата по оси  $X$  пролета микро-частицей сетки 4;  $t_{4-10}$  – время пролета микро-частицы между сетками 4 и 10.

Относительная погрешность измерения скорости оценивается согласно выражению:

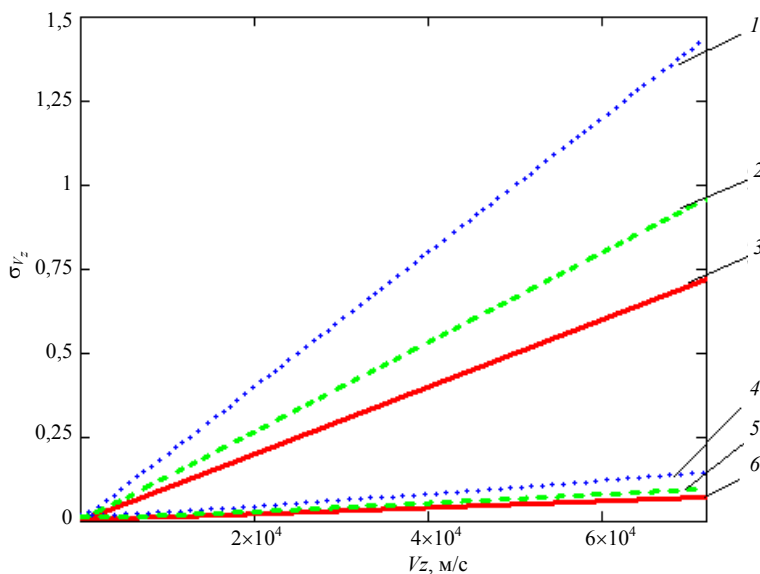
$$\begin{aligned}\sigma_{V_z} &= \Delta V_z / V_z = \\ &= \sqrt{([\partial V_z / \partial d] \Delta d)^2 + ([\partial V_z / \partial t] \Delta t)^2} / V_z = \\ &= \sqrt{(\Delta d / d_{4-6})^2 + (\Delta t / t_{4-6})^2},\end{aligned}$$

где  $\Delta d$  – абсолютная погрешность установки сеток (исходя из технологической возможности изготовления, была задана точность 1 мм);  $\Delta t$  – погрешность измерения времени, которая определяется устройством измерения.

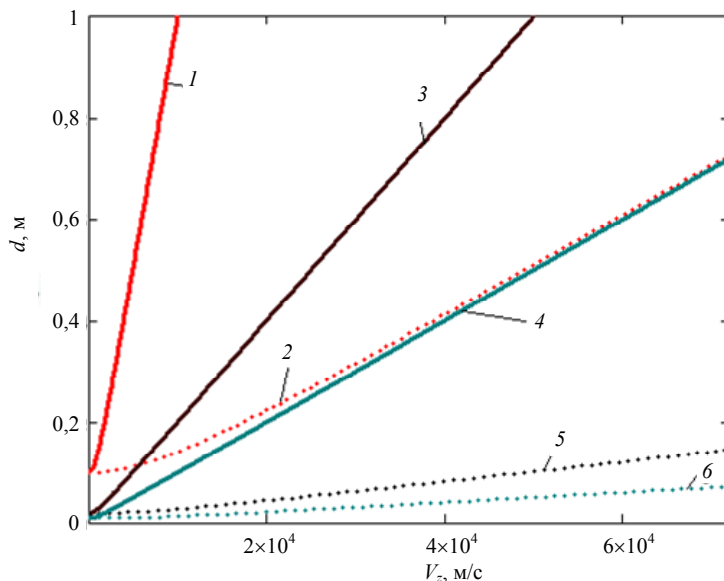
На рис. 3 построен график зависимости относительной погрешности измерения скорости от скорости при различных абсолютных

погрешностях измерения временного интервала и расстояния между сетками. Результаты показывают, что производить измерения временных интервалов необходимо с точностью не менее, чем  $10^{-7}$  с. Такую точность можно достичь, если, например, процесс измерения временного интервала производить с использованием схем измерения на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [17].

Согласно рис. 4, для того чтобы точность измерения скорости не превышала 5 %, необходимо, чтобы расстояние между сетками было не менее 0,1 м.



**Рис. 3.** Зависимость относительной погрешности измерения скорости от скорости микрочастицы ( $\Delta d = 10^{-3}$  м): 1 –  $d_{4-6} = 0,1$  м,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 2 –  $d_{4-6} = 0,075$  м,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 3 –  $d_{4-6} = 0,05$  м,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 4 –  $d_{4-6} = 0,1$  м,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 5 –  $d_{4-6} = 0,075$  м,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 6 –  $d_{4-6} = 0,05$  м,  $\Delta t = 10^{-7}$  с.



**Рис. 4.** Зависимость расстояния между сетками 4 и 6 от скорости микрочастицы при заданных погрешностях измерения ( $\Delta d = 10^{-3}$  м): 1 –  $\sigma_{V_z} = 0,01$ ,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 2 –  $\sigma_{V_z} = 0,01$ ,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 3 –  $\sigma_{V_z} = 0,05$ ,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 4 –  $\sigma_{V_z} = 0,05$ ,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 5 –  $\sigma_{V_z} = 0,1$ ,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 6 –  $\sigma_{V_z} = 0,1$ ,  $\Delta t = 10^{-7}$  с.

Заряд микрочастицы можно оценить путем решения дифференциального уравнения, составленного согласно схеме на рис. 2, для 8 сетки:

$$dU_n(t)/dt + U_n(t)/R_n C = i_n(t)/C,$$

где  $U_n(t)$  – напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_n$ .

Полагая, что входное сопротивление нагрузки достаточно велико, получаем следующее соотношение:

$$dU_n(t)/dt = Q(\vec{V} \vec{E}_k)/C.$$

При решении данного дифференциального уравнения принимаем, что начальное время  $t_0 = 0$ , а конечное время  $t_{7-8}$  определяется временем пролета микрочастицей расстояния от сетки 7 до сетки 8. Примем следующее допущение: так как структура электрического поля между сетками 7 и 8 совпадает со структурой поля плоского конденсатора, то приведенное электрическое поле будет иметь вид  $|\vec{E}_k| = 1/d_{7-8}$ . Выражение для напряжения на входе усилителя в момент пролета микрочастицей сетки 8 примет вид:

$$\begin{aligned} U(t_8) &= \int_0^{t_{7-8}} (Q[V_{zt}(t)/d_{7-8}]/C) dt = \\ &= (Q/Cd_{7-8}) \int_0^{t_{7-8}} (V_z + at) dt = \frac{Q}{C}, \end{aligned}$$

где  $V_{zt}(t)$  – текущая скорость микрочастицы, которая изменяется в процессе движения между сетками 7 и 9 под действием электро-

статического поля  $U_0$ , прикладываемого к сетке 8;  $a = (Q/m)/(U_0/d_{7-8})$  – ускорение микрочастицы под действием электростатического поля, вызванного прикладываемым к сетке 8 напряжением  $U_0$ .

Заряд микрочастицы, таким образом, можно определить согласно выражению:

$$Q = CU(t_8) = (C/K_8)U_{\text{вых}}(t_8),$$

где  $U_{\text{вых}}(t_8)$  – напряжение на выходе усилителя, подключенного к восьмой сетке;  $K_8$  – коэффициент усиления усилителя, подключенного к восьмой сетке.

Относительная погрешность измерения заряда определяется выражением:

$$\sigma_Q = \sqrt{(\sigma_C)^2 + (\sigma_{K_8})^2 + (\sigma_U)^2},$$

где  $\sigma_C$ ,  $\sigma_{K_8}$ ,  $\sigma_U$  – погрешности измерения емкости конденсатора, коэффициента усиления усилителя и установки напряжения  $U_0$ .

Соотношение  $Q/m$  можно определить из уравнения для равноускоренного движения микрочастицы под действием электростатического поля:

$$Q/m = (d_{7-8} - V_z \Delta t_{7-8}) / [(U_0/d_{7-8})(\Delta t_{7-8}^2/2)],$$

где  $d_{7-8}$  – расстояние между сетками 7 и 8;  $\Delta t_{7-8}$  – время пролета микрочастицы между сетками 7 и 8.

Относительная погрешность измерения  $Q/m$  определяется согласно выражению:

$$\sigma_{Q/m} = \frac{\Delta(Q/m)}{(Q/m)} = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial d_{7-8}}\right) \Delta d\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial V_z}\right) \Delta V_z\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial t_{7-8}}\right) \Delta t\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial U_0}\right) \Delta U_0\right]^2} / \left(\frac{Q}{m}\right).$$

При этом надо заметить, что время прохождения микрочастицей расстояния между сетками 7 и 8 вычисляется согласно выражению:

$$\begin{aligned} t_{7-8} &= \left[ V_z + \sqrt{V_z^2 + 2d_{7-8}(Q/m)(U_0/d_{7-8})} \right] / \\ &/ \left[ (Q/m)(U_0/d_{7-8}) \right]. \end{aligned}$$

Проведя анализ графиков зависимости относительной погрешности измерения  $Q/m$  от скорости (рис. 5, 6) при различных погрешностях измерения скорости,  $Q/m$  и  $U_0$ , можно сделать вывод, что в диапазоне от 1 м/с до 10000 м/с имеются локальные минимум и максимум погрешности, при этом располо-

жение этих экстремумов зависит от  $Q/m$  и напряжения  $U_0$ .

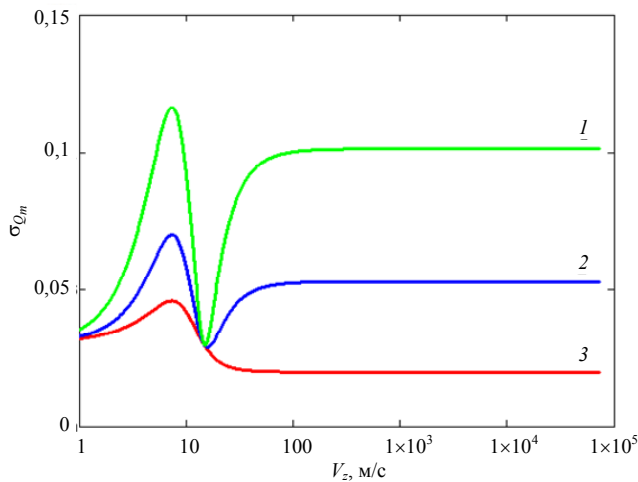


Рис. 5. График зависимости погрешности измерения  $Q/m$  от скорости ( $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В): 1 –  $\sigma_{v_z} = 0,1$ ; 2 –  $\sigma_{v_z} = 0,05$ ; 3 –  $\sigma_{v_z} = 0,01$

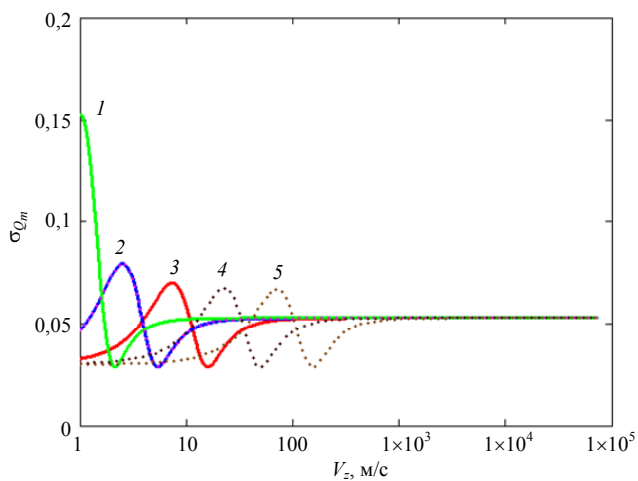


Рис. 6. График зависимости погрешности измерения  $Q/m$  от скорости: 1 –  $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 1$  В; 2 –  $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 10$  В; 3 –  $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В; 4 –  $Q/m = 10$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В; 5 –  $Q/m = 100$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В.

Следует отметить, что погрешность измерения  $Q/m$  при повышении скорости движения микрочастицы будет расти, так как относительная погрешность измерения скорости растет при повышении скорости (рис. 3).

Для повышения точности расчета время пролета микрочастицы расстояния между сетками 7 и 8 аппаратно удобнее произвести измерение  $t_{6-8}$ , а потом уже провести вычисление согласно выражению:

$$t_{7-8} = t_{6-8} - d_{6-7} / V_z.$$

Массу микрочастицы можно определить согласно выражению:

$$m = Q / (Q/m).$$

Тогда относительная погрешность измерения массы будет иметь вид:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{Q/m}^2 + \sigma_Q^2}.$$

Приведенные расчеты погрешностей позволяет оценить минимальные размеры прибора, необходимые для достижения заданной точности. С целью увеличения точности измерения времени на фоне помех можно применить обработку сигнала, рассмотренную в работе [15].

Оценить максимальную плотность микрочастицы можно исходя из выражения для расчета максимального заряда на поверхности микрочастицы, полагая, что микрочастица имеет круглую форму [16]:

$$\rho = \sqrt{(4\pi/3m) / [3\epsilon\epsilon_0 E_S / (Q/m)]^3},$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $E_S = 2 \times 10^9$  В/м – максимальная напряженность электрического поля на поверхности микрочастицы;  $\rho$  – плотность микрочастицы.

## Заключение

Проведенное моделирование работы прибора для регистрации параметров микрометеороидов показало, что чем больше расстояние между измерительными сетками, тем точнее результаты измерения. Точность по осям  $X$ ,  $Y$  зависит от частоты расположения измерительных электродов. Полученные соотношения и графики позволяют оценить габаритные размеры прибора для измерения параметров микрометеороидов в зависимости от заданных погрешностей и диапазона исследуемых параметров. После проведения натурных испытаний и анализа полученных данных будет рассмотрена возможность уменьшения количества экранирующих сеток 1, 3, 5, 7, 9 и, как следствие, уменьшение массы и габаритов прибора.

Концепция устройства предполагает его модульность и простоту модификации при различных начальных (измеряемых) параметрах микрочастицы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Райкунов Г. Г. Методы наблюдения и модели космического мусора. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014.
2. Новиков Л. С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. – М.: Университетская книга, 2009.
3. Телегин А. М., Воронов К. Е., Авдеев М. А. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 116.
4. Воронов К. Е., Телегин А. М., Сухачев К. И., Калаев М. П. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 411.
5. Auer S., Grün E., Kempf S., Srama R., Srowig A., Sternovsky Z., Tschernjawski V. // Review of scientific instruments. 2008. № 79.
6. Xie J., Sternovsky Z., Auer S., Drake K., Grün E., Horanyi M., Le H., Srama R. // Planetary and Space Science. 2013. Vol. 89. P. 63.
7. Auer S. // OPTICA ACTA. 1982. Vol. 29. № 10. P. 1421.
8. Auer S. // Rev. Sci. Instrum. 1975. Vol. 46. № 2. P. 127.
9. Horanyi M. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 1996. № 34. P. 383.
10. Auer S., Grün E., Srama R., Kemp S., Auera R. // Planetary and Space Science. 2002. Vol. 50. P. 773.
11. Li Y., Kempf S., Simolka J., Strack H., Grün E., Srama R. // Advances in Space Research. 2017. № 59. P. 1636.
12. Auer S., Drake K., Horanyi M., Mocker A., Munsat T., Shu A., Sternovsky Z., Thomas E., Xie J. // Measurement Science and Technology. 2012. Vol. 23. № 10.
13. Semkin N. D., Voronov K. E., Piyakov A. V., Piyakov I. V. // Instruments and Experimental Techniques. 2009. Vol. 52. № 4. P. 595.
14. Герштейн Г. М. Моделирование полей методом электростатической индукции. – М.: Наука, 1970.
15. William Goode, Tobin Munsat, David James, Zach Ulibarri // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. 2018. Vol. A 908. P. 269.
16. Semkin N. D., Piyakov A. V. // Instruments and Experimental Techniques. 2015. Vol. 58. Iss. 5. P. 703.
17. Piyakov I. V., Kalaev M. P., Sukhachev K. I., Voronov K. E., Telegin A. M. // Instruments and Experimental Techniques. 2020. Vol. 63. Iss. 6. P. 870.

PACS: 07.05.Dz, 07.55. Jg , 94.80.+g

## The concept of a grid-based instrument for measuring micrometeoroid parameters

*K. E. Voronov<sup>1,2</sup>, A. M. Telegin<sup>1,2</sup>, and D. M. Ryazanov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Space Instrumentation (IKP–214)  
34a Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia  
E-mail: talex85@mail.ru

<sup>2</sup> Samara University  
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

*Received May 26, 2021*

*The article describes the design of a grid-based device for measuring the parameters of charged microparticles (micrometeoroids). The main attention is paid to the issues of calculating the errors in measuring the charge, mass and velocity of such microparticles. A 3D model of the device was developed and calculated ratios were carried out to calculate the parameters of charged microparticles.*

*Keywords:* micrometeoroids, instrument, induced signal, charged microparticle, error.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-4-73-80

## REFERENCES

1. G. G. Raykunov, *Metody nablyudeniya i modeli kos-micheskogo musora*. (Fizmatlit, Moscow, 2014) [in Russian].
2. L. S. Novikov, *Interaction Solid Particles with Space Devices* (Universitetskaya kniga, Moscow, 2009) [in Russian].
3. A. M. Telegin, K. E. Voronov, and V. A. Avdeev, *Applied Physics*, No. 6, 116 (2016) [in Russian].
4. K. Ye. Voronov, A. M. Telegin, K. I. Sukhachev, and M. P. Kalayev, *Usp. Prikl. Fiz.* **8** (6), 411 (2020).
5. S. Auer, E. Grün, S. Kempf, R. Srama, A. Srowig, Z. Sternovsky, and V. Tschernjowski, *Review of scientific instruments*, No. 79 (2008).
6. J. Xie, Z. Sternovsky, S. Auerd, K. Drake, E. Grün, M. Horanyi, H. Le, and R. Srama, *Planetary and Space Science* **89**, 63 (2013).
7. S. Auer, *OPTICA ACTA* **29** (10), 1421 (1982).
8. S. Auer, *Rev. Sci. Instrum.* **46** (2), 127 (1975).
9. M. Horanyi, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, No. 34, 383 (1996).
10. S. Auer, E. Grün, R. Srama, S. Kemp, and R. Auera, *Planetary and Space Science* **50**, 773 (2002).
11. Y. Li, S. Kempf, J. Simolka, H. Strack, E. Grün, and R. Srama, *Advances in Space Research*, No. 59, 1636 (2017).
12. S. Auer, K. Drake, M. Horanyi, A. Mocker, T. Munsat, A. Shu, Z. Sternovsky, E. Thomas, and J. Xie, *Measurement Science and Technology* **23** (10), (2012).
13. N. D. Semkin, K. E. Voronov, A. V. Piyakov, and I. V. Piyakov, *Instruments and Experimental Techniques* **52** (4), 595 (2009).
14. G. M. Gershteyn, *Fields modeling by the electrostatic induction method*. (Nauka, Moscow, 1970) [in Russian].
15. William Goode, Tobin Munsat, David James, and Zach Ulibarri, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A* **908**, 269 (2018).
16. N. D. Semkin and A. V. Piyakov, *Instruments and Experimental Techniques* **58** (5), 703 (2015).
17. I. V. Piyakov, M. P. Kalaev, K. I. Sukhachev, K. E. Voronov, and A. M. Telegin, *Instruments and Experimental Techniques* **63** (6), 870 (2020).