

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.384.62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕТОЧНОГО ДАТЧИКА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ
И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

© 2025 г. М. П. Калаев^a, А. М. Телегин^{a,*}, К. Е. Воронов^a

^a Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва
Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

* e-mail: talex85@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

После доработки 24.06.2024 г.

Принята к публикации 08.07.2024 г.

Приведено описание прототипа датчика для измерения вектора скорости микрометеороидов и частиц космического мусора на основе сеточных металлических электродов. Представлены результаты экспериментального исследования и предложения по дальнейшей модификации системы измерения.

DOI: 10.31857/S0032816225010207, EDN: GHXWJD

1. ВВЕДЕНИЕ

Микроочастицы (космический мусор и микрометеороиды) в космическом пространстве заряжаются до некоторого электрического потенциала [1, 2]. Для измерения скорости $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ этих микроочастиц в основном используется явление наведения тока заряженным движущимся телом при пролете через измерительные металлические электроды (сетки) [2–8]. По вектору скорости этих микроочастиц можно оценить их кинетическую энергию, а также направления прилета в датчик, что позволяет предсказать источник их происхождения [9–11]. Помимо индукционного способов измерения вектора скорости, существуют также оптические методы измерения, но, к сожалению, с точки зрения конструктивной реализации, они обладают рядом недостатков, таких как паразитная засветка, невозможность определения заряда микроочастиц и т. д. [12–14].

2. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА ИЗМЕРЕНИЯ СЕТОЧНОГО ДАТЧИКА

На рис. 1 показана структурная схема измерителя вектора скорости, где позициями 1–6 отмечены измерительные металлические сетки, подключенные к двум разным усилителям.

Высокоскоростная заряженная микроочастица, пролетая через данные сетки по траектории 7, наводит на каждую сетку импульс тока, форма которого близка к колоколообразной и параметры которого пропорциональны скорости и заряду этой микроочастицы [9, 11]. Пик сигналов с сеток соответствует моменту пролета частицы через сетку, что позволяет фиксировать момент пролета. Сетки 1 и 6 расположены в плоскостях, параллельных плоскости XOY . Сетки 2 и 3 параллельны друг другу, расположены под некоторым углом A к плоскости XOY и перпендикулярны плоскости XOZ . Сетки 4 и 5 параллельны друг другу, расположены под некоторым углом B к плоскости XOZ и перпендикулярны плоскости XOY [9]. В рассматриваемой конструкции углы A и B равны 15° .

Обозначим через n номер сетки, t_n – время пролета заряженной частицей n -й сетки, x_n, y_n, z_n – точки пролета заряженной частицей n -й сетки (на рис. 1 обозначена жирной точкой), z_{n1} – точку пересечения n -й сеткой оси OZ . Тогда компоненты вектора скорости микроочастицы можно определить согласно формулам

$$\begin{aligned} V_z &= (z_6 - z_1) / (t_6 - t_1), \\ V_x &= (x_3 - x_2) / (t_3 - t_2) = \\ &= \operatorname{ctg}(A) \left(V_z (t_3 - t_2) + (z_{31} - z_{21}) \right) / (t_3 - t_2), \end{aligned}$$

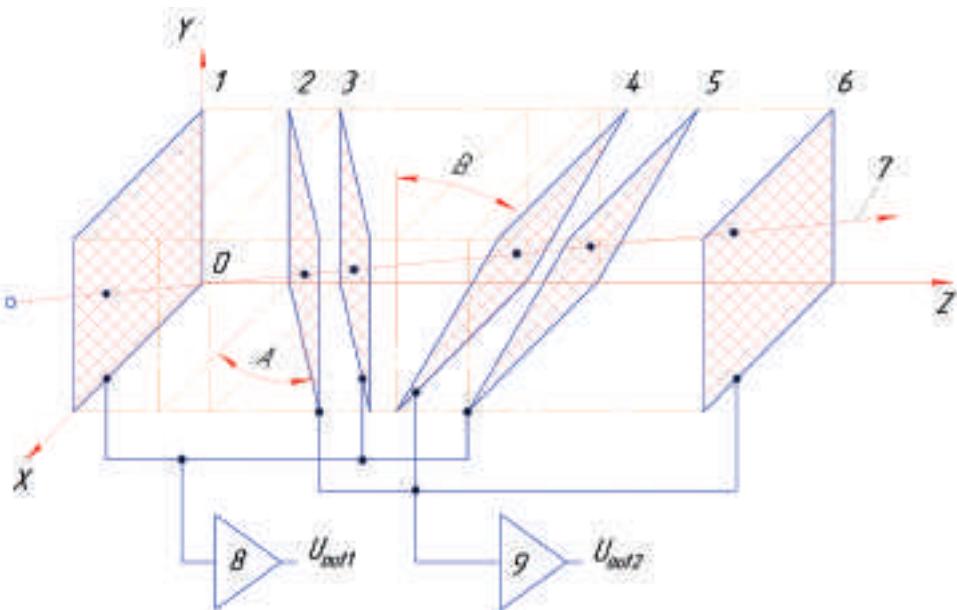


Рис. 1. Структурная схема датчика измерения вектора скорости микрочастиц: 1–6 – сеточные электроды; 7 – траектория движения микрочастицы; 8, 9 – усилители.

$$\begin{aligned} V_y &= (y_5 - y_6) / (t_5 - t_6) = \\ &= \operatorname{ctg}(B) (V_z (t_5 - t_4) + (z_{51} - z_{41})) / (t_5 - t_4). \end{aligned}$$

В большинстве случаев необходимо знать не все три координаты вектора скорости, а только модуль вектора скорости и его наклон к плоскости мишени, в которую ударяет высокоскоростная микрочастица. Предполагая, что плоскость мишень параллельна плоскости XOY , получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \text{ – модуль вектора скорости,} \\ \gamma &= \arccos \left((V_x^2 + V_y^2) / \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \right) \text{ – угол} \\ &\text{наклона к плоскости мишени.} \end{aligned}$$

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2 показано размещение разработанного прототипа датчика в вакуумной камере ускорителя микрочастиц, принцип действия которого подробно рассмотрен в работах [10, 15].

Структурная схема стенда для проведения эксперимента с датчиком микрочастиц показана на рис. 3.

Основание прототипа датчика изготовлено с использованием 3D-принтера методом FDM-печати из ABS-пластика. Габариты макета составляют $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}^3$, размеры чувствительного окна $80 \times 80 \text{ мм}^2$. При изготовлении рамок сеток испытаны две технологии: 3D-печать и

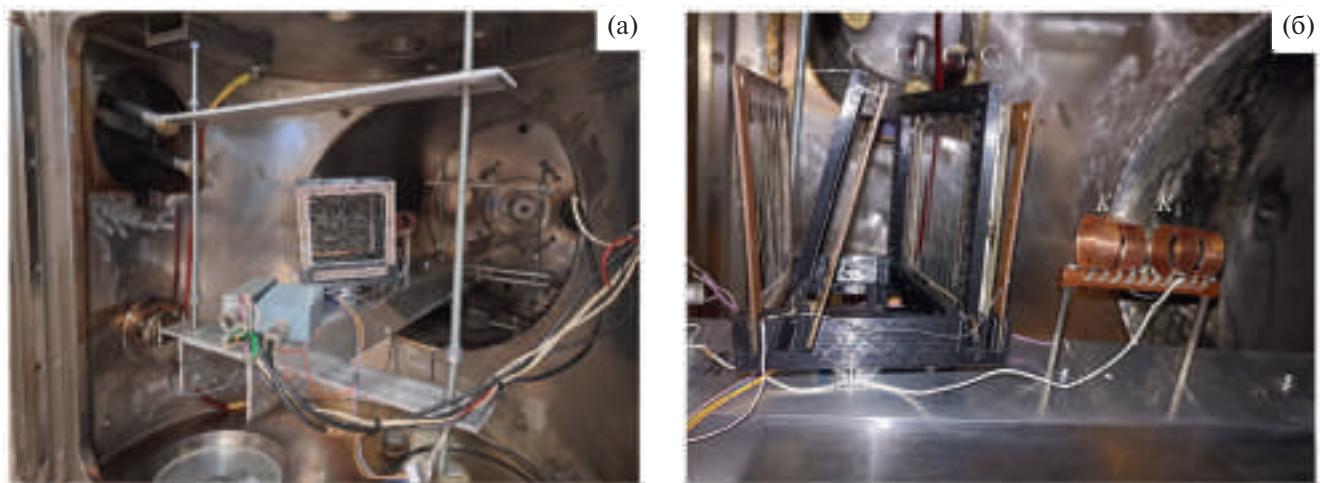


Рис. 2. Фотографии прототипа датчика вектора скорости микрочастиц, установленного в вакуумной камере ускорителя: а – вид сзади, б – вид сбоку.

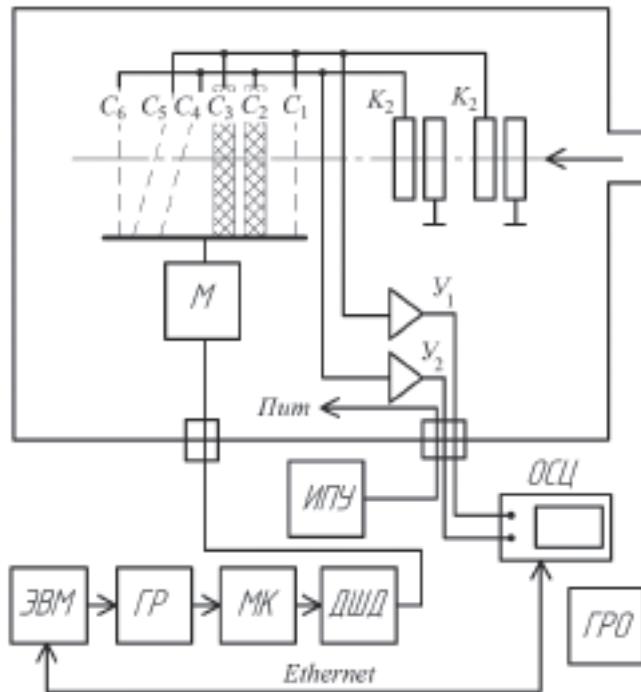


Рис. 3. Структурная схема стенда для калибровки датчика вектора скорости: C_1 - C_6 – металлические сетки; K_1 , K_2 – кольца Фарадея, Y_1 , Y_2 – усилители; ИПУ – источник питания усилителей; M – шаговый двигатель; ГР – гальваническая развязка цифрового интерфейса; МК – микроконтроллер; ДШД – драйвер шагового двигателя; ОСЦ – цифровой осциллограф; ГРО – гальванически развязанный источник питания осциллографа.

фрезерование фольгированного стеклотекстолита на ЧПУ-станке. Использование 3D-печати позволяет ускорить процесс создания прототипа и получить рамку с минимальной паразитной емкостью, однако в дальнейшем пластик непригоден для создания бортовой аппаратуры из-за низкой стойкости к факторам космического пространства. В качестве материала струнки использована проволока из никрома тол-

щиной 30 мкм, расстояние между струнами 5 мм. Никром выбран по причине высокой механической прочности при малой толщине струны, несмотря на его относительно высокое удельное сопротивление [10]. Предварительные эксперименты показали, что применение других проводников, таких как медь, практически не влияет на форму и амплитуду наведенных сигналов.

В результате эксперимента фиксировались временные интервалы пролета шести сеток и двух колец Фарадея [15]. Изменение угла влета микрочастицы в датчик проводилось путем вращения самого датчика относительно оси тракта ускорителя, совпадающей с осью колец Фарадея. В качестве поворотного устройства был использован шаговый двигатель с встроенным редуктором 28-BYJ48. Двигатель имеет 64 шага на оборот, что в совокупности с редуктором 1/63.68395 позволяет поворачивать выходной ротор с шагом около 0.087°. Поскольку при первичных испытаниях прототипа датчика такие малые углы поворота не требовались, осуществлялся поворот с шагом 6° в диапазоне углов от -42° до +42° (относительно оси ускорителя). Работой шагового двигателя управляли микроконтроллер (МК) и драйвер шагового двигателя (ДШД), расположенные снаружи вакуумной камеры, а команды на микроконтроллер подавались с ЭВМ через модуль гальванической развязки (ГР).

В схеме использованы два усилителя, Y_1 и Y_2 , электрическая принципиальная схема которых представлена на рис. 4 [16]. Кольцо Фарадея K_1 соединено с сетками C_1 , C_3 , C_5 и подключено ко входу усилителя Y_1 . Кольцо Фарадея K_2 соединено с сетками C_2 , C_4 , C_6 и подключено ко входу усилителя Y_2 . Такая схема включения позволяет сократить количество каналов аналоговой записи с восьми до двух, что упрощает запись

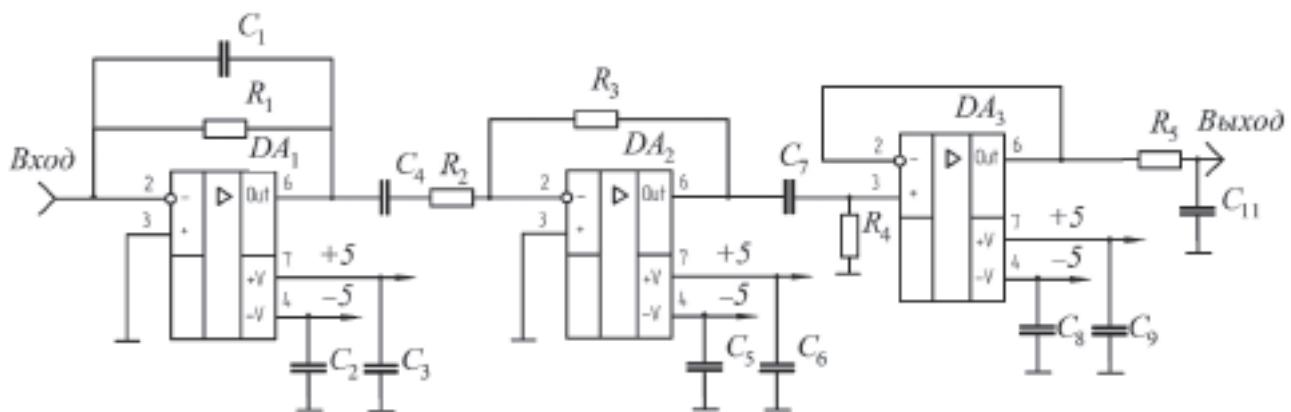


Рис. 4. Принципиальная схема зарядочувствительного усилителя.

и последующую обработку сигналов во время испытаний макета датчика. В момент пролета частицы через любую из сеток соседние сетки выполняют функцию экранирующих сеток, поскольку они подключены ко входу другого усилителя, включенного по схеме с “виртуальной землей” на входе. Такой подход позволяет повысить крутизну пролетных импульсов без использования дополнительной группы разделительных заземленных сеток, что повышает коэффициент “прозрачности” датчика, который составил для данного прототипа 97%. В качестве частиц использовался порошок олова с размером частиц 1–2 мкм. При напряжении на линейной части ускорителя 100 кВ скорости частиц составили 100–900 м/с. В ходе дальнейших экспериментов после оптимизации конструкции датчика и схемы усилителей планируется провести испытания при более высоких скоростях.

Каждый из усилителей состоит из трех каскадов (рис. 4). Преобразование заряда в напряжение осуществляется с помощью первого каскада, выполненного на микросхеме OPA656 (DA_1). Напряжение на выходе первого каскада определяется выражением

$$U = -Q / C_1,$$

где Q – заряд микрочастицы, $C_1 = 10 \text{ пФ}$ – емкость в цепи обратной связи первого операционного усилителя.

Второй каскад, выполненный на операционном усилителе AD8005 (DA_2), является инвертирующим усилителем напряжения с коэффициентом усиления, равным 39. Конденсатор C_4 совместно с резистором R_2 образуют фильтр высоких частот с частотой среза около 100 Гц, что позволяет ослабить влияние помех от электрической сети 50 Гц в лабораторных условиях.

Третий каскад представляет собой неинвертирующий усилитель, выполненный на микросхеме OPA820 (DA_3). Данный каскад предназначен для обеспечения работы усилителя, подключенного к осциллографу, на длинную коаксиальную линию.

В качестве записывающей аппаратуры был использован четырехканальный осциллограф Rigol MSO5104 с максимальной частотой дискретизации 6 ГСПС. Питание осциллографа осуществляется через блок гальванической развязки по цепи питания 220 В, чтобы исключить проникание помех с частотой сети 50 Гц через кабели усилителей в вакуумную камеру. Во время эксперимента осциллограф находится в ждущем

режиме с запуском записи по превышению заданного порогового уровня. Запись проводилась одновременно по двум каналам с частотой дискретизации 1 ГСПС и глубиной записи 10 миллионов выборок по каждому каналу. Записанный пакет передавался в компьютер через кабель по протоколу Ethernet для последующей обработки в ЭВМ.

На рис. 5 представлены результаты записанных пролетных импульсов с колец Фарадея (K_1, K_2) и сеток $C_1–C_6$.

На рис. 6, 7 показаны погрешности измерения модуля скорости микрочастиц и угла их влета в датчик. В процессе проведения эксперимента минимально измеренный заряд имел величину 10^{-14} Кл .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Представленный прототип датчика представляет собой модульную конструкцию, что позволяет быстро производить модификацию расположения сеток и проводить измерения модуля вектора скорости и угла влета микрочастиц. Подключение нескольких сеток на вход одного усилителя неизбежно ухудшает отношение сигнал/шум системы, а также снижает быстродействие за счет увеличения входной емкости. В дальнейшем планируются оптимизация конструкции датчика, разработка и изготовление многоканальной системы регистрации данных (с отдельными каналами записи для каждой сетки), которую можно будет разместить в непосредственной близости от датчика (внутри вакуумной камеры).

Результаты проведенных исследований показали, что при больших углах влета микрочастицы в датчик увеличивается число потерь микрочастиц за счет удара их в измерительные сетки. Этого можно избежать, если увеличивать прозрачность сеток.

Погрешность проведенных измерений, скорее всего, связана с погрешностью изготовления и крепления сеток (порядка 0.5 мм). Погрешность измерения увеличивается при увеличении угла падения микрочастицы, что, скорее всего, связано с большой погрешностью измерения V_x и V_y , вызванной малыми расстояниями между сетками C_2 и C_3 , C_4 и C_5 . Дополнительно проводить измерение скорости микрочастиц можно путем анализа формы наведенного импульса,

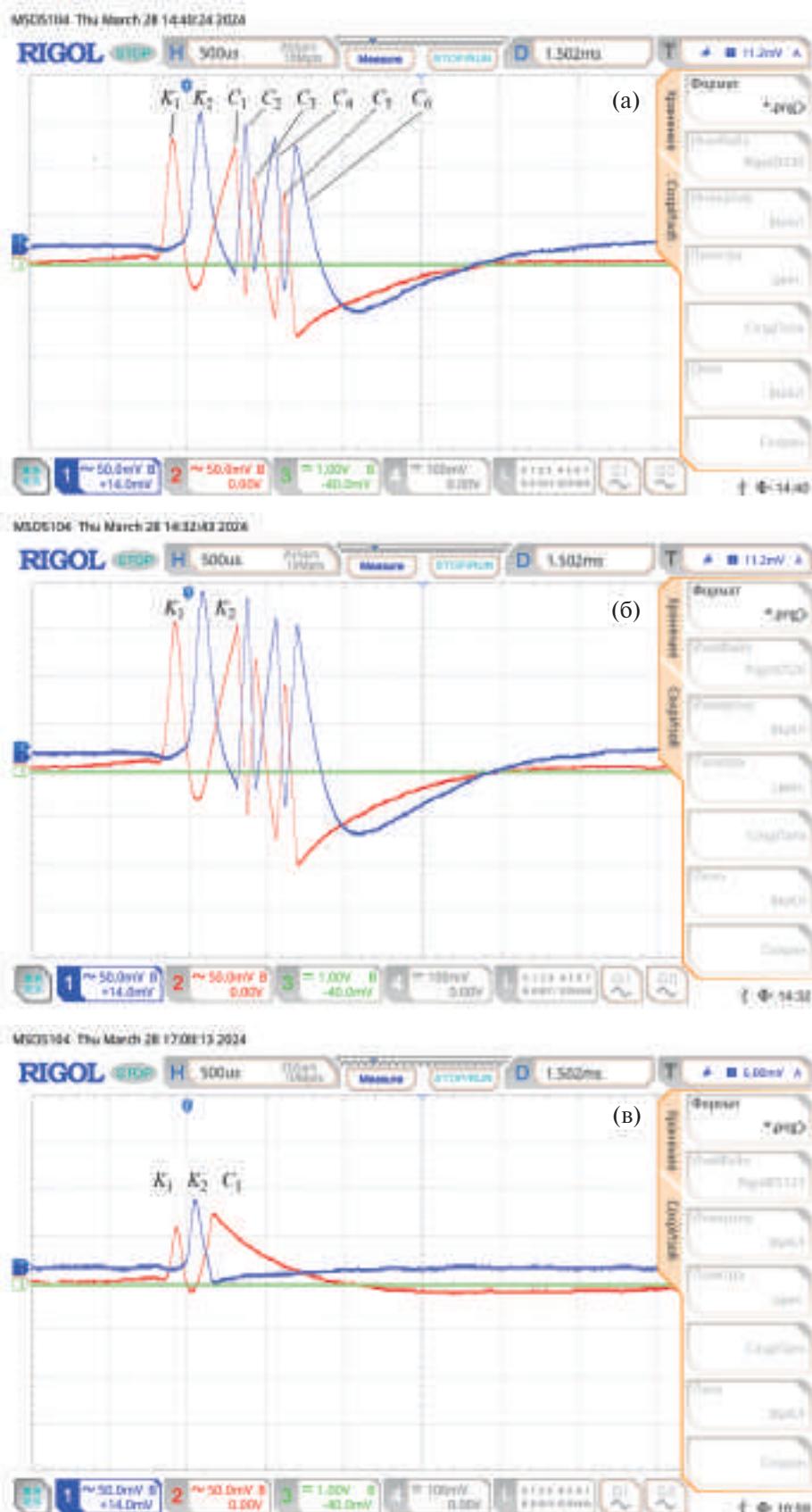


Рис. 5. Примеры осциллографов наведенных импульсов: **а** – ось датчика расположена под нулевым углом относительно оси тракта ускорителя; **б** – ось датчика расположена под углом 25° относительно оси тракта ускорителя; **в** – осциллографма, демонстрирующая удар микрочастиц в сетку C_1 .

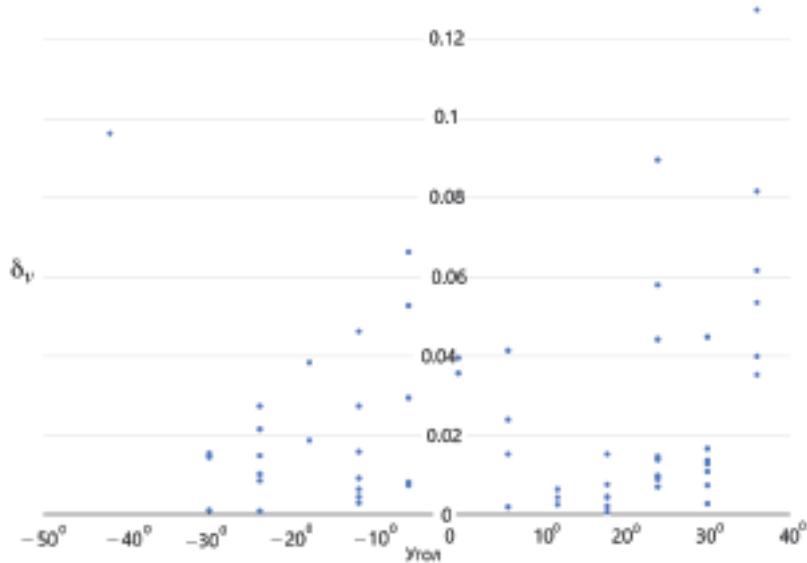


Рис. 6. Погрешность измерения модуля скорости в зависимости от угла влета микрочастицы.

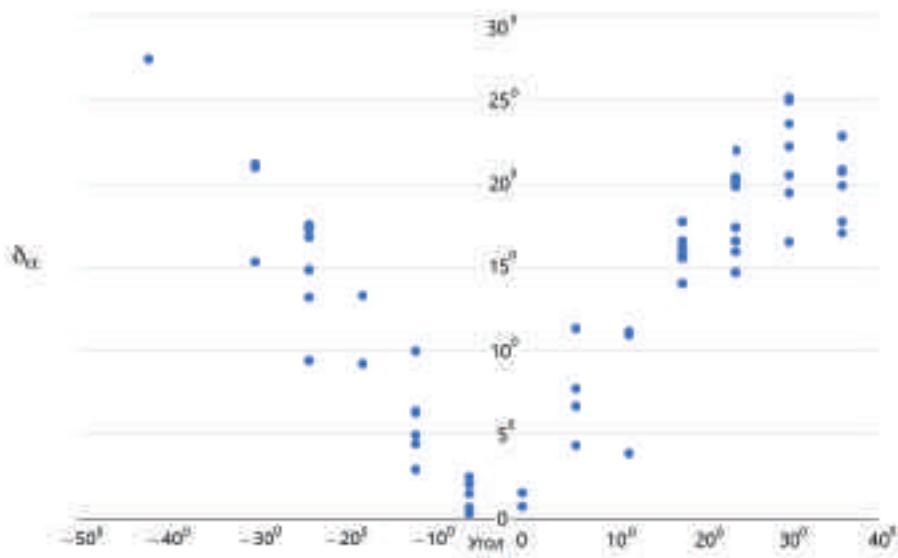


Рис. 7. Погрешность измерения угла в зависимости от угла влета микрочастицы δ_a .

так как, согласно рис. 5а, 5б, вид наведенного импульса зависит от угла влета микрочастицы. У такого метода, скорее всего, погрешность будет больше, чем у метода измерения временных отсчетов, что связано с неточностью оценки амплитуды импульсов и с влиянием внутренних и внешних шумов [8, 17]. С другой стороны, комбинация этих двух способов в дальнейшем позволит сократить количество измерительных сеток, а значит, уменьшатся масса и габариты датчика, что важно для применения на космических аппаратах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов В.В., Толкач М.А.// Космическая техника и технологии. 2022. № 1(36). С. 125.
<https://doi.org/10.33950/spacetech-2308-7625-2022-1-125-143>
2. Auer S., Grün E., Kempf S., Srama R., Srowig A., Sternovsky Z., Tschernjawska V. // Rev. Sci. Inst. 2008. V. 79. 084501.
<https://doi.org/10.1063/1.2960566>
3. Xie J., Sternovsky Z., Auer S., Drake K., Grün E., Horanyi M., Le H., Srama R. // Planetary and Space Science. 2013. V. 89. P. 63.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.01.004>

4. Auer S. // Optica Acta. 1982. V. 29. № 10. P. 1421.
<https://doi.org/10.1080/713820766>
5. Auer S. // Rev. Sci. Instrum. 1975. V. 46. № 2. P. 127.
<https://doi.org/10.1063/1.1134155>
6. Horányi M. // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1996. V. 34. P. 383.
<https://doi.org/10.1146/annurev.astro.34.1.383>
7. Auer S., Grün E., Srama R., Kempf S., Auera R. // Planetary and Space Science. 2002. V. 50. P. 773.
[https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00019-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00019-3)
8. Li Y., Kempf S., Simolka J., Strack H., Grün E., Srama R. // Advances in Space Research. 2017. V. 59. P. 1636.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.037>
9. Телегин А.М., Воронов К.Е., Шестаков Д.А.// Инженерная физика. 2024. № 1. С. 49.
<https://doi.org/10.25791/infizik.1.2024.1381>
10. Воронов К.Е., Пияков И.В., Калаев М.П., Телегин А.М. // ПТЭ. 2023. № 6. С. 135.
<https://doi.org/10.1134/S0020441223040176>
11. Поклонский Н.А., Вырко С.А., Кочерженко А.А.// ЖТФ. 2004. Т. 74. № 11. С. 75.
12. Калаев М.П., Родина А.В., Телегин А.М., Исмагилова Е.В. // ПТЭ. 2023. № 6. С. 142.
<https://doi.org/10.1134/S0020441223060027>
13. Wang W., Xue W., Wu S., Mu Z., Yi J., Tang A.J. // Materials. 2022. V. 15. P. 3871.
<https://doi.org/10.3390/ma15113871>
14. Weiner I., Rust M., Donnelly T.D. // Am. J. Phys 2001. V. 69. P. 129.
<https://doi.org/10.1119/1.1311785>
15. Пияков А.В., Телегин А.М.// ПТЭ. 2022. № 4. С. 106.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222040243>
16. Thomas E., Simolka J., DeLuca M., Horányi M., Janches D., Marshall R.A., Munsat T., Plane J.M.C., Sternovsky Z. // Rev. Sci. Instrum. 2017. V. 88. P. 034501.
<https://doi.org/10.1063/1.4977832>
17. Воронов К.Е., Телегин А.М., Сухачев К.И., Калаев М.П.// УПФ. 2020. Т. 8. № 6. С. 411.