

Оценка эффективности зарядки алюминиевых частиц микронных размеров в электростатическом инжекторе

С. С. Авторин^{1,2*}, С. А. Бедняков¹, О. М. Марченко¹, Н. Б. Акимов¹, О. Б. Дзагуров¹, О. П. Глотов¹, Н. Г. Чеченин^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 25.03.2026; подписана в печать 28.03.2026)

Корректная оценка рисков снижения или потери функциональности открытых поверхностей и приборов космического аппарата базируется, в том числе, на лабораторных испытаниях устойчивости соответствующих материалов к ударному воздействию частиц имитирующих поток твердых частиц в лабораторных условиях. В работе был получен зарядовый спектр частиц алюминиевой пыли ПАП-1 с помощью стенда, состоящего из электростатического инжектора, блока контроля параметров и исследовательской камеры. Экспериментальный спектр также был соотнесен с теоретическим. Получены распределения таких физических параметров частиц, как размер, скорость и масса.

PACS: 29.20.Va

УДК: 620.18.

Ключевые слова: ускоритель твердых частиц, электростатический инжектор, микрометеориты, космическая пыль, космический мусор.

ВВЕДЕНИЕ

По мере изучения и освоения околоземного космического пространства и проникновения в дальний космос все более увеличиваются времена эксплуатации различных приборов и аппаратуры в режиме автономного полета. При этом определенная часть аппаратуры постоянно подвергается воздействию различных факторов космического пространства. Одним из них является высокоскоростное воздействие метеороидной материи, космического мусора и космической пыли. Это воздействие приводит к постепенному — а иногда и резкому в случае крупного размера частиц — изменению различных свойств (механических, электрических, оптических) поверхностей конструкционных материалов и рабочих характеристик приборов. Метеороиды — космические тела с размерами от 100 мкм до 10 м, занимают промежуточное положение между космической пылью и астероидом. Тела с размерами от 10 мкм до 2 мм называют микрометеороидами. Их источниками выступают пояс астероидов, хвосты комет, фрагменты планет и спутников. Космическая пыль — частицы с размером от нескольких молекул до 10 мкм. Она состоит в основном из кометной пыли, астероидной пыли, пыли с пояса Койпера, звездной пыли, которая в свою очередь представляет собой тугоплавкие минералы, оставшиеся в процессе звездной эволюции. Космический мусор — множество объектов техногенного происхождения от продуктов работы ракетных двигателей и частиц краски до вышедших из строя космических аппаратов и ступеней

ракет. Столкновения с частицами более 0.5–1 см со скоростью свыше 10 км/с могут привести к сквозным пробоинам в корпусах космических аппаратов, в то время как потоки космической пыли размером скоростью от 1 до 100 км/с (относительно космического аппарата) при длительном воздействии способны повредить оптические стекла, солнечные батареи и терморегулирующие покрытия. В связи с этим вопросы устойчивости элементов такой аппаратуры к воздействию ударов быстрых твердых микрочастиц имеют первостепенное значение.

Разработка и создание надежной аппаратуры, предназначенной для работы в указанных условиях, и прогнозирование ее поведения при длительной эксплуатации в таком режиме требует ясного представления о характере повреждений, производимых ударами быстрых частиц микронных размеров в различных материалах и элементах приборов, и влиянии этих повреждений на определенные их свойства. Для изучения явлений, связанных с ударным воздействием высокоскоростных микрочастиц на поверхности различных материалов, весьма полезным являются лабораторные эксперименты с использованием имитаций микрометеоритных потоков, для получения которых применяются различные методы разгона твердых частиц до больших скоростей. Один из способов ускорения микрочастиц — ускорение предварительно заряженных частиц в постоянном электрическом поле в вакууме. Достоинством этого метода является возможность получения хорошо контролируемого потока быстрых (заряженных) частиц, параметры которого можно регулировать в достаточно широких пределах. Кроме того, в условиях вакуума легко свести к минимуму возможность посторонних загрязнений исследуемых поверхностей [1–4].

* avtorin.sema@mail.ru

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДОВ

Общая схема установки, предназначенной для электростатического ускорения частиц представлена на рисунке 1. В инжекторе (И) твердые нейтральные частицы получают положительный электрический заряд и поступают в ускорительную трубку (ТУ), к концам которой приложена ускоряющая разность потенциалов. После ускорения в трубке частицы проходят через блок контроля параметров (БКП) и попадают в исследовательскую камеру (ИК).

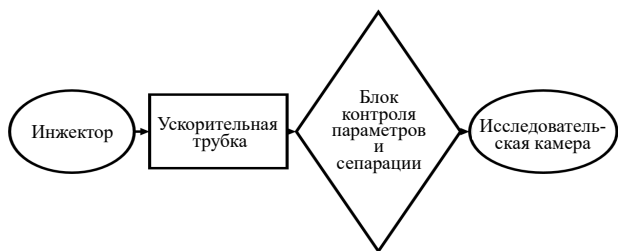


Рис. 1. Схема установки для электростатического ускорения частиц

В данной работе же использовался несколько упрощенный вариант: стенд состоял из инжектора, блока контроля параметров и исследовательской камеры. Ускорительная трубка не использовалась.

Схема инжектора также представлена на рис. 2. Твёрдые микрочастицы ускоряются по электростатическому принципу. На внутреннюю поверхность центрального сферического электрода помещаются частицы, которые при наличии электрического поля между верхним и средним электродами совершают хаотическое движение в этом пространстве. В процессе такого движения частицы попадают на иглу (в качестве которой выступает направленный пучок углеродных волокон) электрода, получают при контакте с иглой одноимённый электрический заряд и затем выбрасываются электрическим полем электрода в ускорительную трубку.

Блок контроля параметров (рис. 3) ускоренных частиц, помещенный между ускорительной трубкой и исследовательской камерой, служит для определения скорости и зарядов пролетающих частиц. Он состоит из 2-х тонкостенных медных пролетных цилиндрических датчиков диаметром 3 и длиной 7 см, расположенных один под другим на расстоянии 60 см (частицы индуцируют в них токовые импульсы), зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ) и осциллографа [5]. Пример показаний осциллографа представлен на рис. 4. Амплитуды импульсов на выходе усилителей пропорциональны заряду пролетевшей через датчик частицы, а временной промежуток между ними определяет скорость.

В данной работе измерялся зарядовый спектр частиц алюминиевого порошка марки ПАП-1 с размерами от 1 до 100 мкм и более (рис. 5).

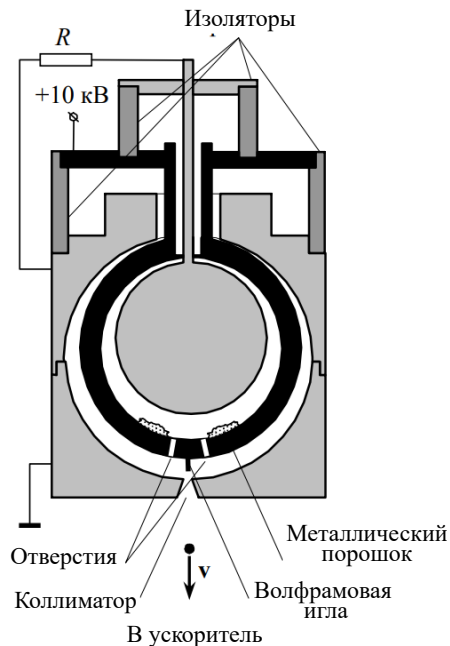


Рис. 2. Схема инжектора НИИЯФ МГУ

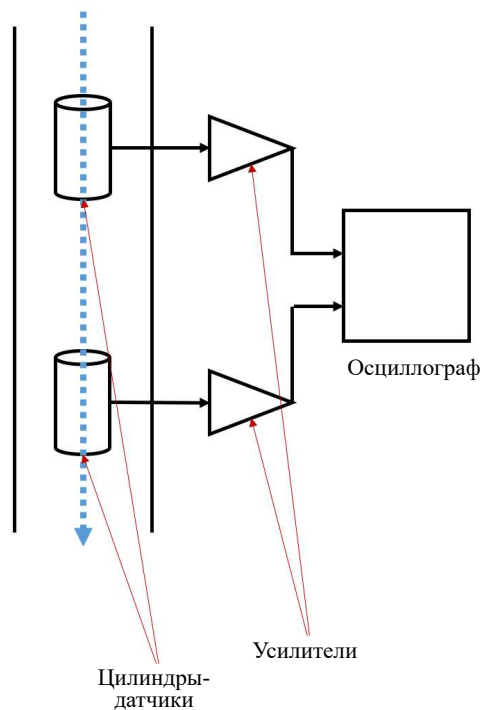


Рис. 3. Схема блока контроля параметров

Заряд Q и скорость V пролетающей частицы определялись с помощью соотношений:

$$Q = k \cdot u, \tag{1}$$

$$V = \frac{L}{\Delta t}, \tag{2}$$

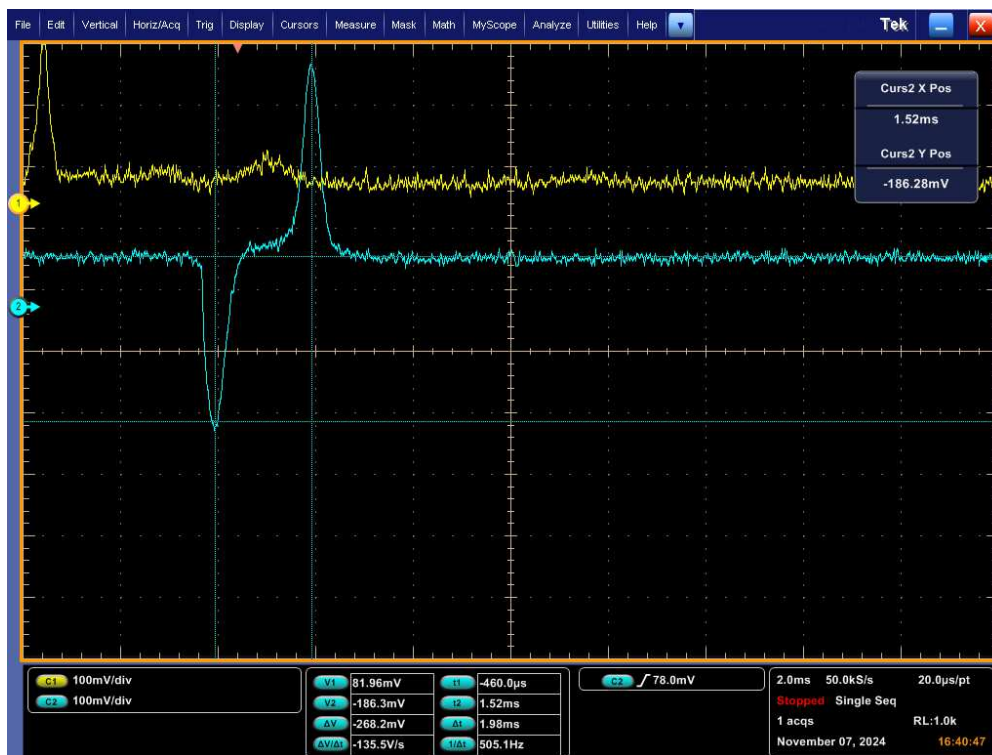


Рис. 4. Пример показаний осциллографа при пролете частицы

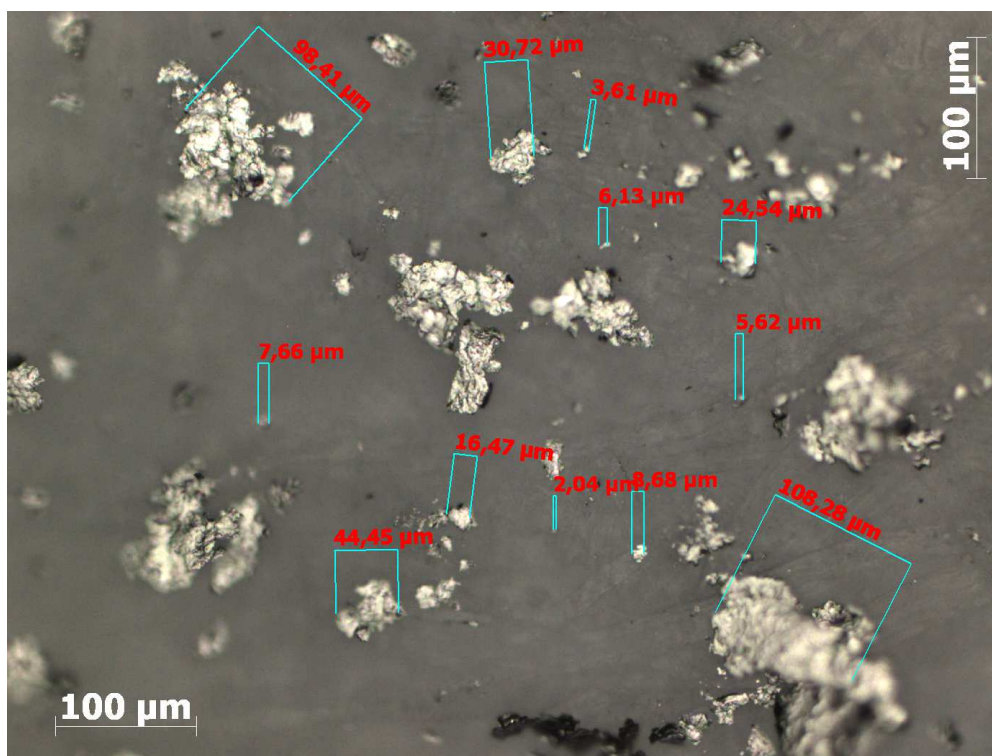


Рис. 5. ПАП-1 под оптическим микроскопом

где k — коэффициент усиления ЗЧУ, u — амплитуда сигнала на выходе ЗЧУ, L — размер цилиндра-датчика,

Δt — длительность между двумя пиками сигнала одного датчика.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Зарядовые распределения при напряжении на вольфрамовой игле 5 кВ, 10 кВ и 15 кВ приведены на рис. 6.

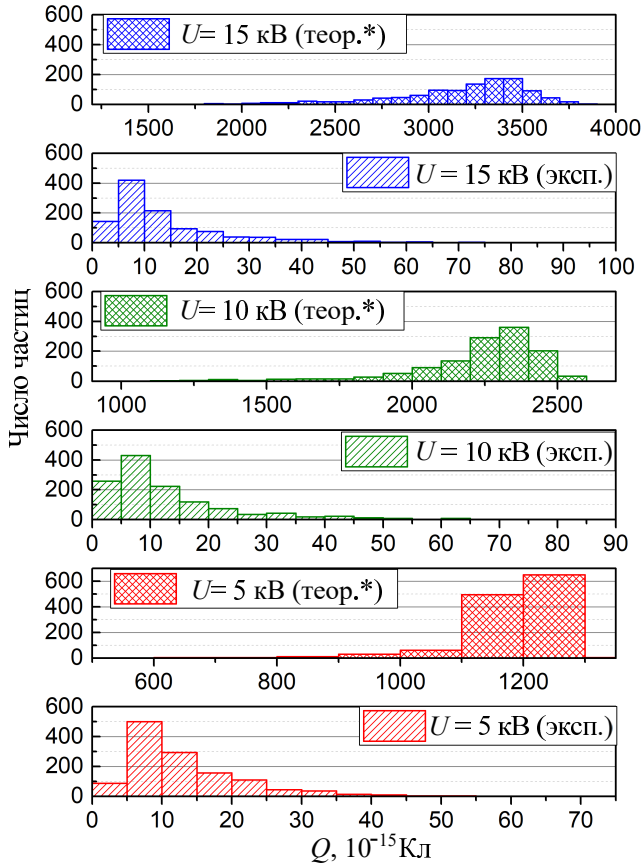


Рис. 6. Распределения потоков ускоренных частиц ПАП-1 по величинам зарядов экспериментальных и теоретических для разных напряжений на игле инжектора

Измеренный зарядовый спектр был сопоставлен с теоретическим зарядовым спектром, который может получить сферическая частица радиуса r при контакте со сферическим электродом радиуса R , находящимся под потенциалом U_{el} и который рассчитывался по формуле:

$$Q_{theor} = \frac{2\pi^3\epsilon_0}{3} \cdot \frac{Rr^2}{(R+r)^2} \cdot U_{el} = \frac{2\pi^3\epsilon_0}{3} \cdot \frac{R^2r^2}{(R+r)^2} \cdot E_{el}, \quad (3)$$

где $E_{el} = \frac{U_{el}}{R}$ — напряженность поля на поверхности электрода, ϵ_0 — электрическая постоянная.

Также зарядовые спектры были построены для сферической пыли АСД-1, данные по которой были получены из работы [5] (рис. 7).

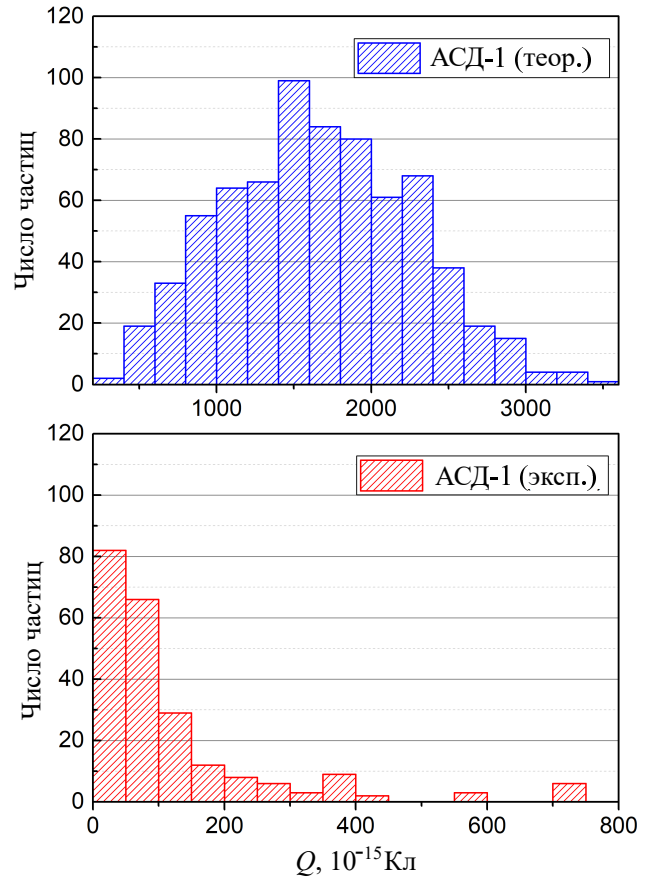


Рис. 7. Распределения потоков ускоренных частиц АСД-1 по величинам зарядов экспериментальных и теоретических

Для определения массы и размеров частиц были использованы следующие соотношения:

$$m = \frac{2U_{el}Q}{V^2}, \quad (4)$$

$$d = \left(\frac{m}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Соответственно были построены спектры для скоростей, массы и размеров частиц при разных напряжениях на игле (рис. 8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы был продемонстрирован метод электростатического ускорения частиц микронных размеров. Были получены спектры зарядов, скоростей, масс и характерных размеров ускоренных частиц. В случае зарядового спектра было выполнено сопоставление экспериментальных значений для частиц ПАП-1

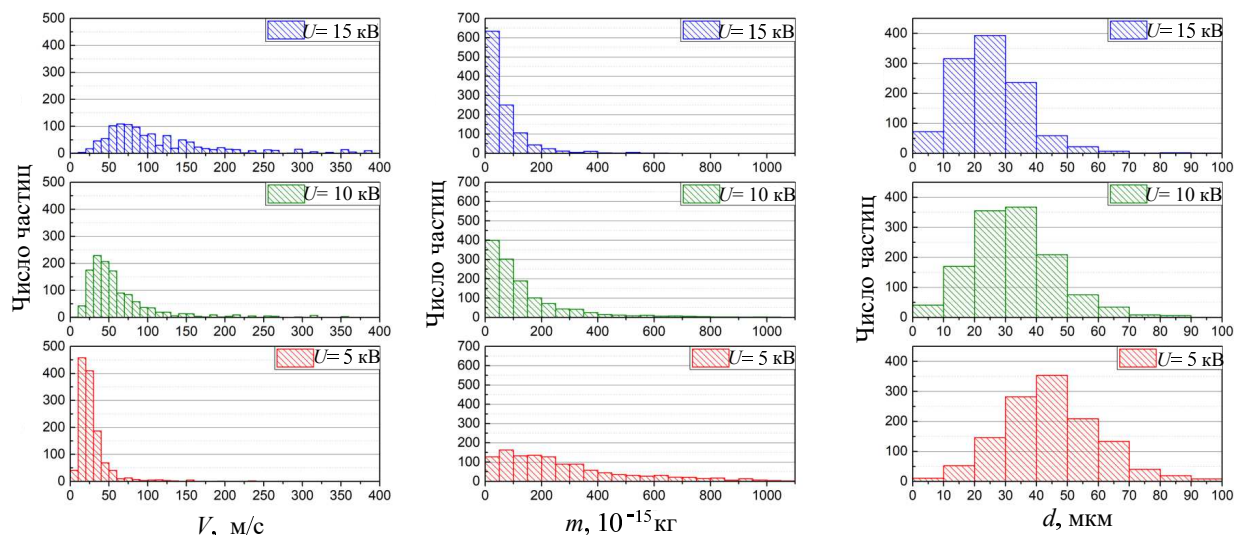


Рис. 8. Спектры скоростей, масс и характерных размеров частиц в зависимости от напряжения на игле

и АСД-1 с теоретически рассчитанными для сферических частиц. Расхождение экспериментальных и теоретических данных вполне возможно объясняется тем, что используемая в работе формула не дает адекватно-

го описания различных вероятных процессов, происходящих при зарядке частиц в инжекторе. Исследования влияния формы микрочастицы на эффективность зарядки в электростатическом инжекторе продолжают.

- [1] Shelton H., Hendricks C.D., Wuerker R.F. // J. Appl. Phys. **31**(7), 1243 (1960).
 [2] Akishin A.I., Blyudov E.V., Vasilev S.S. et al. // Instruments and Experimental Techniques. **6**. 1761 (1970).

- [3] Shu A., Collette A., Drake K. et al. // Rev. Sci. Instrum. **83**(7), 075108 (2012).
 [4] Bednyakov A.A., Gilyarov R.A., Dzagurov O.B. et al. // Instruments and Experimental Techniques. **41**. 284 (1998).
 [5] Марченко О.М., Бедняков С.А., Авторин С.С. и др. // Письма в ЖТФ. **51**. 45 (2025).

Estimation of the charging efficiency of micron-sized aluminum particles in an electrostatic injector

S. S. Avtorin^{1,2a}, S. A. Bednyakov¹, O. M. Marchenko¹, N. B. Akimov¹,
 O. B. Dzagurov¹, O. P. Glotov¹, N. G. Chechenin^{1,2}

¹Skobeltsyn Research Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University
 Moscow 119991, Russia

²Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^aavtorin.sema@mail.ru

The correct assessment of the risks of reducing or losing the functionality of the open surfaces and instruments of the spacecraft is based, inter alia, on laboratory tests of the resistance of the relevant materials to the impact of particles simulating the flow of solid particles in laboratory conditions. In this work, the charge spectrum of PAP-1 aluminum dust particles was obtained using a stand consisting of an electrostatic injector, a parameter control unit, and a research chamber. The experimental spectrum was also correlated with the theoretical one. The distributions of such physical parameters of particles as size, velocity, and mass are obtained.

PACS: 29.20.Ba.

Keywords: solid particle accelerator, electrostatic injector, micrometeorites, cosmic dust, space debris.

Received 25 March 2026.

Сведения об авторах

1. Авторин Семен Сергеевич — аспирант, e-mail: avtorin.sema@mail.ru

2. Бедняков Сергей Александрович — главный специалист, тел.: (495)-939-55-58, e-mail: blackcat_2@mail.ru
3. Марченко Олег Михайлович — ведущий инженер, тел.: (495)-939-55-58, e-mail: oleg.marchenko.99@bk.ru
4. Акимов Николай Борисович — ведущий электроник, тел.: (495)-939-24-75, akimov-akai@yandex.ru
5. Дзагуров Олег Борисович — главный инженер ускорителя, тел.: (495)-939-32-80
6. Глотов Олег Павлович — ведущий электроник, тел.: (495)-939-32-80
7. Чеченин Николай Гаврилович — доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом, тел.: (495)-939-23-48, e-mail: chechenin@sinp.msu.ru