

Моделирование системы управления электродинамического ускорителя пылевых частиц

А.В. Пияков¹, Д.В. Родин¹, М.А. Родина¹, А.М. Телегин¹, С.Н. Кондратьев¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Рассмотрено устройство и система управления ускорителя заряженных микронных частиц для моделирования микрометеоритов и техногенных частиц в лабораторных условиях. Описана модель работы системы управления ускорителем, приведены результаты моделирования функционирования системы управления ускорителем для различных режимов работы. Представлены результаты сравнения математического моделирования с экспериментальными данными.

1. Введение

В последние годы сохраняется тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орбитах. По некоторым данным уже сейчас концентрация техногенных пылевых частиц в три раза превышает концентрацию микрометеоритов естественного происхождения. С учетом все повышающихся требований к надежности и долговечности космических аппаратов (КА), а также в связи с появлением множества новых материалов необходимо дальнейшее развитие исследований процессов взаимодействия высокоскоростных пылевых частиц с материалами элементов конструкций КА [1-3].

Стоит отметить, что в последнее время в космической промышленности появляются и находят применение новые материалы, что обуславливает необходимость проведения ударных экспериментов. По проблеме защиты космических материалов от микрометеоритов регулярно проводятся конференции. Техника высокоскоростного метания представляет собой интерес не только с точки зрения моделирования воздействия факторов космической среды на материалы конструкций КА, но и с точки зрения подпитки термоядерных реакторов топливом. Таким образом, очевидной необходимостью является построения различных ускорителей, которые охватывают весь диапазон масс требуемых частиц.

Для имитации воздействия микрометеоритов и техногенных частиц на материалы конструкций КА, а также для создания и калибровки новых микрометеоритных датчиков существуют различные способы ускорения пылевых частиц в лабораторных условиях. Тип и конструкция ускорителя определяется поставленной задачей и зависит от диапазона исследуемых масс и скоростей ускоряемых частиц.

Основным элементом ускорителя является система управления ускорителем пылевых частиц, которая формирует ускоряющие напряжения на трубках дрейфа. Решить проблему точности формирования напряжений можно по разному: например, в [4] авторы, используя

модификацию линейного электростатического ускорителя, исключают из процесса ускорения все частицы с удельным зарядом, отличным от 30 Кл/кг. Другие исследовательские коллективы [5] используют в своих исследованиях ускорители на базе источников высокого напряжения Ван-де-Граафа, которые не требуют сложных схем управления, однако слишком громоздки.

Из вышесказанного следует, что для построения компактных ускорительных установок для прикладных исследований необходимым является разработка высокоточных систем управления. Данная статья посвящена моделированию работы системы управления электродинамического ускорителя пылевых частиц в нестандартных режимах работы ускорителя, вызванных запыленностью ускорительного тракта.

2. Конструкция ускорителя пылевых частиц

Для проведения экспериментов по соударению высокоскоростных частиц с материалами конструкций космических аппаратов нами был разработан и построен ускоритель [3-8], который позволяет моделировать в лабораторных условиях столкновения микрометеоритов размером $1 \div 10$ мкм и скоростями $1 \div 15$ км/с с различными материалами.

На рисунке 1 приведена структурная схема линейного ускорителя для моделирования микрометеоритов, тракт которого состоит из инжектора, линейного электростатического ускорителя (ЛЭСУ), линейного электродинамического ускорителя (ЛЭДУ), трех измерительных линеек и камеры для экспериментов. Вакуум в системе обеспечивают две откачные системы, каждая из которых состоит из вакуумного диффузионного масляного агрегата АВМД -250, форвакуумного насоса НВПР-16 и необходимых задвижек (КВЭ-63). Предельное остаточное давление в системе составляло 10^{-5} мм.рт.ст.

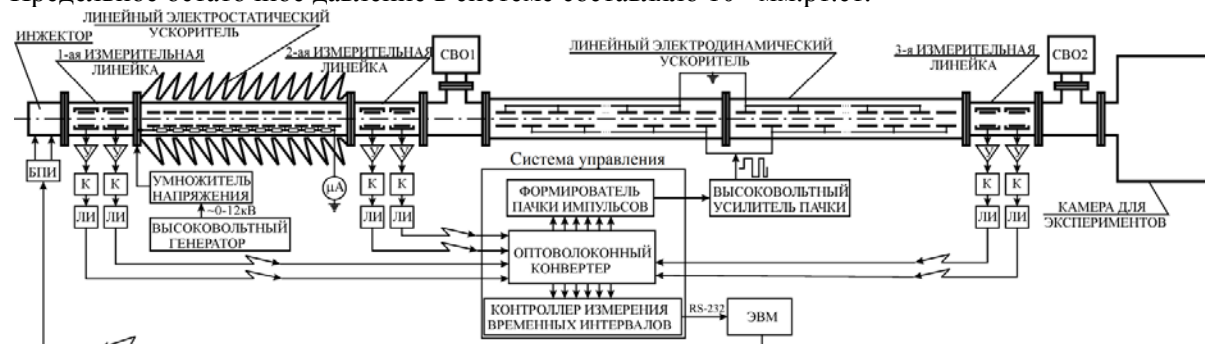


Рисунок 1. Структурная схема линейного ускорителя микрометеоритов.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: У – усилитель; К – компаратор; ЛИ – лазерный излучатель; ВСО1, ВСО2 – система вакуумной откачки 1 и 2, соответственно; БПИ – блок питания инжектора.

Ускоритель работает следующим образом. Инжектор генерирует заряженные частицы в заданном диапазоне масс с частотой порядка 1 Гц. Заряженная частица последовательно проходит первый индукционный датчик, линейный ускоритель, второй индукционный датчик, цилиндрические электроды, третий индукционный датчик и попадает на мишень. Первая пара индукционных датчиков и линейный ускоритель предназначены для определения параметров частицы (удельного заряда Q/m и начальной скорости V_0). Пролетая внутри индукционного датчика, частица наводит на него потенциал, обратный по знаку заряду частице. Так как датчик изготовлен из металла, то его поверхность эквипотенциальна, а значит, не имеет значения с какой части снимать напряжение. По поступающим с индукционных датчиков сигналам селектор скоростей и селектор удельных зарядов формируют на своих выходах цифровой код начальной скорости частицы и код ее удельного заряда. В селекторе скоростей измеряются временные интервалы пролета частицей центров датчиков для первого и второго индукционных датчиков. Измеренные временные интервалы прямо пропорциональны скорости движения частицы. Пройдя через линейный ускоритель, частица получает приращение

скорости. Аналогично первому датчику работает второй. По поданным в генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке кодам начальной скорости и удельного заряда на его выходе формируется пачка импульсов, которая создает ускоряющее поле между каждой парой электродов. Данное поле меняется во времени соответственно положению частицы в ускоряющем тракте. Параметры пачки выбираются из ряда данных для формирования импульсов, заранее заложенных в генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке с ЭВМ. Усилитель пачки импульсов переменной длительности усиливает сформированные генератором изменяемые во времени частоты и длительности импульсов в пачке импульсы. Усиленные импульсы поступают на цилиндрические электроды. Третий индукционный датчик подключен к блоку сопряжения и служит для получения выходных данных. Затем уже ускоренная частица попадает на мишень и весь процесс повторяется. ЭВМ производит статистику эксперимента и динамическое управление ускорителем.

3. Описание системы управления электродинамическим ускорителем

Для обеспечения функционирования электродинамического контура ускорителя микрометеоритов разработана система управления, функциональная схема которой приведена на рисунке 2.

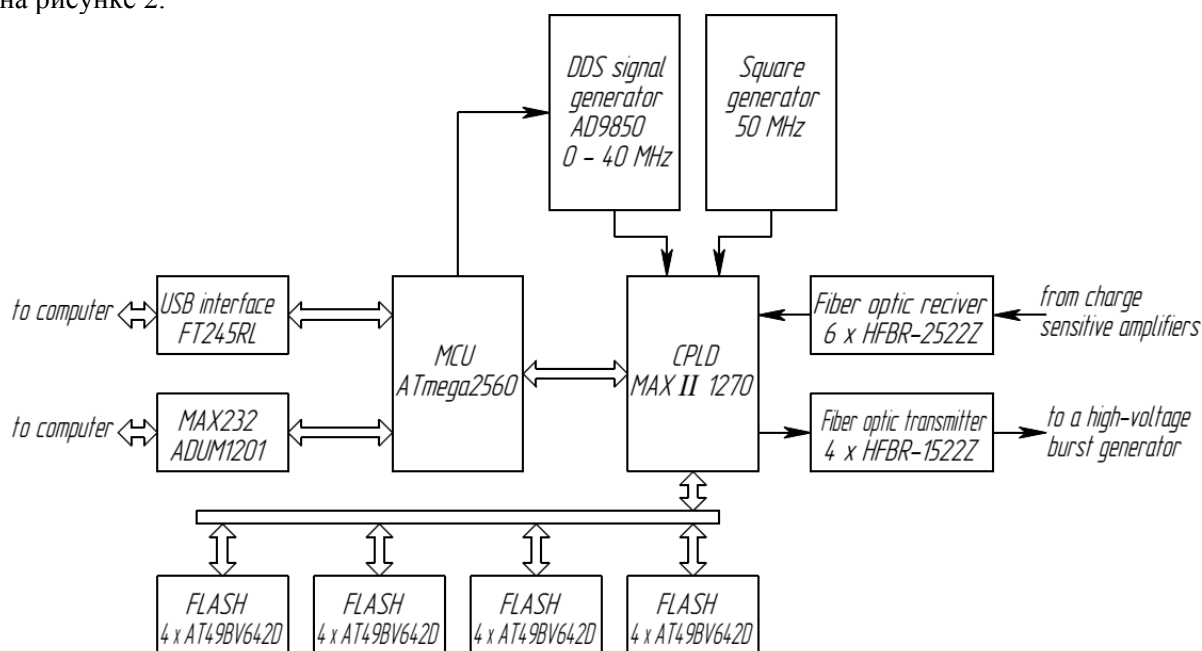


Рисунок 2. Функциональная схема системы управления электродинамического ускорителя.

Система управления работает следующим образом. В FLASH памяти записаны интервалы времени между переключениями напряжения на трубках дрейфа линейного электродинамического ускорителя. По поступающим на CPLD MAXII 1270 сигналам с оптических приемников определяется скорость частицы до и после линейного электростатического ускорителя. Коды скоростей поступают на шину адреса FLASH памяти для выбора требуемой пачки импульсов, соответствующей ускоряемой частице. Реализованный на CPLD счетчик начинает считать тактовые импульсы DDS генератора. При совпадении количества импульсов на счетчике и числа в памяти FLASH происходит формирование импульсов на оптических передатчиках. Микроконтроллер служит для передачи данных о работе системы в ЭВМ. Для перепрограммирования памяти используется высокоскоростной интерфейс USB, однако, из-за помех данный интерфейс непригоден для передачи данных во

время работы ускорителя. Поэтому в системе управления был реализован более помехозащищенный оптически развязанный интерфейс RS-232.

При загрязнении тракта металлическими пылевыми частицами снижается максимальное ускоряющее напряжение линейного электростатического ускорителя, что требует проведения работ по чистке ускорительного тракта (рисунок 3) [7].

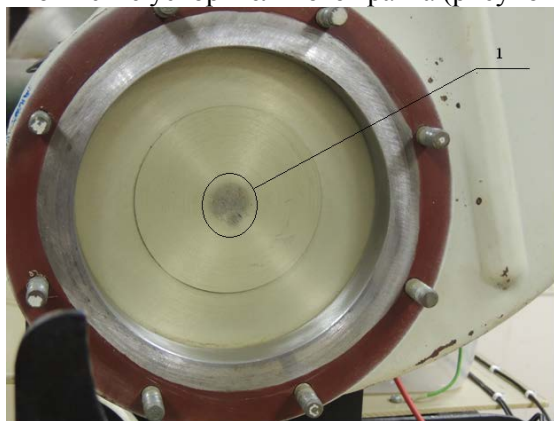


Рисунок 3. Разобранный тракт ускорителя (задвижка в вакуумной камере). 1 – область распыления микрочастиц в тракте.

Подобные работы требуют разборки вакуумной системы и занимают много времени, поэтому необходимо предусмотреть возможность функционирования ускорителя при пониженном ускоряющем напряжении. Такая работа возможна при регулировке частоты тактового генератора, участвующего в формировании импульсов на трубках дрейфа электродинамического ускорителя. Например, при работе на напряжении 80 кВ вместо расчетных 100 кВ требуется перестройка частоты с расчетных 10 МГц до 12,403 МГц.

На рисунке 4 приведена зависимость времени регистрации частиц на пятом кольце Фарадея от удельного заряда частиц. Точками показаны экспериментально измеренные данные, сплошной линией – времена ожидания, заложенные во FLASH память формирователя.

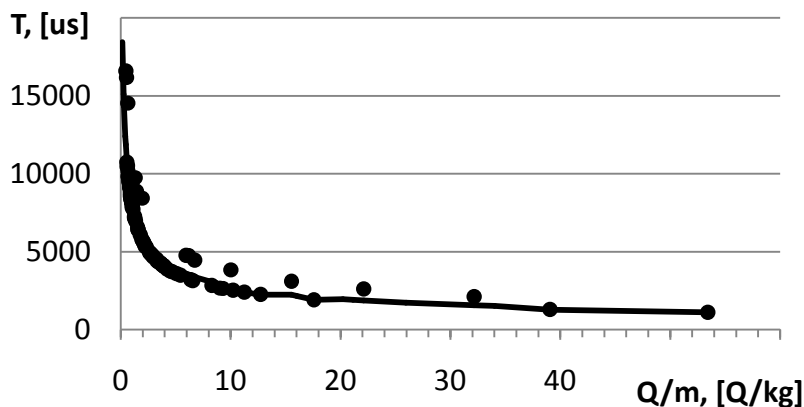


Рисунок 4. Зависимость времени регистрации частицы на пятом индукционном датчике от удельного заряда.

На рисунке 5 показана зависимость скорости частиц от удельного заряда. Точки – экспериментальные данные, прямая – расчетная скорость. Точки значительно выше и ниже расчетной кривой – частицы, для которых потеряна синхронизация ускоряющих импульсов.

Как видно из рисунков 4 и 5, корректировка частоты при пониженном напряжении электростатического ускорителя способствует нормальному функционированию электродинамического ускорителя, при этом большая часть частиц пролетает тракт динамической части.

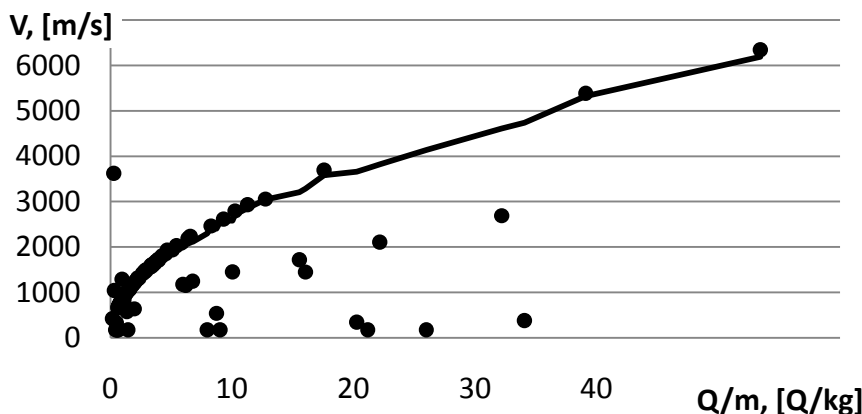


Рисунок 5. Зависимость скорости регистрации частицы на третьей измерительной линейке от удельного заряда.

4. Результаты моделирования

С целью верификации полученных экспериментальных данных авторами было модифицировано программное обеспечение, описанное в [8], которое включает в себя:

- класс, описывающий состояние каждой частицы (составляющие ее вектора скорости, координаты, время пролета, значения отношения массы к заряду для ускорения напряжением 80 кВ и 100 кВ);
- массив, содержащий двумерное распределение поля в трубках дрейфа, рассчитанное исходя из условия осесимметричности задачи. Сетка ячейки имеет шаг $9,775 \cdot 10^{-5}$ м, что соответствует разбиению 10 см участка на 1023 интервала или 1024 узла;
- итеративный метод расчета движения частицы, основанный на алгоритме Рунге-Кутты, дополненный проверкой на синхронизацию времени пролета частицы с требуемыми временами переключений на трубках дрейфа, в случае несоответствия при расчете текущего шага все значения поля инвертировались, что вызывало торможение рассинхронизированных частиц;
- метод расчета массива с требуемыми временами переключений напряжений на трубках дрейфа, основанный на вычислении момента нахождения частицы в середине трубки дрейфа в момент коммутации с учетом отличия реального и измеренного отношения массы к заряду;
- метод генерации модельных пакетов с Максвелловским распределением скорости, соответствующим распределению потока, полученного в инжекторе частиц, реализованный с использованием алгоритма Бокса-Мюллера с последующим суммированием составляющих вектора скорости и нормировкой по наиболее вероятной энергии;
- методы записи и чтения файлов с параметрами частиц, точек траекторий, а также генерации заголовочных файлов для параллельной реализации алгоритма.

Параллельная реализация алгоритма отличается хранением исходных матриц с параметрами частиц и значений сетки поля в виде внешних заголовочных файлов, написана на языке С и фактически реализует только модули, требуемые непосредственно для расчета траекторий. Многопоточность обеспечивалась подключением библиотеки MPI. Расчет велся для взаимонезависимых частиц, поэтому каждая задействованная нода использовалась для вычисления только определенной части траекторий.

На начальном этапе происходило моделирование реальных частиц с известными параметрами входных, выходных скоростей и отношения массы к заряду. Для каждой частицы рассчитывались времена коммутации, все частицы стартовали из центра первой трубки дрейфа с заданными скоростями. Траектории частиц рассчитывались итеративным методом, интерполяция поля производилась, исходя из предположения, что частицы имеют только положительную координату по радиальной оси. Для этого в функции интерполятора добавлена операция взятия модуля от радиальной координаты частицы. Интерполяция происходила для участка поля 1 см x 10 см, соответственно, координата x внутри функции интерполятора всегда

должна лежать в пределах $0 \div 0,1$ м. Операция интерполирования поля для частиц, имеющих отрицательную радиальную координату, возвращала инвертированную радиальную составляющую поля, для чего использовался флаг отрицательной радиальной координаты. Проверка синхронного движения частицы в тракте осуществлялась сравнением текущего времени пролета частицы с временами коммутации из массива для текущего номера трубки дрейфа. Инверсия составляющих поля в этом случае происходила, если время пролета было меньше меньшего или больше большего соседнего времени коммутации. Промежуточные точки траекторий сохранялись при пролете центров трубок дрейфа. Расчет заканчивался либо вылетом за внутренний радиус трубки, равный 1 см, либо пролетом центра сороковой трубки. Результаты моделирования приведены на рисунке 6. Экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными, погрешность расчета не превышает 3,5%.

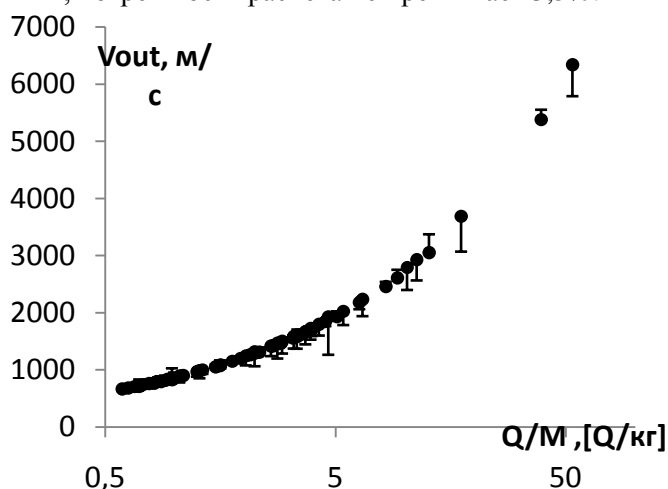


Рисунок 6. Сравнение экспериментальных и модельных данных о скорости частицы на выходе из динамического тракта, планки абсолютной погрешности имеют масштаб 10 к 1.

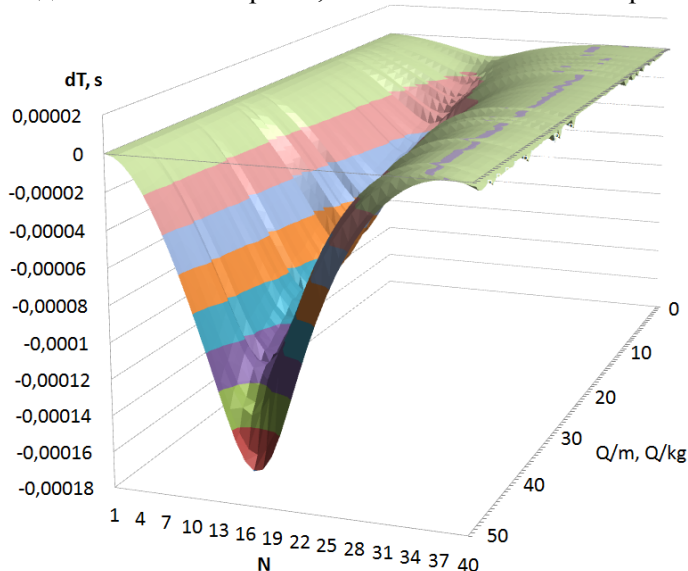


Рисунок 7. Разница между расчетными временами переключения напряжения на трубках дрейфа электродинамического ускорителя, заложенными в FLASH память системы управления и временами нахождения частиц в центрах дрейфовых трубок, полученных при моделировании траекторий движения частиц на суперкомпьютере Сергей Королев

Для проверки работоспособности системы ускорения для большого количества комбинаций параметров частиц был сформирован набор из 16384 частиц с различными начальными характеристиками и различным удельным зарядом. Моделирование движения частиц в тракте динамической части ускорителя производилось с использованием реализации программного

обеспечения для персонального компьютера и для суперкомпьютера Сергей Королев. Результаты моделирования представлены на рисунках 7 и 8.

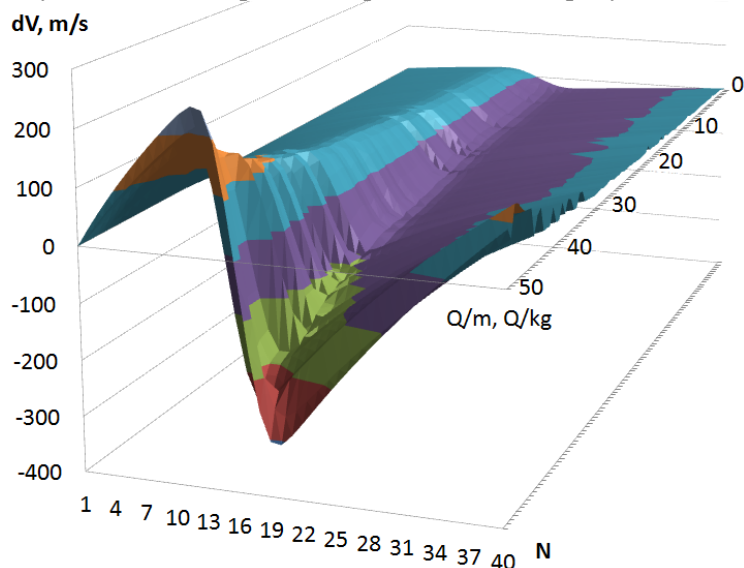


Рисунок 8. Разница между расчетными скоростями частиц во время переключения напряжения на трубках дрейфа электродинамического ускорителя, заложенными в FLASH память системы управления, и скоростями частиц во время их нахождения в центрах дрейфовых трубок, полученных при моделировании траекторий движения частиц на суперкомпьютере Сергей Королев.

Как видно из рисунков 7 и 8, первую половину тракта частицы несколько опережают расчетные времена переключений и, как следствие, сначала ускоряются сильнее расчетного, однако во второй половине тракта подтормаживаются, а разница между расчетными и реальными данными нивелируется.

5. Заключение

По результатам моделирования движения частиц в тракте линейного электродинамического ускорителя можно сделать вывод, что система управления при подстройке частоты импульсов задающего DDS генератора с 10 МГц до 12,403 МГц обеспечивает работоспособность ускорителя при отклонении реального ускоряющего напряжения электростатической секции от расчетного на 20%. Полученные результаты моделирования для реальных частиц хорошо согласуются с экспериментальными значениями, а симуляция работы системы для большого диапазона входных значений позволят выбрать оптимальную частоту переключений без проведения натурного эксперимента.

Реализации программного обеспечения для персонального компьютера и суперкомпьютера показали одинаковую точность вычислений, что объясняется выбором одинаковых параметров расчетной сетки и шага по времени. Версия для персонального компьютера показала большее время выполнения 56 минут 16 секунд против 5 минут 46 секунд у суперкомпьютера, однако в пересчете на один процессор первая обеспечивает обсчет 1,2 миллиона итераций в секунду, а вторая – 740 тысяч итераций в секунду. Потеря производительности может объясняться тем, что версия для персонального компьютера сохраняет все результаты в оперативной памяти, версия же для суперкомпьютера требует пересылки результатов расчетов на управляющую ноду. Данная задача содержит множество взаимонезависимых процессов, поэтому легко реализуется на языках параллельного программирования. Повышение быстродействия может быть достигнуто повышением количества вычислительных узлов. Независимость расчетных потоков обеспечивает пропорциональный рост скорости с ростом количества узлов. Применение кэширования и предварительной обработки результатов на вычислительных нодах может минимизировать количество пересылаемых данных и также увеличить скорость выполнения.

6. Литература

- [1] Семкин, Н.Д. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях / Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов, Л.С. Новиков. – Самара, 2005. – 470 с.
- [2] Райкунов, Г.Г. Космический мусор. В 2 кн. Кн.1. Методы наблюдения и модели космического мусора / науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2014. – 248 с.
- [3] Semkin, N.D. Multilayer film structures under the influence of micrometeoroids and space debris / N.D. Semkin, M.P. Kalaeв, A.M. Telegin, A.V. Piyakov, D.V. Rodin // Applied Physics. – 2012. – Vol. 2. – P. 104-115.
- [4] Slattery, J.C. A Linear Accelerator for Simulated Micrometeors / J.C. Slattery, D.G. Becker, B. Hamermesh, N.L. Roy // Review of Scientific Instruments – 1973. – Vol. 44. – P. 755-762.
- [5] Thomas, E. Experimental setup for the laboratory investigation of micrometeoroid ablation using a dust accelerator / E. Thomas, J. Simolka, M. DeLuca, M. Horányi, D. Janches, R. A. Marshall, T. Munsat, J. M. C. Plane, Z. Sternovsky // Review of Scientific Instruments. – 2017. – P. 1-12.
- [6] Piyakov, A.V. Numerical simulation of motion of dust particles in an accelerator path / A.V. Piyakov, D.V. Rodin, M.A. Rodina, A.M. Telegin // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1902. – P. 55-61.
- [7] Semkin, N.D. Measurements of particle distributions over the cross section of the accelerator channel for simulating micrometeorites / N.D. Semkin, A.V. Piyakov // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Vol. 58(5). – P. 703-707.
- [8] Semkin, N.D. Simulation of micrometeorites using an electrodynamic accelerator / N.D. Semkin, K.E. Voronov, A.V. Piyakov, I.V. Piyakov // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – Vol. 52(4). – P. 595-601.
- [9] Semkin, N.D. A linear accelerator for simulating micrometeorites / N.D. Semkin, A.V. Piyakov, K.E. Voronov, N.L. Bogoyavlenskii, D.V. Goryunov // Instruments and Experimental Techniques. – 2007. – Vol. 50(2). – P. 275-281.
- [10] Telegin, A.M. A study of the performance of an induction sensor for an accelerator of charged microparticles / A.M. Telegin, A.V. Piyakov // Instruments and Experimental Techniques. – 2017. – Vol. 60(6). – P. 875-879.

Simulation of the control system of the electrodynamic accelerator of dust particles

A.V. Piyakov¹, D.V. Rodin¹, M.A. Rodina¹, A.M. Telegin¹, S.N. Kondratiev¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The device and control system of the accelerator of charged micron particles for simulation of micrometeorites and technogenic particles in laboratory conditions is considered. The model of the accelerator control system operation is described, the results of modelling the functioning of the accelerator control system for various operating modes are given. The results of comparison of mathematical modelling with experimental data are presented.

Keywords: accelerator, control system, micrometeorite, burst of impulses, specific charge.