

УДК 537.5

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИТОГИ РОССИЙСКО-ЕВРОПЕЙСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ» НА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЕ «ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ-4»

О.Ф. Петров, А.В. Зобнин, А.М. Липаев, В.Н. Наумкин, А.Д. Усачев, М. Тома, М. Кретчмер, А.А. Иванишин, О.В. Новицкий, О.Д. Кононенко, А.Н. Овчинин, Г.И. Падалка, С.В. Прокопьев, А.М. Самокутяев, Е.О. Серова, С.Н. Рыжиков, О.И. Скрипочка, А.Н. Шкаплеров, С. Кристофоретти, М. Вандт, П.А. Сабуров, О.А. Лукьянова

Докт. физ.-мат. наук, проф., акад. РАН О.Ф. Петров; докт. физ.-мат. наук, в.н.с. А.В. Зобнин; канд. физ.-мат. наук, с.н.с. А.М. Липаев; канд. физ.-мат. наук, с.н.с. В.Н. Наумкин; канд. физ.-мат. наук, с.н.с. А.Д. Усачев (ФГБУН ОИВТ РАН)

Докт. философии, проф. М. Тома; докт. философии М. Кретчмер (Гиссенский университет им. Юстаса Либиха, Германия)

Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации А.А. Иванишин; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации О.Д. Кононенко; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации О.В. Новицкий; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации А.Н. Овчинин; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации Г.И. Падалка; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации С.В. Прокопьев; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации С.Н. Рыжиков; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации А.М. Самокутяев; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации Е.О. Серова; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации О.И. Скрипочка; Герой Российской Федерации, летчик-космонавт Российской Федерации А.Н. Шкаплеров (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

С. Кристофоретти; М. Вандт (астронавты ЕКА)

П.А. Сабуров; О.А. Лукьянова (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Представлены основные результаты российско-европейского космического эксперимента «Плазменный кристалл» на научной аппаратуре «Плазменный кристалл-4» на МКС по итогам 2018–2024 гг. В выполнении работ участвовали 11 космонавтов ЦПК имени Ю.А. Гагарина и два европейских астронавта. Изложена схема управления проведением эксперимента на МКС. Приводятся основные результаты исследований: параметры плазменно-пылевых облаков в положительном столбе газового разряда постоянного тока с переключаемой полярностью и самосогласованная кинетическая модель рассматриваемой системы; эволюция структуры плазменно-пылевого

облака от изотропной к электрореологической струнной жидкости; нелинейных самовозбуждающихся плазменно-пылевых волн большой амплитуды, линейных плазменно-пылевых волн малой амплитуды, возбуждаемых специальным электродом; волн в плазменно-пылевой струнной жидкости; спектров собственных решеточных тепловых продольных и поперечных волн в трехмерной пылевой плазменной структуре; с помощью мощного лазера определена кинематическая вязкость пылевой подсистемы. Главным достижением космического эксперимента является первое в мире экспериментальное получение автономных плазменно-пылевых капель, формируемых не специальными ловушками, а плазменными потоками, стекающими из окружающей плазмы на поверхность микрочастиц. Приводятся примеры оперативного ремонта научной аппаратуры российскими космонавтами. Предлагаются возможные сферы применения полученных результатов в науке и технологиях.

Ключевые слова: пылевая плазма, газовый разряд, плазменно-пылевые структуры, научная аппаратура, космический эксперимент

Preliminary Results of the Russian-European “Plasma Crystal” Space Experiment with the “Plasma Crystal-4” Scientific Equipment. O.F. Petrov, A.V. Zobnin, A.M. Lipaev, V.N. Naumkin, A.D. Usachev, M. Thomas, M. Kretschmer, A.A. Ivanishin, O.V. Novitsky, O.D. Kononenko, A.N. Ovchinin, G.I. Padalka, S.V. Prokopiev, A.M. Samokutyaev, E.O. Serova, S.N. Ryzhikov, O.I. Scripochka, A.N. Shkaplerov, S. Cristoforetti, M. Wandt, P.A. Saburov, O.A. Lukyanova

The paper presents the main results of the Russian-European “Plasma Crystal” space experiment (SE) with the use of the “Plasma Crystal-4” scientific equipment aboard the ISS for 2018–2024. Eleven cosmonauts of the Yu.A. Gagarin Cosmonaut Training Center and 2 European astronauts participated in the work. The paper gives the scheme of managing the experiment on the ISS as well as the main results of the research, notably: parameters of plasma-dust clouds in the positive column of a DC gas discharge with switched polarity and a self-consistent kinetic model of the system under consideration; evolution of the plasma-dust cloud structure from an isotropic to an electrorheological string liquid; parameters of both nonlinear self-excited plasma-dust waves of large amplitude and linear plasma-dust waves of small amplitude excited by a special electrode; parameters of waves in a plasma-dust string liquid; parameters of spectra of proper lattice thermal longitudinal and transverse waves in a three-dimensional dusty plasma structure; using a powerful laser, the kinematic viscosity of the dust subsystem was determined. The principal achievement of the SE is the experimental determination for the first time in the world of autonomous plasma-dust droplets formed not by special traps, but by plasma flows trickling down from the surrounding plasma onto the surface of microparticles. Examples of on-line repair of scientific equipment by Russian cosmonauts are given. Possible areas for applying the obtained results in science and technology are proposed.

Keywords: dusty plasma, gas discharge, dusty plasma structures, scientific equipment, space experiment

В ноябре 2024 г. исполнилось 10 лет со дня запуска научной аппаратуры «Плазменный кристалл-4» (НА «ПК-4») на борту МКС, и это является поводом для подведения предварительных итогов данного эксперимента. Объектом исследования в данной работе является пылевая плазма в условиях невесомости, получаемая на российско-европейской НА «ПК-4» на борту МКС в рамках одноименного российско-европейского проекта. Целью работы является исследование фундаментальных физических свойств пылевой плазмы с последующим применением их в плазменных технологиях.

Российско-европейский космический эксперимент «Плазменный кристалл» (КЭ «ПК») на НА «ПК-4» является логическим продолжением всей серии экспериментов на российской НА «ПК-1» [1], «ПК-2» [2] и российско-германской НА «ПК-3 Нефедов ¹» [3], «ПК-3 Плюс» [4, 5]. Идеология эксперимента была разработана в 2006–2007 гг. Институтом высоких температур РАН (ОИВТ РАН) совместно с Институтом внеземной физики Общества Макса Планка (ИВФ, г. Гархинг, Германия) под научным руководством академика РАН Владимира Евгеньевича Фортова (1946–2020) и профессора Грэгора Морфилла. Целью КЭ «ПК» на НА «ПК-4» является комплексное исследование пылевой плазмы в комбинированном (высокочастотном и постоянного тока) газовом разряде низкого давления в неоне или аргоне. В качестве пылевых частиц в НА «ПК-4» используются монодисперсные пластиковые сферические микрочастицы размерами 1,3; 2,6; 3,4; 6,9 и 10,4 мкм. Особенностью НА «ПК-4» является наличие в ее составе различных типов манипуляторов пылевой подсистемы – электрических, тепловых, лазерных и протоком газа, что позволяет проводить широкий спектр разнообразных экспериментов. Все многочисленные экспериментальные параметры аппаратуры программируются и исполняются с помощью управляющего компьютера (ноутбука) НА «ПК-4». Ввиду большой гибкости в выборе экспериментальных сценариев данную аппаратуру уместнее называть лабораторией. В настоящее время эксперименты проводятся сотрудниками ОИВТ РАН и сотрудниками Гиссенского университета им. Ю. Либиха (г. Гиссен, Германия) при участии ученых из Китая и США. В настоящее время научными руководителями проекта с российской стороны является доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН О.Ф. Петров, а с европейской стороны – профессор Гиссенского университета им. Ю. Либиха Маркус Тома. Цели и задачи данного КЭ, а также устройство НА «ПК-4» были подробно изложены в данном журнале ранее [6, 7]. Поскольку статья [6] находится в открытом доступе на сайте ЦПК имени Ю.А. Гагарина, в данной работе мы не будем рассматривать устройство НА «ПК-4», а сосредоточимся на обзоре основных научных результатов, полученных за время работы НА «ПК-4», и особенностях эксплуатации и ремонта этой аппаратуры на борту МКС.

¹ Анатолий Павлович Нефедов (1939–2001 гг.) – заслуженный деятель науки РФ, профессор, доктор технических наук, принимал самое активное участие в становлении и развитии КЭ «ПК» на орбитальных станциях.

НА «ПК-4» была смонтирована в стандартной приборной стойке европейского лабораторного модуля Columbus космонавтами А.М. Самокутяевым и Е.О. Серовой в ноябре 2014 г. [6]. После тестового запуска и проверки НА «ПК-4» космонавтом Г.И. Падалкой в июне 2015 г. аппаратура была сдана в эксплуатацию. Организационно эксперименты на НА «ПК-4» проводились в виде двух-трех экспериментальных серий в год, каждая из которых длилась семь дней и включала в себя 9–12 прогонов экспериментов по компьютерным скриптам, заранее присланным на борт МКС разработчиками экспериментов. Всего за 2015–2024 гг. было проведено 19 экспериментальных серий. Все они были проведены при участии космонавтов ЦПК имени Ю.А. Гагарина, за исключением 18-й серии, которая проводилась в январе 2024 г. полностью в дистанционном режиме при участии европейского астронавта Маркуса Вандта, члена миссии Axiom Mission-3 (Ax-3) американской частной космической компании Axiom Space, занимающейся космическим туризмом и космическими технологиями. Работа космонавтов в экспериментальных сериях заключалась в расконсервации и консервации НА «ПК-4», подключении разъемных вакуумных и электрических соединений, включении аппаратуры, замене съемных носителей информации (внешних жестких дисков). Кроме того, при инъекции пылевых частиц в газоразрядную трубку периодически необходимо было быстро изменять режим разряда для улавливания микрочастиц, что было невозможно сделать из ЦУПа из-за 4–6-секундной задержки в контуре управления экспериментом.

Схема управления проведением эксперимента

Схема управления проведением экспериментов приводится на рис. 1. Активизированная НА «ПК-4» управляется интерактивной программой Plasmakristall-4, установленной на ноутбуке, входящем в комплект НА. Программа Plasmakristall-4 создает на экране ноутбука интерактивную панель управления – консоль управления, через которую можно наблюдать за всеми параметрами НА «ПК-4» и корректировать их вручную или программно. Для проведения каждого эксперимента разрабатывается отдельный программный скрипт, понятный программе Plasmakristall-4 и представляющий собой программу выполнения эксперимента. Экспериментальные скрипты (процедуры) заранее разрабатываются, отлаживаются, испытываются на Земле постановщиками КЭ и посылаются на борт МКС перед проведением экспериментальной серии. Космонавт выбирает запланированный скрипт из имеющихся и запускает его на исполнение – эксперимент начинается. Одновременно с экраном ноутбука НА «ПК-4» интерфейс интерактивной программы Plasmakristall-4 (консоль управления НА «ПК-4») отображается и в CADMOS (Centre d'Aide au Développement des Activités en Micropesanteur et des Opérations Spatiales – Центр управления полезными нагрузками ЕКА, г. Тулуза). Непосредственный доступ к наземной активной консоли

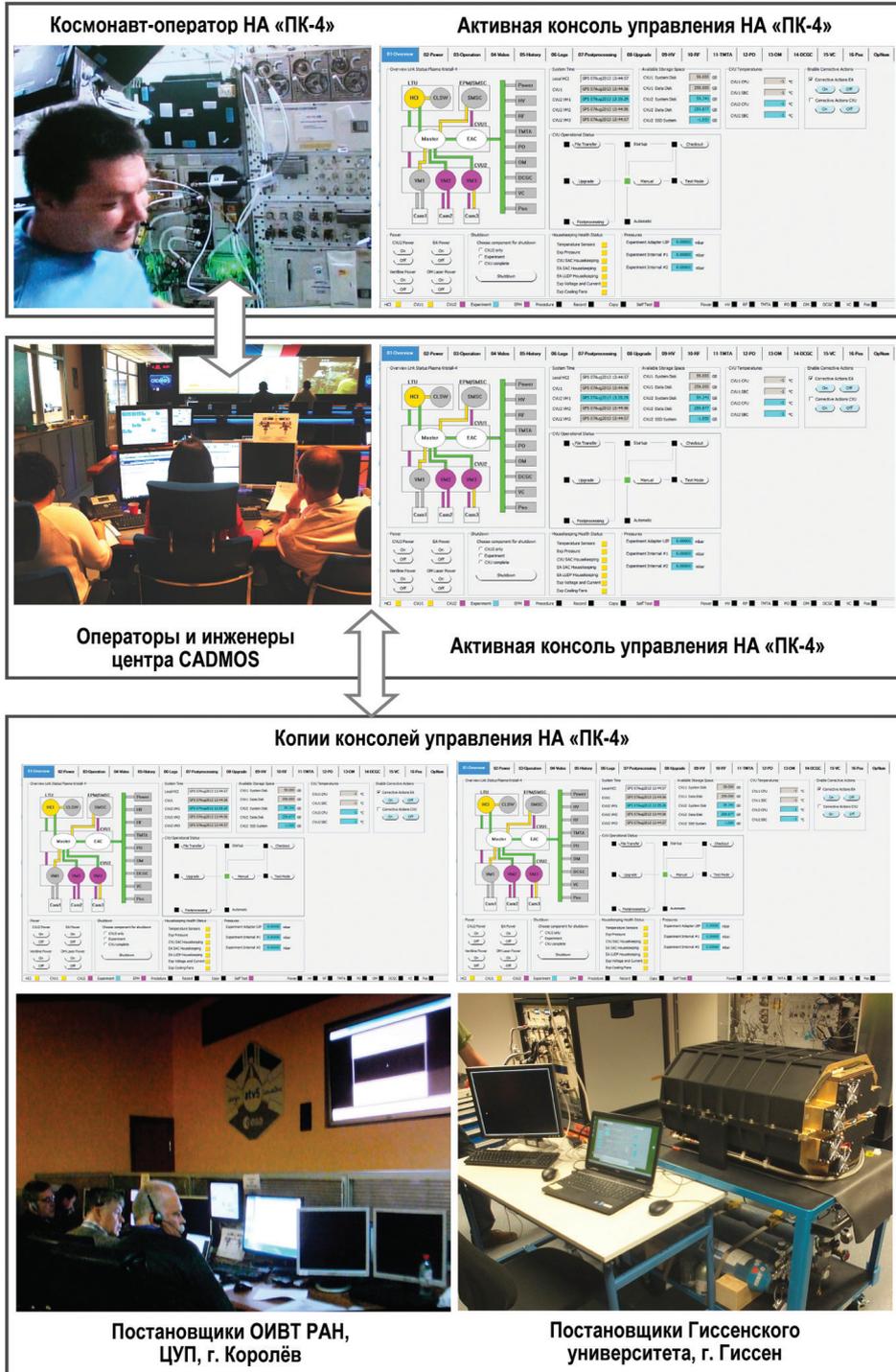


Рис. 1. Схема управления проведением КЭ на НА «ПК-4»

управления НА «ПК-4» имеет только оператор CADMOS. CADMOS в режиме реального времени транслирует интерактивную панель управления программы Plasmakristall-4 постановщикам эксперимента – команде ОИВТ РАН в ЦУПе (г. Королёв) и команде Университета им. Ю. Либиха (г. Гиссен, Германия) без возможности для них что-то самим изменить в параметрах эксперимента. Переговоры между оператором CADMOS и постановщиками КЭ ведутся с использованием сети Интернет и приложения Webex. Кроме монитора программы Plasmakristall-4 постановщикам передается также видеоизображение пылевой плазмы небольшого разрешения с внутренних штатных видеокамер НА «ПК-4», позволяющих контролировать ход эксперимента. При необходимости постановщики выдают оператору CADMOS рекомендации по коррекции параметров эксперимента, которые оператор либо проводит сам со своего активного интерфейса, либо по голосовой связи с МКС передает их космонавту-экспериментатору. На первых экспериментальных сериях постановщики экспериментов приезжали в CADMOS, чтобы подсказывать оператору необходимые действия. Однако с приобретением некоторого опыта и наличием у постановщиков всей необходимой информации о параметрах эксперимента и видеоизображения пылевой плазмы стало возможным полноценное дистанционное управление проведением эксперимента.

Исследование плазменно-пылевых облаков в положительном столбе газового разряда постоянного тока

На первом этапе КЭ на аппаратуре «ПК-4» проводились исследования параметров плазменно-пылевых облаков в положительном столбе (ПС) слабо-точного (0,5–1,5 мА) разряда постоянного тока (ПТ) при низком давлении (10–100 Па) плазмообразующего неона или аргона. В отличие от лабораторных экспериментов, где плазменно-пылевые облака размером около 1 см удается локализовать в искусственно созданной очень неоднородной страте разряда ПТ, в разрядной трубке НА «ПК-4» генерировались однородные плазменно-пылевые облака произвольной длины. Облака локализовывались в амбиполярной электрической ловушке вдоль оси газоразрядной трубки и имели диаметр 2–15 мм в зависимости от количества инжектированных микрочастиц. При повышении величины разрядного тока более 2 мА в осевой области облака образовывался вояд (область, не заполненная микрочастицами). Характерной физической особенностью такого эксперимента является наличие осевого постоянного электрического поля напряженностью около 2–3 В/см, что приводит к двум существенным эффектам. Первый – плазменно-пылевые облака в плазме разряда ПТ, предоставленные самим себе, дрейфуют в направлении анода со скоростью 5–50 мм/сек в зависимости от давления плазмообразующего газа. Второй – при давлении менее 40 Па в протяженном облаке микрочастиц самовозбуждаются плазменно-пылевые

волны плотности микрочастиц. Второе явление является аналогом ионно-звуковой неустойчивости в плазме, но частота плазменно-пылевых волн в тысячи раз меньше из-за большой массы микрочастиц. Были проведены экспериментальные исследования и теоретическое моделирование параметров плазменно-пылевого облака длиной около 10 см и диаметром около 1,5 см [8]. На основании измерений формы облака и счетной плотности микрочастиц, скорости дрейфа микрочастиц, светимости плазмы была создана самосогласованная кинетическая модель разряда ПТ с облаком, дающего распределение всех электрофизических параметров в облаке и его окрестностях: функции распределения электронов по энергиям (ФРЭ), электрического потенциала, зарядов микрочастиц, электрического поля в облаке, концентрации электронов и ионов, скоростей ионизации и других параметров (рис. 2). Было впервые показано, что электроны плазмы, бомбардирующие микрочастицы, не все к ним прилипают, как считалось ранее, а только 40 % от их общего числа.

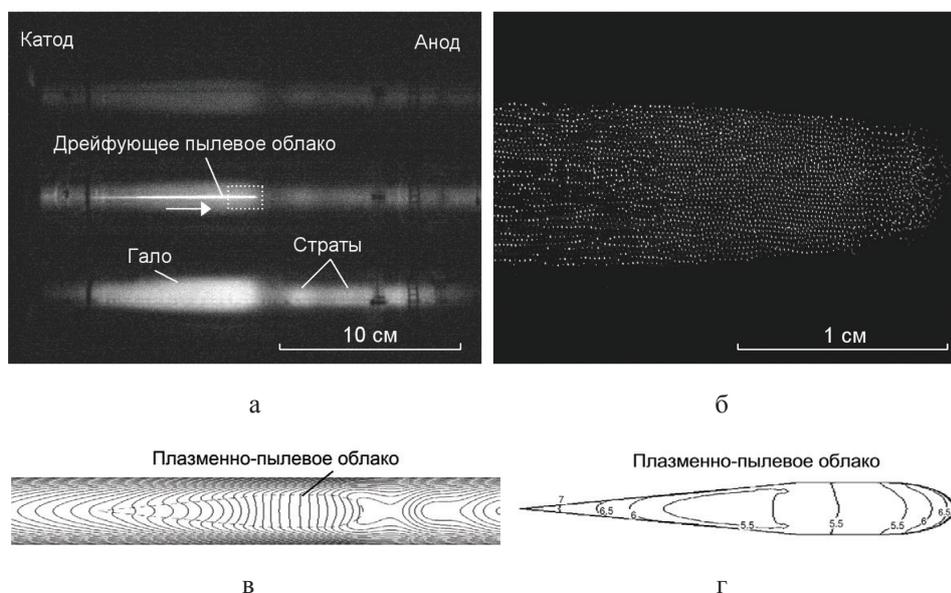


Рис. 2. Самосогласованная (комплексная) система ПС разряда ПТ и плазменно-пылевого облака:

a – возмущение ПС плазменно-пылевым облаком (фотографии разрядной трубки обзорной видеокамерой через 585 нм (серый) и 703 нм светофильтры калейдоскопической системы);
b – пылевое облако при высоком разрешении из области, обозначенной прямоугольником на 2, *a*;
в, г – расчет распределения пространственного электрического потенциала с интервалом 0,5 В и зарядов микрочастиц в тысячах зарядов электронов

Показано, что электрическое поле в пылевом облаке возрастает в 2–3 раза, что ведет к увеличению температуры электронов и светимости плазмы в плазменно-пылевом облаке [8, 9]. Получено правильное описание

страт, индуцированных пылевым облаком. Необходимо отметить, что система из стабилизированного по току разряда ПТ и плазменно-пылевого облака является интересной самосогласованной системой, где изменение одного параметра ведет к изменению всех остальных. На основе разработанной кинетической модели разряда ПТ с пылевым облаком (и других экспериментов) одним из постановщиков КЭ, А.В. Зобниным, в 2021 г. была защищена докторская диссертация, которая, по мнению Высшей аттестационной комиссии, являлась лучшей докторской диссертацией из защищенных в 2021 г. Для устранения дрейфа плазменно-пылевых облаков в разряде ПТ и проведения экспериментов со стационарными облаками в НА «ПК-4» предусмотрен режим разряда ПТ с переключаемой полярностью разряда – ПТ/ПП [7]. Частота переключения может устанавливаться в диапазоне от 50 Гц до 3 кГц. Ввиду относительно большой массы микрочастиц, их колебания в осциллирующем электрическом поле разряда практически не заметны при частоте переключения полярности разряда 100 Гц и более. Имеется возможность регулирования скважности положительной и отрицательной фаз разряда и, тем самым, двигать облако микрочастиц в требуемую область разрядной трубки.

На втором этапе КЭ на аппаратуре «ПК-4» проводились исследования эволюции трехмерной (3D) структуры плазменно-пылевого облака, стабилизированного в пространстве с помощью режима ПТ/ПП. 3D-структура облака определялась методом послойного его сканирования тонким лазерным ножом и последующим восстановлением трехмерной структуры. После вброса микрочастиц в газоразрядную плазму и прибытия облака в экспериментальную область трубки разряд перевели в режим переключаемой полярности с частотой 500 Гц и провели сканирование облака. Его структура оказалась анизотропной жидкостного типа, как показано на рис. 3, а. Однако второе сканирование облака, проведенное через 5 мин. после первого, показало совсем другую картину – образование связанных цепочек микрочастиц различной длины, струнных кластеров или струн, показанных на рис. 3, б, в то время как между собой цепочки взаимодействовали относительно слабо. Данная структура была идентифицирована, как струнная жидкость, а ее свойства, как выяснилось позднее, разительно отличаются от облаков с изотропной структурой. Физика этого явления связана с образованием биполярных ионных кильватерных следов за микрочастицами в постоянном электрическом поле. Нам удалось идентифицировать отдельные струны и измерить их спектр. На рис. 4 представлен процесс формирования струнной жидкости из микрочастиц диаметром 3,38 мкм в разряде ПТ величиной 0,5 мА при частоте переключения полярности 500 Гц и давлении аргона 28 Па с интервалом в 2 мин. Видно, что количество «длинных» струн со временем существенно растет, причем с одной стороны плазменно-пылевого облака, а радиальное положение самих струн упорядочивается в виде цилиндрических оболочек при шестиугольном порядке расположения струн на сечении.

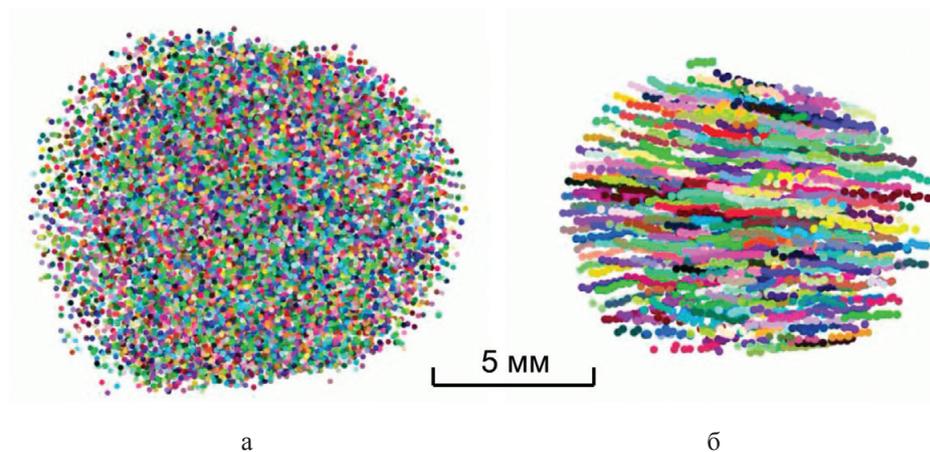


Рис. 3. 3D-структура плазменно-пылевого облака:
a – сразу после инъекции микрочастиц; *б* – через 5 мин после инъекции.
 Ось трубки направлена вдоль цепочек микрочастиц – струн

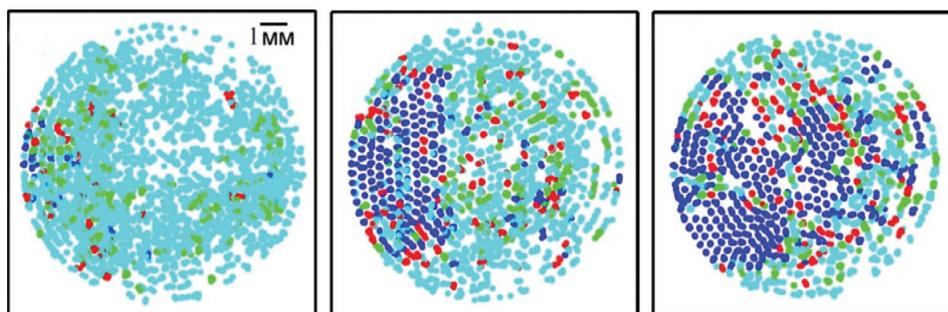


Рис. 4. Упорядочивание изначально анизотропной плазменно-пылевой структуры в ПС разряда ПТ величиной 0,5 мА при переключении полярности разряда с частотой 500 Гц в аргоне при давлении 28 Па. Временной интервал между фрагментами 2 мин. Соответствие длины струн цвету струны следующее: 3–10 микрочастиц – циан; 10–15 – зеленый; 15–20 – красный; более 20 – голубой

Наблюдаемое упорядочивание можно интерпретировать как электрореологический структурный фазовый переход, а сам объект по ряду признаков трактовать как пример мягкой материи [10].

Плазменно-пылевые волны

Цилиндрическая форма газоразрядной трубки очень удобна для исследований распространения плазменно-пылевых волн плотности и ударных волн. На аппаратуре «ПК-4» проводились исследования нелинейных самовозбуждающихся плазменно-пылевых волн большой амплитуды [11], линейных плазменно-пылевых волн малой амплитуды [12], возбуждаемых

так называемым электроманипуляционным электродом [7], волн в плазменно-пылевой струнной жидкости [13], получены спектры собственных решеточных тепловых волн в трехмерной пылевой плазменной структуре с помощью преобразования Фурье – поля скоростей микрочастиц. В последнем случае не были задействованы никакие нестабильности или внешние возбуждения. Были обнаружены и проанализированы как продольные, так и поперечные колебательные моды. Из сравнения измеренных спектров с расчетными были оценены такие важные параметры пылевой плазмы, как заряд микрочастиц и длина экранирования плазмы, а также модуль упругости пылевой подсистемы. Здесь мы кратко рассмотрим измерение дисперсионного соотношения для линейных плазменно-пылевых волн плотности малой амплитуды [12]. Волны возбуждались дополнительным кольцевым (электроманипуляционным) электродом в диапазоне частот от 1 до 20 Гц в протяженном плазменно-пылевом облаке длиной около 60 мм и диаметром 12 мм, состоящем из монодисперсных пластиковых микрочастиц диаметром 3,34 мкм (рис. 5, а). Разряд ПТ величиной 0,5 мА с переключаемой полярностью создавался в аргоне при давлении 11 Па. Для возбуждения волн на электроманипуляционный электрод подавалось синусоидальное напряжение, обеспечивающее максимальный ток (0,05 мА) в разряд. Под действием этого электрода правая часть облака уплотнялась, и далее это уплотнение распространялось в направлении его левой части (рис. 5, б). По двум последовательным изображениям было измерено смещение каждой из микрочастиц в поле зрения видеокамеры и определено поле скоростей микрочастиц (рис. 5, в). В научной литературе данный метод известен как PIV-method (Particle Image Velocimetry). Данные (рис. 5, б) были усреднены по вертикальным сегментам и преобразованы в распределение скоростей микрочастиц V_x вдоль оси трубки (рис. 5, г). По смещению распределений V_x на последовательных кадрах определялась фазовая скорость плазменно-пылевой волны. Линейность волны контролировалась Фурье-анализом наблюдаемых колебаний. Высокое качество данных (рис. 5, г) позволило дополнительно снизить амплитуду волны еще в несколько раз для достижения полностью линейного режима колебаний. Линейность колебаний подтверждалась отсутствием гармоник основной частоты. Таким образом, впервые экспериментально было получено дисперсионное соотношение для 3D-плазменно-пылевой волны в линейном режиме [12]. Аналогичным образом была измерена фазовая скорость волны вдоль струн в плазменно-пылевой струнной жидкости, которая оказалась в несколько раз меньше скорости волны в изотропном облаке жидкостного типа [13]. Это наблюдение объясняется тем, что эффективная масса сильно связанных микрочастиц в струне в несколько раз больше массы отдельной пылинки, что и приводит к наблюдаемому эффекту.

Интересно также отметить исследования бифуркации (расщепления) плазменно-пылевых волн, вызываемых электрическим полем разряда ПТ, при смене полярности разряда [11]. В этом случае плазменно-пылевые

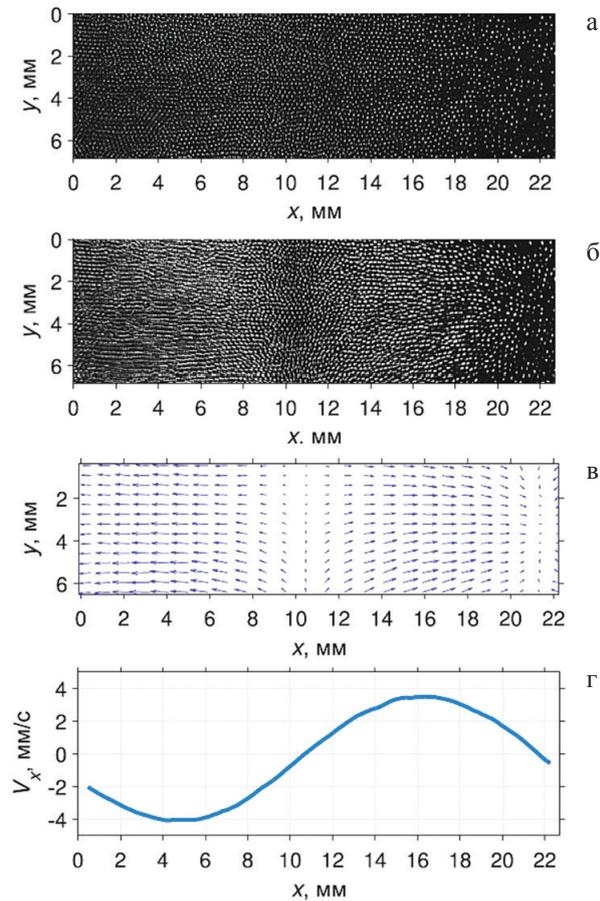


Рис. 5. Плазменно-пылевая структура при токе на внутренний электрод равном 0 мкА (а), та же структура, когда на внутренний электрод подан гармонический ток с частотой 1,0 Гц и амплитудой 50 мкА (б), поле скоростей (синие стрелки) полученное методом измерения скоростей изображения частиц (PIV – Particle image velocimetry) (в). Профиль распределения в пространстве проекции векторов скоростей частиц на ось абсцисс (г)

волны перестраиваются под вновь появившиеся условия – увеличение осевого поля. В частности появляются гребни новых волн, у которых был измерен инкремент нарастания амплитуды. Показано, что локальная величина электрического поля влияет на волновую картину. Однако, очевидно, необходимы дальнейшие исследования (как теоретические, так и экспериментальные), чтобы понять нелинейную физику, лежащую в основе бифуркаций волновых фронтов, и лучше обосновать роль электрического поля. Аппаратура «ПК-4» предоставляет уникальную возможность варьировать среднее электрическое поле, испытываемое микрочастицами путем изменения скважности режима переключаемой полярности.

Измерение вязкости плазменно-пылевой подсистемы

Сдвиговая вязкость является важной характеристикой жидкости или газа, которая количественно определяет ее сопротивление течению и играет центральную роль в понимании и описании сдвиговых потоков. Измерение кинематической вязкости в сильно неидеальных 3D-системах Юкавы, к которым относятся плазменно-пылевые облака, остается актуальной научной проблемой. Наличие в НА «ПК-4» мощного лазера дает уникальную возможность инициировать сдвиговые течения в пылевой подсистеме, а видеодиагностика позволяет на кинетическом уровне непосредственно определять диффузию количества движения от канала течения в глубь облака. Как и в уже изложенных здесь опытах, данный эксперимент проводился в протяженной суспензии микрочастиц, стабилизированной в разряде ПТ с переменной полярностью [14]. Сдвиговый поток создавался за счет действия силы радиационного давления мощного лазерного луча на микрочастицы (рис. 6, а). Диаметр лазерного луча в суспензии составлял 3 мм, а его мощность варьировалась в диапазоне от 0,6 до 2,2 Вт. Диаметр микрочастиц, как и ранее, составлял 3,34 мкм. Характерный вид сдвигового течения в плазменно-пылевом облаке представлен на рис. 6, а, оцифровка радиального профиля осевых скоростей микрочастиц V_x вдоль оси трубки представлена на рис. 6, б.

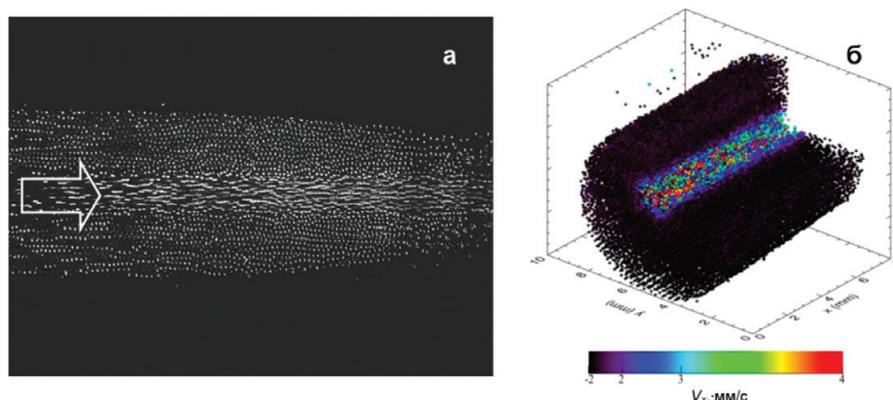


Рис. 6. Сдвиговое течение в плазменно-пылевом облаке, индуцируемое лучом лазера: *а* – наложение 3 последовательных кадров видеосъемки, белая стрелка обозначает лазерный луч; *б* – поле осевых скоростей микрочастиц, определенное по сдвигу микрочастиц на последовательных видеокдрах

Физически кинематическая вязкость проявляется в данных как уширение нормированного радиального профиля осевых скоростей относительно исходного нормированного профиля интенсивности лазерного луча. На основе этих двух профилей с помощью уравнений Навье – Стокса рассчитана верхняя оценка (чувствительность данной методики) кинематической вязкости пылевой подсистемы, которая оказалась в диапазоне от 0,2

до $6,7 \text{ мм}^2/\text{с}$ для четырех отдельных экспериментов. Эта оценка оказалась примерно на порядок-два ниже, чем сообщалось ранее в наземных экспериментах с квазитрехмерной пылевой плазмой. Все эти более ранние эксперименты были проведены в лабораториях аналогично нашему: сдвиговый поток в пылевой плазме создавался с помощью лазерных манипуляций. Физика, лежащая в основе этой разницы, может заключаться в структуре плазменно-пылевых облаков в наших экспериментах. Как видно (рис.6, а), в плазменно-пылевом облаке начинают формироваться струны, следовательно, поскольку луч идет вдоль струн, эффективность передачи количества движения между струнами может быть значительно снижена по сравнению с таковой в анизотропной структуре. Это потребует новых измерений, в которых вместе с улучшенными измерениями профилей скоростей и снижением мешающего давления плазмообразующего газа будет тщательно контролироваться и структура плазменно-пылевого облака. При необходимости анизотропная структура облака может поддерживаться периодическим его встряхиванием с помощью разрядного тока.

Формирование плазменно-пылевых глобул под воздействием плазменных потоков

В заключение нашего краткого обзора научных экспериментов на аппаратуре «ПК-4» представим результаты наиболее оригинального эксперимента, в ходе которого было зарегистрировано формирование плазменно-пылевых глобул со свободной границей [15]. Новизна заключается в следующем: поскольку одноименно заряженные микрочастицы по закону Кулона отталкиваются, то для существования плазменно-пылевого облака необходимо наличие какой-то ловушки, которая препятствовала бы разлету микрочастиц. Как правило, в экспериментах с пылевой плазмой таковой является естественная электростатическая ловушка, сформированная полем амбиполярной диффузии электронов и ионов на стенке разрядной камеры или в стратах разряда ПТ. Однако в начале 90-х гг. теоретики Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН А.М. Игнатов и В.Н. Цытович одновременно и независимо друг от друга обратили внимание на то, что на поверхности микрочастиц постоянно аннигилируются потоки электронов и ионов. Если эти потоки не симметричны, то на микрочастицу будет действовать сила ионного увлечения. При сближении микрочастиц рекомбинирующие потоки на одну микрочастицу частично экранируются со стороны второй микрочастицы. В этом случае рекомбинирующий поток на микрочастицу становится несимметричным и появляется сила притяжения микрочастиц, являющаяся аналогом силы Лесажа. Теоретически было показано, что при достаточной плотности плазмы ($n_i, n_e > 10^{10} \text{ см}^{-3}$) сила притяжения может превысить силу кулоновского отталкивания одноименно заряженных микрочастиц. В этом случае могут образовываться плазменно-пылевые структуры, удерживаемые не внешней электростатической ловушкой, а исключительно плазменными

потоками, рекомбинирующими на поверхности микрочастиц. Для реализации такого эксперимента необходимо, чтобы рекомбинирующие потоки плазмы на поверхности микрочастиц превосходили такие потоки на стенки плазменной камеры. Такое условие было достигнуто в центре разрядной камеры в импульсном режиме. Сценарий нашего эксперимента был следующим: разрядная камера заполнялась достаточным количеством пылевых микрочастиц, далее под воздействием постоянного электрического поля в плазменно-пылевом облаке возникала пылевая волна плотности. Гребни этой волны использовались как затравочные флуктуации счетной плотности пылевых микрочастиц для формирования плазменно-пылевых глобул. Далее плотность плазмы (концентрации электронов и ионов) увеличивалась примерно в 10 раз. Плазменные потоки также увеличивались в 10 раз, и гребни пылевой волны в приосевой трансформировались в самоудерживаемые плазменно-пылевые капли. Поскольку в этом режиме большой мощности существовали мощные потоки плазмы на стенки камеры, то сформированные глобулы быстро выносились на стенки камеры.

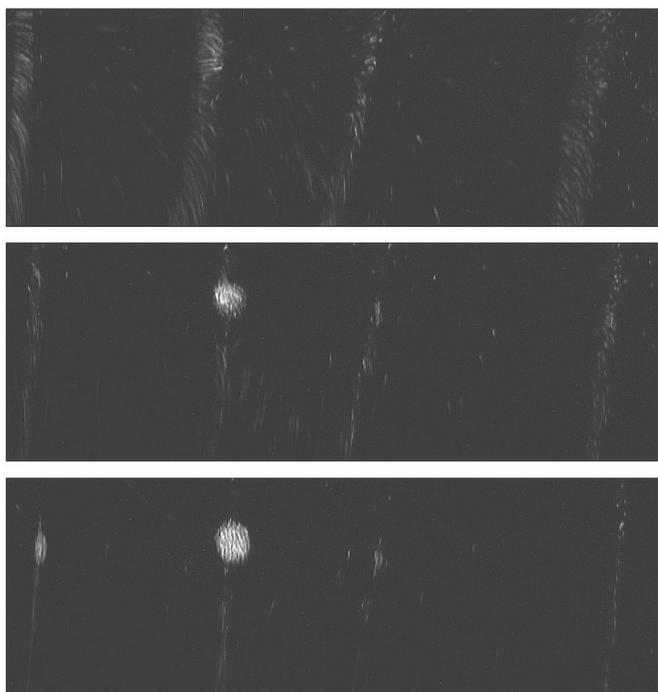


Рис. 7. Формирование плазменно-пылевой глобулы диаметром 0,53 мм в мощном (4 Вт) высокочастотном разряде. Размер кадра 10,26 x 3,43 мм, временной интервал между кадрами 14 мс. Верхний кадр – видны гребни плазменно-пылевой неустойчивости, включение высокочастотного разряда; средний и нижний кадры – гребни схлопываются в автономные плазменно-пылевые капли-глобулы. Ось газоразрядной трубки соответствует горизонтальным осям симметрии кадров. Глобула подсвечивается вертикальным лазерным «ножом» толщиной 90 мкм

Полученные результаты носят приоритетный характер и открывают новое направление в физике пылевой плазмы. В частности, они могут быть использованы в астрофизике для объяснения быстрого формирования протопланетных газопылевых туманностей и образования планет. Безудержная фантазия теоретиков и их расчеты породили идею, что в межзвездной или околозвездной среде могут самостоятельно образовываться плазменно-пылевые цепочки, которые могут сворачиваться в спирали. Была высказана гипотеза, что сложные самоорганизующиеся плазменно-пылевые структуры обладают всеми необходимыми свойствами, позволяющими квалифицировать их как кандидатов в межзвездную неорганическую живую материю, которая может существовать в космосе при определенных условиях, позволяющих им развиваться естественным путем.

Особенности эксплуатации НА «ПК-4»

Смонтированная НА «ПК-4» в лабораторном модуле Columbus после ввода в эксплуатацию в июне 2015 г. полностью соответствовала запланированному функционалу. Однако после года эксплуатации постановщики эксперимента стали замечать наличие небольшого остаточного протока газа через газоразрядную камеру при командно-закрытом вентиле напуска рабочего газа, что выражалось в дрейфе микрочастиц при отсутствии осевого электрического поля. «Нолевой» проток был небольшим, но неконтролируемым и непостоянным, что делало проведение большинства экспериментов невозможным. По всей видимости, технические требования к «нолевому» положению регулируемых вентилях должны быть специально сформулированы, стандартизированы и испытаны отдельными процедурами. Вероятно, недавняя утечка гелия из космического корабля Starliner обусловлена именно недостаточным нолевым положением клапанов подачи газа.

Для устранения возникшего неконтролируемого напуска рабочего газа в НА «ПК-4» срочно был разработан, изготовлен, испытан на наземной модели НА «ПК-4» и доставлен на МКС дополнительный внешний накладной пневматический блок с клапанами отсечки подачи рабочего газа. Пневматический блок был оперативно изготовлен производителем НА «ПК-4» (немецкой фирмой OHB SE²) для летной и наземной моделей, а также для двух лабораторных моделей, установленных в ОИВТ РАН и в Университете им. Ю. Либиха в г. Гиссене. В ходе модернизации разъемные гибкие трубки были заменены на стационарные с более надежной герметичностью. Ремонт НА был успешно проведен космонавтом С.В. Прокопьевым летом 2018 г. (рис. 8, слева). Второй проблемой при эксплуатации НА «ПК-4» стал выход из строя компьютера НА «ПК-4» в 2021 г. – он перестал запускаться. И в этом случае фирма-производитель НА «ПК-4» OHB SE также оперативно прислала на борт МКС новую материнскую плату, и космонавт С.В. Прокопьев

² www.ohb.de

также успешно ее установил взамен вышедшей из строя. НА «ПК-4» вновь стала функционировать. Учитывая, что С.В. Прокопьев лично участвовал в проведении трех экспериментальных серий, можно сказать, что он стал ведущим космонавтом-специалистом по работе с НА «ПК-4» в лабораторном модуле Columbus наряду с космонавтом О.Д. Кононенко, который успешно провел четыре экспериментальные серии. Таким образом, наличие космонавтов на пилотируемых орбитальных станциях значительно повышают устойчивость работы целевых нагрузок. Из особенностей эксплуатации НА «ПК-4» стоит отметить также переход на передачу экспериментальных данных большого объема с МКС на землю по радиоканалам NASA вместо ранее практиковавшейся записи данных на внешние жесткие диски, которые доставлялись на Землю «Союзами».

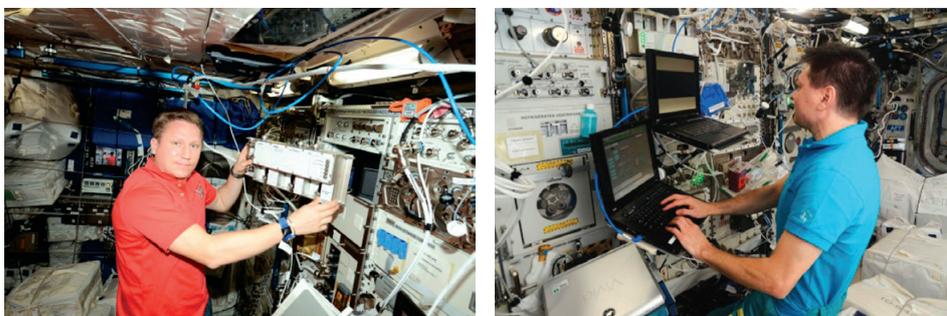


Рис. 8. Космонавт С.В. Прокопьев (слева) модернизирует газо-пневматическую систему НА «ПК-4» в лабораторном модуле Columbus (июль 2018 г.); космонавт О.Д. Кононенко производит захват быстро пролетающего плазменно-пылевого облака (март 2019 г.)

Приведенные и другие данные демонстрируют уникальный научный потенциал НА «ПК-4», а присутствие космонавтов значительно повышает ее надежность и возможность длительной эксплуатации. Продолжительный опыт эксплуатации НА «ПК-4» позволяет постановщикам ставить все более сложные эксперименты на борту МКС.

Выводы

В заключение отметим, что в данной статье мы совсем не коснулись других полученных результатов, таких как, например, поведение бинарных систем – систем, состоящих из микрочастиц двух размеров. В этой области получены новые результаты о сепарации микрочастиц по размерам в бинарных плазменно-пылевых системах в ВЧ разряде и в разряде ПТ, а также в среде с градиентом температуры; данные о синхронизации пылеакустических волн при их распространении в бинарных системах, что может быть полезно при изучении волн плотности пылевых частиц в кольцах Сатурна. Продолжаются

исследования неравновесных фазовых переходов в динамических бинарных системах, когда движимая электрическим полем фракция с микрочастицами меньшего диаметра проходит через облако микрочастиц большего диаметра с образованием неравновесных цепочечных структур. Начаты исследования сжимаемости плазменно-пылевых облаков с помощью ударных волн пылевой плотности, определено электростатическое давление за фронтом УВ и получена ударная адиабата Гюгонио для пылевой подсистемы. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что длина экранирования в плотной пылевой плазме определяется не полной плотностью ионов, а только теми «эффективными» ионами, которые не связаны с отрицательно заряженными пылинками. Планируется продолжить измерения кинематической вязкости пылевой подсистемы при контроле ее структуры и управляемом воздействии на нее. Полученные новые знания о плазменно-пылевых процессах, в частности о зарядке и взаимодействии микрочастиц, необходимы при описании большого числа новых данных о межзвездной и околозвездной плазменно-пылевой среде, полученных с помощью новейших космических телескопов.

Помимо своего фундаментального значения и упоминавшихся астрофизических приложений, полученные данные имеют и значительные практические приложения. Во всех плазменных и энергетических установках неизбежно имеется контакт горячей плазмы с холодными стенками, что приводит к их испарению. При достижении критической концентрации испаряющаяся фракция начинает конденсироваться в пылинки уже в плазменном объеме. Таким образом, получается «технологическая» пылевая плазма. В ряде случаев, например при плазменном травлении кремниевых подложек или в камерах токамаков, пылевая фракция нарушает технологический процесс. Здесь очень полезными являются наработанные знания о пылевой плазме, позволяющие смоделировать ситуацию и предложить механизмы для отвода и утилизации пылевой фракции. Но, с другой стороны, явление конденсации испаряемой подложки в плазменном объеме можно использовать для производства структурированных наноматериалов с заданными составами и свойствами. Плазменная очистка поверхности наночастиц и их пространственная сепарация по размерам создают уникальные технологические преимущества, недоступные другим методам. В последнее время в связи с интенсификацией освоения Луны актуализировался вопрос с левитацией лунной пыли, впервые обнаруженной в 1968 г. лунной американской станцией «Сервейер-7». Мигрирующая лунная пыль может проникать в критические узлы посадочных модулей и вызывать отказы аппаратуры. Для предотвращения этого необходимы знания распределения электрического потенциала вокруг посадочного модуля в разное время лунных суток и оценка размеров и зарядов левитирующих лунных пылевых частиц в условиях окололунной плазмы. Вполне возможно, что в критических условиях для защиты от лунной пыли придется устанавливать проволочные электростатические экраны.

В настоящее время НА «ПК-4» полностью работоспособна и обладает достаточным запасом расходных материалов – микрочастиц, неона и аргона. Постановщиками эксперимента накоплен значительный опыт эксплуатации НА «ПК-4», позволяющий реализовывать сценарии все более сложных КЭ. Учитывая перечисленные доводы, космическими агентствами и постановщиками КЭ «ПК» принято решение о продлении КЭ «ПК» на два года – 2025, 2026.

Благодарности

Авторы благодарят Роскосмос и Европейское космическое агентство за техническую помощь в проведении КЭ «ПК» на НА «ПК-4» на борту МКС.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Грэгору Морфиллу за его большой вклад в развитие экспериментальных исследований пылевой плазмы на борту МКС, Хубертусу Томасу и Михаилу Пустыльнику, а также всем членам Международной научно-технической группы по эксплуатации НА «ПК-4» (PK-4 Facility Science Team), космонавтам и инструкторам ЦПК имени Ю.А. Гагарина за сотрудничество и участие в проведении экспериментов на борту МКС.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Пылевая плазма, индуцированная солнечным излучением, в условиях микрогравитации: эксперимент на борту орбитальной станции «Мир» / В.Е. Фортов, А.П. Нefeldов, О.С. Ваулина, А.М. Липаев [и др.] // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 1998. – Т. 114, № 6(12). – С. 2004–2021. – URL: http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r_114_2004.pdf.
Dusty Plasma Induced by Solar Radiation Under Microgravity Conditions: an Experiment on Board the Mir Orbital Station / V.E. Fortov, A.P. Nefedov, O.S. Vaulina, A.M. Lipaev [et al.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1998. – Vol. 114, No 6(12). – P. 2004–2021. – URL: http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r_114_2004.pdf.
- [2] The Dynamics of Macroparticles in a Direct Current Glow Discharge Plasma Under Micro-Gravity Conditions / A.P. Nefedov, O.S. Vaulina, O.F. Petrov, V. Molotkov [et al.] // New Journal of Physics. – 2003. – Vol. 5. – P. 108.
- [3] PKE-Nefedov: Plasma Crystal Experiments on the ISS / A.P. Nefedov, G.E. Morfill, V.E. Fortov, H.M. Thomas [et al.] // New Journal of Physics. – 2003. – Vol. 5 – P. 33.
- [4] Complex Plasma Laboratory PK-3 Plus on the International Space Station / H.M. Thomas, G.E. Morfill, V.E. Fortov, A.V. Ivlev [et al.] // New Journal of Physics. – 2008. – Vol. 10. – P. 033036.
- [5] Лаборатория «Плазменный кристалл-3 Плюс» на российском сегменте Международной космической станции – успешный проект по физике комплексной плазмы / В.Е. Фортов, О.Ф. Петров, А.Д. Усачев, А.М. Липаев [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – № 3(28). – С. 61–81.
The Plasma Crystal-3 Plus Laboratory on the Russian Segment of the International Space Station is a Successful Complex Plasma Physics Project / V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev, A.M. Lipaev [et al.] // Manned SpaceFlight. – 2018. – No 3(28). – P. 61–81.

- [6] Совместный эксперимент Европейского космического агентства и Роскосмоса «Плазменный кристалл-4» на Международной космической станции / В.Е. Фортов, О.Ф. Петров, А.Д. Усачев, А.М. Липаев [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2018. – № 2(27). – С. 115–132.
Joint Experiment of the European Space Agency and Roscosmos “Plasma Crystal-4” on the International Space Station / V.E. Fortov, O.F. Petrov, A.D. Usachev, A.M. Lipaev [et al.] // Manned SpaceFlight. – 2018. – No 2(27). – P. 115–132.
- [7] Plasmakristall-4: New Complex (dusty) Plasma Laboratory on Board the International Space Station / M.Y. Pustyl'nik, M.A. Fink, V. Nosenko, T. Antonova [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2016. – Vol. 87, No 9. – P. 093505.
- [8] Two-Dimensional Positive Column Structure With Dust Cloud: Experiment and Nonlocal Kinetic Simulation / A.V. Zobnin, A.D. Usachev, O.F. Petrov, V.E. Fortov [et al.] // Physics of Plasmas. – 2018. – V. 25, No 3. – C. 033702.
- [9] Influence of Dust Particles on the Neon Spectral Line Intensities at the Uniform Positive Column of Dc Discharge at the Space Apparatus “Plasma Kristall-4” / A.D. Usachev, A.V. Zobnin, A.V. Shonenkov, A.M. Lipaev [et al.] // Journal of Physics Conference Series: XXXI International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus 2017). – 2018. – Vol. 946. – P. 012143.
- [10] Three-Dimensional Structure of a String-Fluid Complex Plasma / M.Y. Pustyl'nik, B. Klumov, M. Rubin-Zuzic, A.M. Lipaev [et al.] // Physical Review Research. – 2020. – V. 2, No 3. – P. 033314.
- [11] Dust Density Waves in a dc Flowing Complex Plasma With Discharge Polarity Reversal / S. Jaiswal, M.Y. Pustyl'nik, S. Zhdanov, H.M. Thomas [et al.] // Physics of Plasmas. – 2018. – V. 25, No 8. – P. 083705.
- [12] Excitation of Progressing dust Ionization Waves on PK-4 Facility / V.N. Naumkin, D.I. Zhukhovitskii, A.M. Lipaev, A.V. Zobnin [et al.] // Physics of Plasmas. – 2021. – V. 28, No 10. – P. 103704.
- [13] Slowing of Acoustic Waves in Electrorheological and String-Fluid Complex Plasmas / M. Schwabe, S.A. Khrapak, S.K. Zhdanov, M.Y. Pustyl'nik [et al.] // New Journal of Physics. – 2020. – V. 22, No 8. – P. 083079.
- [14] Wave Dispersion in 3D-Complex Plasma Solid Under Microgravity Conditions / A.M. Lipaev, V.N. Naumkin, A.D. Usachev, S.A. Khrapak [et al.] // Physical Review E. – 2024. – Submitted for Publication.
- [15] Shear Flow in a Three-Dimensional Complex Plasma in Microgravity Conditions / V. Nosenko, M. Pustyl'nik, M. Rubin-Zuzic, A. Lipaev [et al.] // Physical Review Research. – 2020. – V. 2, No 3. – C. 033404.
- [16] Observation of Le Sage Gravity Analog in Complex Plasma / A.V. Zobnin, A.M. Lipaev, R.A. Syrovatka, A.D. Usachev [et al.] // Physical Review E. – 2024. – V. 110, No 3. – C. 035203.