

## РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОСТАВА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ КОМЕТЫ ГАЛЛЕЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ «ВЕГА»

Н. Н. Анучина, В. И. Волков, Е. Н. Евланов\*, В. П. Елсуков, Н. С. Еськов, О. М. Козырев, В. Ю. Политов, А. В. Петровцев, О. Ф. Прилуцкий\*, А. Т. Сапожников, М. К. Шинкарев, А. Н. Шушлебин

РФЯЦ, ВНИИ технической физики, 456770 Снежинск, n.n.anuchina@vniitf.ru

\*Институт космических исследований РАН, 117997 Москва

Представлены результаты расчетно-теоретических исследований. Описаны постановка проблемы и подходы к ее решению. Дана краткая информация о моделях, разностных методах и программных комплексах, адаптированных или разработанных для прямого численного моделирования масс-спектрометрических измерений кометной пыли в приборе ПУМА. Приведены результаты ряда вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: эксперимент «Вега», масс-спектрометрические измерения, высокоскоростное соударение, кинетика ионизации, численное моделирование.

В 1986 г. были выполнены космические эксперименты по изучению кометы Галлея. На космических аппаратах «Вега-1» и «Вега-2», пролетевших через хвост кометы на расстоянии  $\approx 10^4$  км от ее ядра, с помощью приборов ПУМА [1] (пылеударных масс-анализаторов) исследовался химический состав кометной пыли. В приборах ПУМА космическая пылинка сталкивалась с экраном из высокочистого серебра с относительной скоростью  $\approx 80$  км/с под углом 30 или 55°. Происходили испарение и ионизация вещества пылинки и части экрана. Разлетающееся плазменное облако проходило через систему электродов, вытягивающую ионную составляющую во времяпролетный масс-спектрометр (рис. 1). Была получена [2] уникальная экспериментальная информация — более 5 000 спектров масс от ударов отдельных частиц. Качественная интерпретация этих спектров дала результаты весьма важные для понимания космогонической эволюции Солнечной системы (например, в пылинках была обнаружена нелетучая органическая составляющая).

В работе кратко изложены результаты ряда исследований, направленных на получение количественных данных. С использованием предварительной информации о параметрах

кометных частиц и условиях соударения проведен расчетно-теоретический анализ процессов, проходящих при соударении и разле-

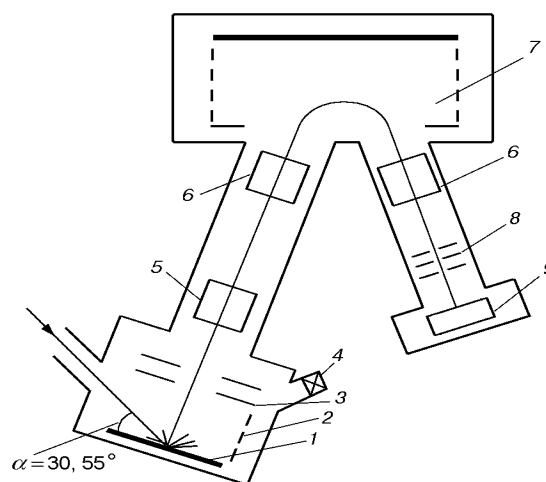


Рис. 1. Общая схема прибора ПУМА:

1 — экран, 2 — улавливающая сетка, 3 — ускоряющая сетка с потенциалом 1 кВ, находящаяся на расстоянии 1 см от экрана, 4 — фотоумножитель, 5 — управляющая сетка, 6 — электростатические линзы, 7 — электростатический рефлектор, 8 — задерживающая сетка, 9 — детектор ионов

Вероятные массовые составы кометных пылинок

№ п/п	Состав, %	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\bar{A}$ , г/моль
1	100 % органики (CH <sub>2</sub> )	0,954	10,4
2	40 % MgO, 60 % SiO <sub>2</sub>	2,96	21,4
3	30 % MgO, 45 % SiO <sub>2</sub> , 25 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,33	27,0
4	100 % FeS	3,64	44
5	50 % органики (CH <sub>2</sub> ), 15 % MgO, 25 % SiO <sub>2</sub> , 10 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,45	18,2

те, дана оценка их влияния на характеристики разлетающегося плазменного облака. Обоснован выбор физико-математических моделей для описания процессов, проходящих при масс-спектрометрических измерениях. Адаптированы или разработаны вновь разностные методы и программные средства для математического моделирования, а также обоснована методология его проведения. На основе вычислительных экспериментов изучена эволюция характеристик разлетающегося плазменного облака. Исследованы на стадии закалки ионизации зависимости средних зарядов серебра и химических элементов, входящих в состав кометной пылинки, от различных параметров пылинки (пористости, массы, формы, химического состава) и условий соударения с экраном.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ [2–6]

На основе анализа результатов экспериментов ПУМА, а также по фотометрическим наблюдениям были оценены параметры кометной пыли и (на качественном уровне) возможные химические составы пылинок (см. таблицу). Наиболее вероятен состав № 2, далее — № 5, а затем — остальные с равной вероятностью. Видно, что характеристики вещества пылинки изменяются в диапазоне от свойств углерода до характеристик железа с промежуточными значениями, близкими к алюминию для наиболее вероятных составов. Масса кометных частиц находится в диапазоне  $10^{-17} \div 10^{-11}$  г, плотность сплошных частиц  $0,954 \div 3,64$  г/см<sup>3</sup>. Мелкие частицы ( $10^{-17} \div 10^{-15}$  г) сплошные. Более крупные частицы имеют, в основном, сложную пористую структуру. Объемная пористость может достигать 95 %.

Анализ показал, что при всех предполагаемых параметрах кометных пылинок при со-

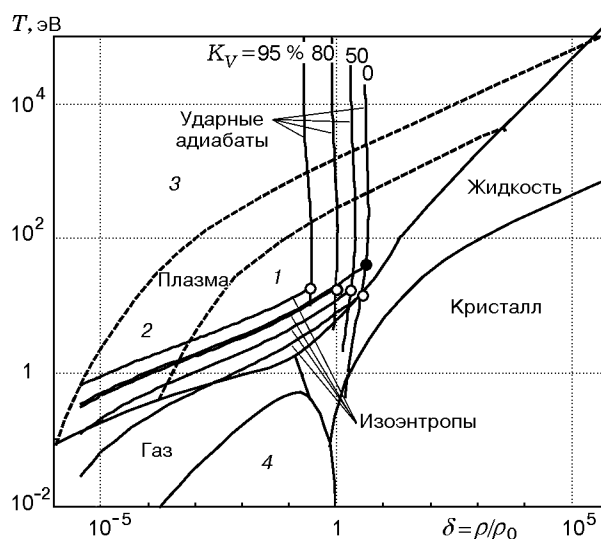


Рис. 2. Фазовая диаграмма алюминия [7] и положение на ней состояний, реализующихся при столкновении кометной частицы с экраном:

показаны ударные адиабаты для различных пористостей  $K_V$  и изоэнтропы из состояний, реализующихся при ударе со скоростью 80 (●) и 40 км/с (○), 1, 2 — области плотной плазмы при промежуточных температурах, 1 — область применимости моделей слабо-взаимодействующих электронейтральных ячеек, 3 — область слабо-взаимодействующей высокотемпературной плазмы, 4 — область смеси конденсированной и газовой фаз

ударении и последующем разлете вещество пылинки и части экрана переходит в состояние плотной неидеальной плазмы (рис. 2).

## 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, РАЗНОСТНЫЕ МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Анализ показал, что моделирование всего многообразия процессов, происходящих при

масс-спектрометрических измерениях, можно разбить на три этапа:

- динамические процессы соударения и разлета веществ;
- разлет и кинетика ионизации плазменного облака;
- прохождение плазменного облака через измерительную аппаратуру прибора ПУМА,

которые существенно отличаются протекающими в них процессами, временными и пространственными характеристиками. Информация, полученная на одном этапе, является исходной для следующего. Такой подход позволил максимально использовать на каждом этапе разработанные авторами модели, методы и программные комплексы.

### 2.1. Моделирование динамических процессов соударения (первый этап)

**Модели.** Расчетно-теоретический анализ физических процессов, происходящих при соударении, и оценка их влияния на динамику разлета и газодинамические характеристики плазменного облака показали следующее:

- упругопластические и прочностные свойства соударяющихся веществ не оказывают влияния на параметры плазменного облака;
- на начальной стадии формирования состояний взаимодействующих веществ существенную роль играет электронная теплопроводность. Происходит прогрев вещества перед фронтом ударной волны, и возникают тепловые потоки на контактной границе из-за отличия температур взаимодействующих веществ. Но влияние отмеченных эффектов ослабевает по мере вовлечения в процесс столкновения все больших масс веществ и может проявиться только для самых мелких частиц и при максимальных скоростях соударения ( $M = 10^{-17}$  г,  $v_0 = 80$  км/с).

Таким образом, для описания соударения и разлета веществ в большинстве интересующих случаев применима модель нестационарной адиабатической газовой динамики. Для уточнения результатов использовалась модель

радиационной газовой динамики в трехтемпературном приближении [8, 9]. Здесь для сплошной среды, состоящей из электронов, фотонов и ионов, принималось приближение многокомпонентной односкоростной модели. Каждый компонент имеет свою температуру, которая определяется движением среды, диффузией тепла, энергетическими связями. Уравнение энергии фотонов берется в диффузионном приближении.

Для описания динамики пористых частиц (любого состава и любой степени пористости) обосновано применение модели идеальной пористой среды [10], в которой полагается, что поры закрываются при нулевом давлении.

**Численные методы и программные комплексы.** Для моделирования процессов на первом этапе использовались разностные методы и программные комплексы МЕЧ [11–14], МАХ [15–17], МАХ-3 [18, 19], ТИГР-3Т [8].

Комплексы МЕЧ и МАХ позволяют моделировать широкий класс нестационарных адиабатических (без учета теплопроводности и тензорных свойств веществ) течений многокомпонентных сред сложной геометрии в случае двух пространственных переменных, а МАХ-3 — в случае трех. В частности, они позволяют рассчитывать вихревые течения с сильными деформациями контактных границ, их разрушением и перемешиванием веществ, что характерно для задач высокоскоростного соударения.

Методика и комплекс ТИГР-3Т позволяет моделировать процессы радиационной газовой динамики с фотонной, ионной и электронной теплопроводностью в случае двух пространственных переменных.

Были проведены адаптация и верификация методов для моделирования высокоскоростного соударения и разлета на основе численного решения ряда задач, имеющих аналитические решения. Кроме того, на основе решения задач соударения кометной пылинки с экраном и последующего разлета испаренного вещества в вакуум оценивалось влияние различных счетных параметров и технологии расчетов и проводилось сравнение результатов, полученных по разным методикам.

### 2.2. Моделирование разлета плазменного облака и кинетики ионизации плазмы (второй этап)

Для моделирования процессов, происходящих при разлете плазменного облака, получен-

ного на первом этапе, был адаптирован к данной проблеме комплекс ТАРАН [20] и разработан комплекс ТИГРАН.

Комплекс ТАРАН позволяет рассчитывать ионный состав и излучательные характеристики неоднородной неравновесной нестационарной плазмы (для случая одной пространственной переменной). Учитываются все наиболее существенные в плазме радиационно-столкновительные процессы: спонтанные радиационные распады, возбуждение и девозбуждение ионов электронным ударом, процессы тройной, фото- и диэлектронной рекомбинации, соответствующие процессы ионизации, эффекты переноса излучения.

При вычислении скоростей плазменных процессов предполагалось максвелловское распределение свободных электронов по скоростям. Процессы переизлучения в линиях описываются в приближении факторов вылета. При этом учитывался динамический эффект Доплера и фойгтовские профили линий. В рассматриваемых задачах необходимо рассчитывать населенности ионных состояний как для сильносжатой, так и для сильноразреженной плазмы. Поэтому использовалось два приближения — описание распределения населенностей на основе равновесных соотношений Саха — Больцмана и описание на основе решения кинетических уравнений. Эмпирически выработаны критерии перехода от одного приближения к другому.

В комплексе ТИГРАН реализованы модель и методика для самосогласованного описания (в случае двух пространственных переменных) кинетики ионизации и спектров неравновесного излучения плазмы. Он создан путем объединения комплексов ТИГР-3Т и ТАРАН. На каждом временном шаге по комплексу ТАРАН определяются и передаются в комплекс ТИГР-3Т спектральные мощности излучения плазмы в континууме и в линиях, а также средняя степень ионизации. Комплекс ТИГР-3Т, в свою очередь, обеспечивает для кинетических расчетов (по ТАРАН) пространственно-временные распределения температур и плотностей для лагранжевых частиц.

Обоснованы и реализованы два подхода к моделированию разлета и кинетики ионизации плазменного облака. При первом подходе по комплексу ТАРАН проводятся расчеты кинетики ионизации плазмы с использованием информации, полученной на первом этапе для ла-

гранжевых частиц, летящих в выбранных направлениях плазменного облака. В результате серии расчетов определяется ионный состав всего плазменного облака в разные моменты времени. При втором подходе расчет, проведенный на первом этапе моделирования, продолжается по комплексу ТИГРАН уже с учетом неравновесной кинетики ионизации и спектров неравновесного излучения.

Анализ показал, что в большинстве случаев численные исследования можно проводить по комплексу ТАРАН, а для уточнения результатов использовать ТИГРАН.

### 2.3. Моделирование прохождения плазменного облака через систему электродов (третий этап)

Регистрация ионов прибором ПУМА ограничивается двумя факторами:

- ионно-оптическая система прибора действует как одноканальный энергетический анализатор (ширина энергетического канала для ионов равна соответственно 100 и 10 В);
- детектор может регистрировать только ионы, которые находятся в ограниченном телесном угле  $|\theta| < \theta_{\max}$ , где  $\theta_{\max}$  равно нескольким градусам,  $\theta$  — угол между вектором скорости иона и осью измерительного канала.

Для описания взаимодействия разлетающегося плазменного облака с вытягивающим электрическим полем между экраном прибора и ускоряющей сеткой используется модель бесстолкновительного движения заряженных частиц в вытягивающем поле электродов. Численное моделирование проводится методом «частица — сетка» [21]. Предполагается, что плазма со скомпенсированным зарядом электронов и ионов отделяется от ионного облака резкой границей. Электрическое поле в ионном облаке определяется из численного решения уравнения поля, рассчитанное поле используется для решения уравнений движения частиц.

### 2.4. Уравнения состояния (для первого и второго этапов)

Анализ точности теоретических моделей термодинамики веществ и существующих

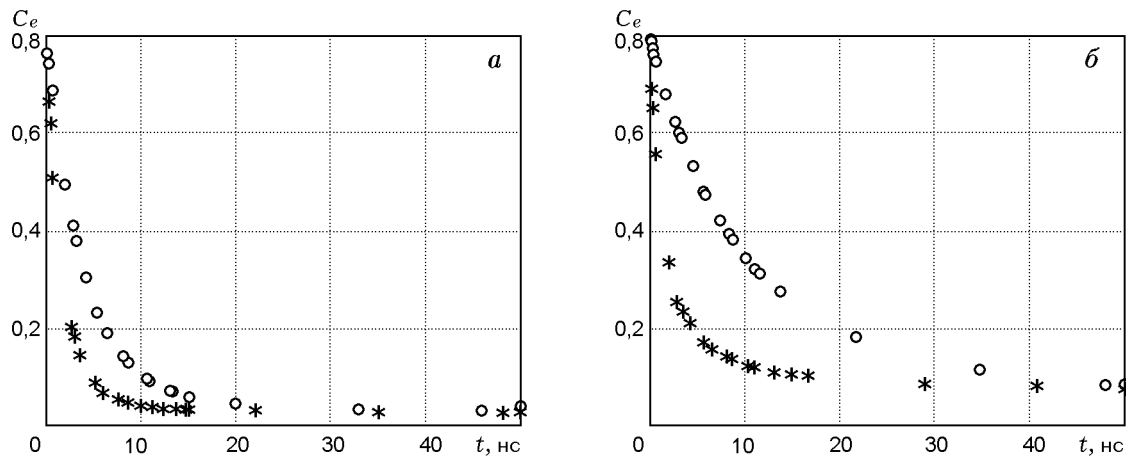


Рис. 3. Зависимости среднего заряда серебра (а) и вещества пылинки (б) в районе контактной границы по данным двумерного (кружки) и трехмерного (звездочки) расчетов по МАХ-3

уравнений состояния в диапазоне изменения плотностей и температур, возникающих при ударе и разлете, показал следующее.

Для описания столкновения и разлета пылинки может использоваться широкодиапазонное аналитическое уравнение состояния [22], в котором тепловые компоненты давления и энергии аппроксимируют расчетные данные по модели Томаса — Ферми. Потенциальные составляющие в нем построены при высоких давлениях на основе расчетных данных по указанной модели с квантовыми и обменными поправками [23], а при низких — на основе экспериментальных данных по ударному сжатию. Это уравнение состояния не описывает диссоциацию и приближенно описывает ионизацию. Для расчета столкновения и разлета сильнопористых частиц разработано уравнение состояния смеси газов ГИД с учетом внутренних колебаний молекул, приближенным описанием диссоциации и учетом ионизации по модифицированной модели Саха [24]. Для уточняющих расчетов на основе [23, 25] и ГИД разработано уравнение состояния ГАУС, которое описывает поведение простых веществ, сложных химических соединений и их смесей в широком диапазоне изменения плотностей и температур и учитывает испарение, внутримолекулярные колебания, диссоциацию и ионизацию. Для экономичности расчетов на ЭВМ уравнения состояния ГИД и ГАУС переведены в табличную форму ГЛОБУС [26].

Для описания части серебряного экрана, которая оказывается в состоянии плотной плаз-

мы, можно применять уравнение состояния [22], а для более холодной — уравнение [27], которое точнее описывает испарение.

Для всех предполагаемых составов пылинок подобраны оптимальные параметры полуэмпирических уравнений состояния на основе экспериментальных и теоретических данных.

### 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

На основе вычислительных экспериментов изучена эволюция характеристик различных частиц разлетающегося плазменного облака. Исследованы на стадии закалки ионизации зависимости средних зарядов ( $C_e$ ) серебра, веществ кометной пылинки и отдельных химических элементов, входящих в ее состав, от различных параметров пылинки (пористости разной структуры — гомогенной и гетерогенной, массы, формы, химического состава) и условий ее соударения с экраном. Основное внимание в расчетах уделялось тем лагранжевым частицам плазмы, регистрация ионного состава которых с учетом ряда ограничений, вызванных конструктивными особенностями прибора ПУ-МА, наиболее вероятна. В некоторых случаях для контроля определялись концентрации нейтральных атомов, одно- и двухзарядных ионов.

Сравнительные расчеты в дву- и трехмерной постановках соударения кометной пылинки и экрана и разлета плазменного облака показали, что, хотя в трехмерном расчете и происходит более интенсивное падение плотности и температуры, это приводит только к более ран-

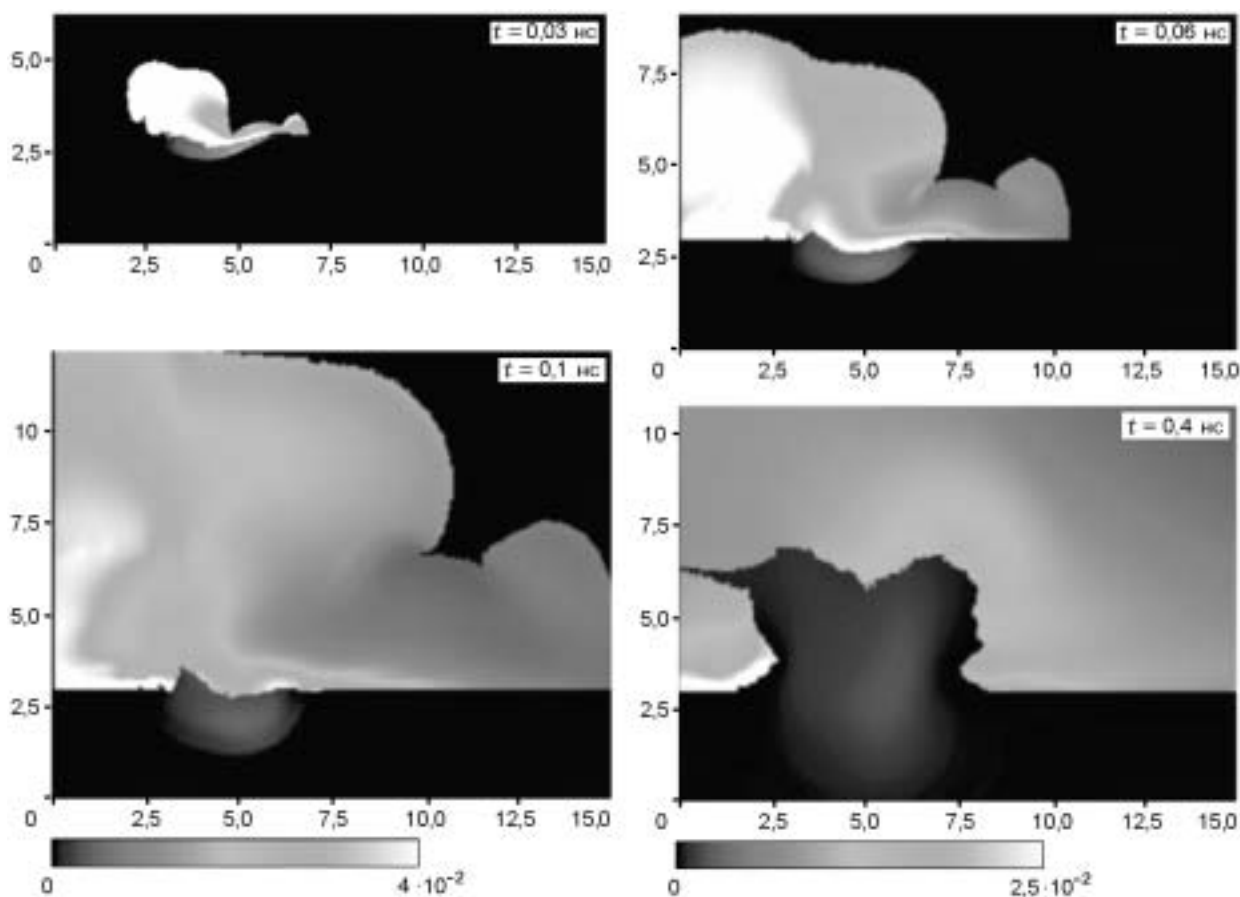


Рис. 4. Поля удельной внутренней энергии плазменного облака сплошной пылинки массой  $3 \cdot 10^{-12}$  г состава № 2 (см. таблицу) в различные моменты времени после соударения: внутренняя энергия приведена в единицах  $10^7$  Дж/г, размеры — в мкм

нему выходу на этап закалки ионизации. Значения степени ионизации практически совпадают (рис. 3). Дополнительно заметим, что в двумерных расчетах по различным комплексам (МАХ-3 и МЕЧ) получены достаточно близкие значения средних зарядов и для вещества пылинки, и для серебра. Поэтому для исследования различных характеристик плазменного облака можно использовать расчеты с двумя пространственными переменными, а для уточнения результатов — трехмерные расчеты.

Ниже приведены результаты, полученные в расчетах первого и второго этапов по комплексам МЕЧ и ТАРАН. Расчеты первого этапа проводились до установления инерционного разлета вещества в направлении регистрационного канала, второго — до стадии закалки ионизации.

#### 4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При всех предполагаемых химических составах пылинки и любой ее пористости характеристики плазменного облака существенно неоднородны: температура в пылинке  $4 \div 80$  эВ, скорость —  $2 \div 140$  км/с; средний заряд —  $0,005 \div 3,5$ . В случае большой пористости пылинки неоднородность и вихревые течения сохраняются дольше, чем для сплошной пылинки. Позднее наступает и этап закалки ионизации.

Для иллюстрации выбрана кометная пылинка нулевой пористости состава № 2 массой  $3 \cdot 10^{-12}$  г, попавшая в прибор ПУМА-2 (угол соударения  $30^\circ$ ). На рис. 4 показано распределение внутренней энергии в разные моменты времени, на рис. 5 — изменение во времени средних зарядов  $C_e$  лагранжевых частиц, дви-

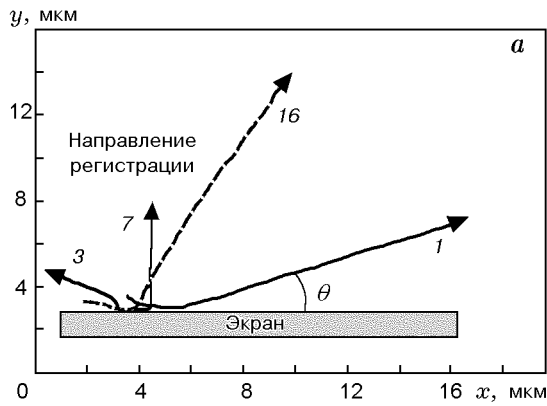
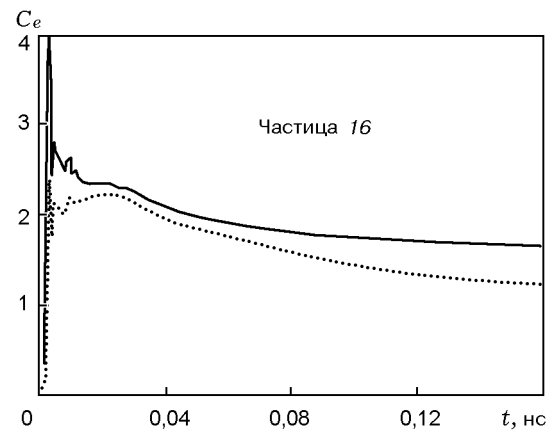
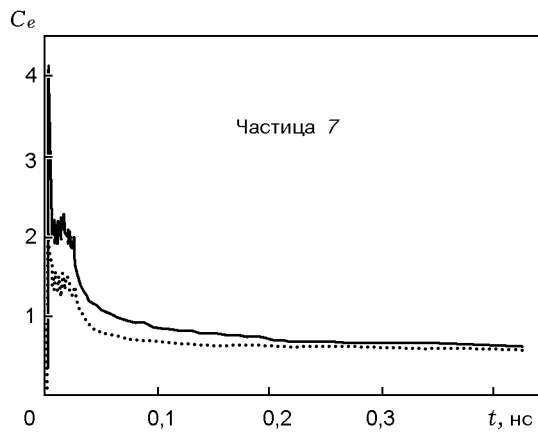
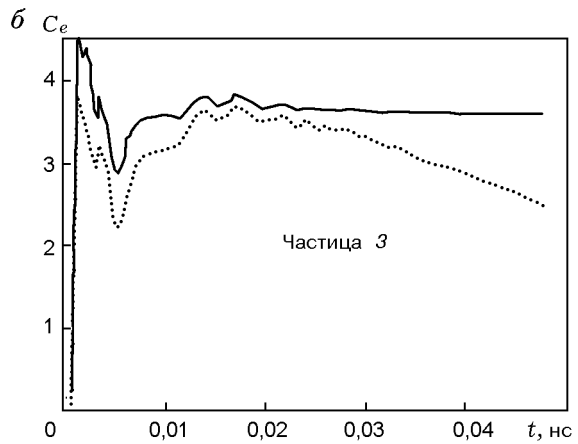
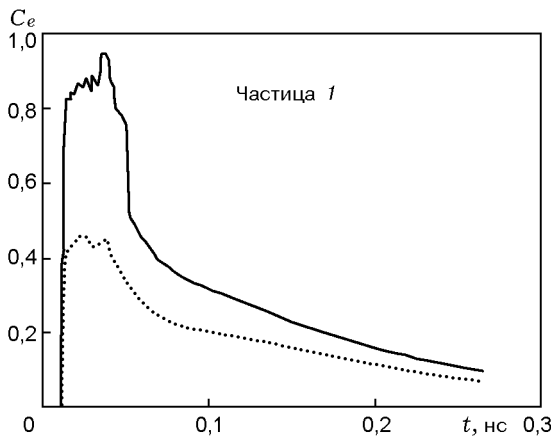


Рис. 5. Траектории разлета некоторых выделенных лагранжевых частиц после удара (а) и поведение среднего заряда плазмы в лагранжевых частицах (б):

пунктирные линии — расчет кинетики ионизации в приближении Саха — Больцмана и без учета эффектов неидеальности плазмы, сплошные линии — расчет в полной постановке



жущихся в разных направлениях плазменного облака, а на рис. 6 — изменение средних зарядов компонентов кометной пылинки.

Выделим некоторые результаты численного моделирования.

Уменьшение массы пылинки в  $10^3$  раз приводит к росту среднего заряда приблизительно в  $1,5 \div 3$  раза. Слабая зависимость  $C_e$  от массы пылинки, видимо, определяется тем, что при малой роли электронной теплопроводности

установившиеся значения температуры не зависят от количества соударяющегося вещества.

Увеличение пористости гомогенной структуры пылинки от 0 до 50 % и от 50 до 94 % при сохранении пылинкой той же массы для всех химических составов приводит к увеличению максимальных средних зарядов пылинки приблизительно в  $3 \div 3,5$  раза и к уменьшению — для серебра.

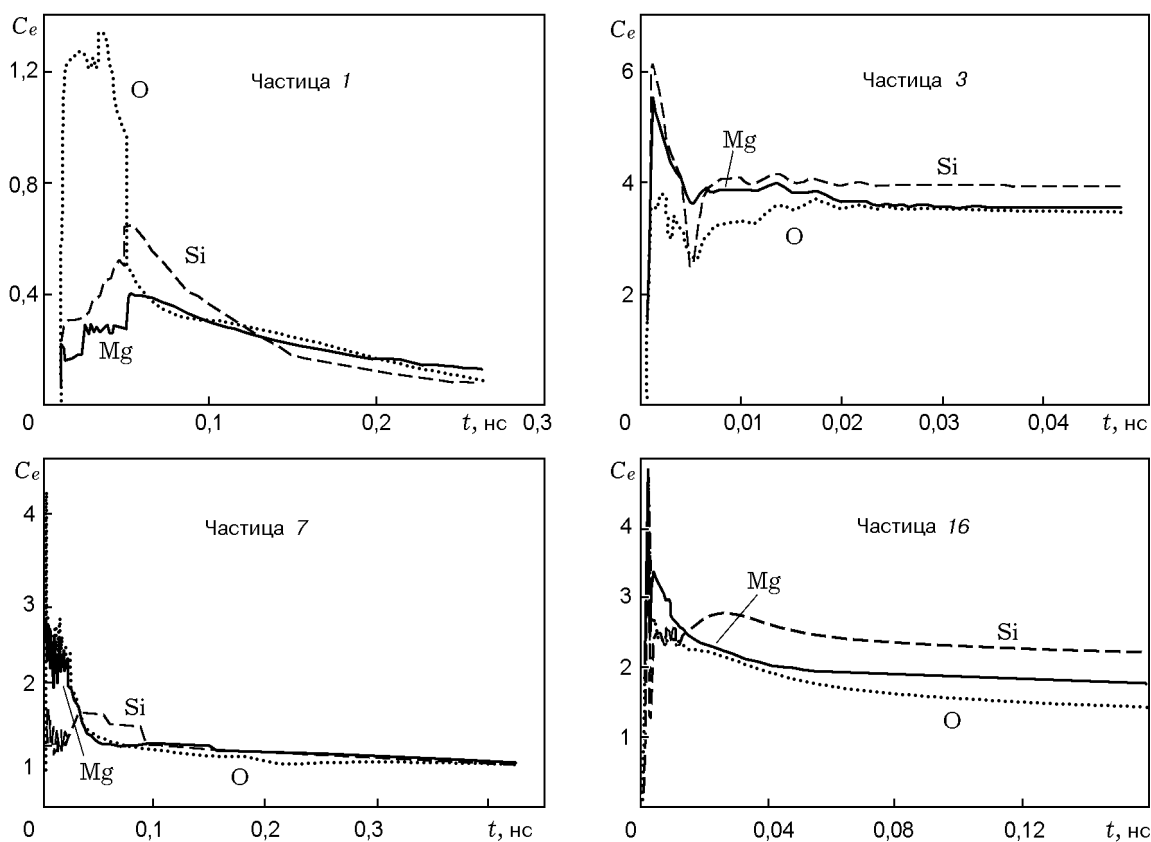


Рис. 6. Средние заряды компонентов плазмы Mg, Si и O

Средние заряды частиц, летящих в направлении регистрационного канала ПУМА-1 (угол соударения  $55^\circ$ ), меньше, чем для ПУМА-2 ( $30^\circ$ ), особенно большое отличие наблюдается для состава № 2, начальная плотность которого больше; в этом случае в прибор попадает в шесть раз меньше ионов пылинки и в девять раз меньше ионов серебра.

На параметры плазменного облака наибольшее влияние оказывает плотность пылинок различного химического состава. Увеличение начальной плотности пылинок в  $\approx 2$  раза при любой пористости приводит к увеличению средних зарядов в основной массе плазменного облака в  $\approx 1,5 \div 2$  раза. Средние заряды частиц сплошной пылинки массой  $10^{-12}$  г состава № 2 ( $\rho = 2,96$  г/см<sup>3</sup>), летящих в направлении регистрационного канала ПУМА-2, принимают значения  $0,1 \div 0,125$ , для состава № 5 ( $\rho = 1,45$  г/см<sup>3</sup>) —  $0,03 \div 0,06$ , а максимальные значения средних зарядов частиц серебра —  $0,04 \div 0,09$  и  $0,01 \div 0,04$  соответственно.

Изменение начальной формы сечения пы-

линки с квадрата на круг практически не повлияло на средние заряды ионов веществ пылинки, попадающих в прибор; в серебре происходило уменьшение средних зарядов.

В направлении регистрационных каналов летят сопоставимые полные массы ионов серебра и веществ кометной пылинки.

Если учесть, что каждому значению массы пылинки соответствует свое значение наиболее вероятной пористости, то попавшей в прибор ПУМА-2 кометной пылинке состава № 2 массой  $\approx 10^{-17}$  г соответствует средний заряд  $C_e \approx 0,4$ , массой  $\approx 10^{-15}$  г —  $0,6$ , массой  $\approx 10^{-14}$  г —  $0,7 \div 0,8$ , массой  $\approx 10^{-12}$  г —  $0,3 \div 0,8$ ; аналогичные результаты для состава № 5 —  $C_e = 0,05 \div 0,1$ ,  $0,3$ ,  $0,3 \div 0,6$  и  $0,23 \div 0,7$ .

Для сплошных и пористых кометных пылинок разных химических составов средний заряд лагранжевых частиц плазмы, летящих в направлении регистрационных каналов приборов ПУМА, меньше единицы ( $C_e < 1$ ), т. е. эти области плазмы — смесь нейтральных атомов и однозарядных ионов, что согласуется с экс-



периментальными данными [2].

Созданные средства математического моделирования в совокупности или отдельно могут быть использованы при решении ряда других проблем, связанных с высокоскоростным соударением, а также для исследования таких плазменных образований, как корона ЛТС-мишеней, Z-пинч, среда рентгеновских лазеров и т. п.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Пылеударный** масс-анализатор ПУМА // Описание и научные задачи международного проекта «Венера — Галлей» / Под ред. В. М. Балебанова, Г. А. Скуридина, Э. А. Воронцова. Париж: Луи-Жан, 1984. С. 108–114.
2. **Kissel J., Sagdeev R. Z., Bertaux J. L., et al.** Composition of comet Halley dust particles from Vega observation // *Nature*. 1986. V. 321. P. 280–282.
3. **Сагдеев Р. З., Евланов Е. Н., Зубков Б. В. и др.** Пылевая оболочка кометы Галлея по данным прибора ПУМА // *Космич. исследования*. 1987. Т. 25, вып. 6. С. 840.
4. **Сагдеев Р. З., Евланов Е. Н., Зубков Б. В. и др.** Анализ пылевых частиц кометы Галлея, основанный на данных, полученных прибором ПУМА в нулевой моде // Там же. С. 849–855.
5. **Sagdeev R. Z., Evlanov E. N., Prilutskii O. F., and Zubkov B. V.** Small-size dust particles near Halley's comet // *Adv. Space Res.* 1989. V. 9, № 3. P. 263–267.
6. **Евланов Е. И., Прилуцкий О. Ф., Фоменкова М. Н.** Оценка массы пылевых частиц кометы Галлея по результатам эксперимента ПУМА // *Космич. исследования*. 1991. Т. 29, вып. 4. С. 641–646.
7. **Симоненко В. А., Синько Г. В.** Достижения и проблемы теории уравнений состояния // *Теплофизика высоких температур*. 1988. Т. 26, № 5. С. 864–973.
8. **Шушлебин А. Н., Фролов В. Д., Лыков В. А.** Численное моделирование двумерных газодинамических течений в трехтемпературном приближении // *Вычислит. технологии*. 1995. Т. 4, № 13.
9. **Fraley C. S., Linnebur E. Y., Mason R. Y., Morse R. I.** Thermonuclear burn characteristics of compressed deuterium — tritium microspheres // *Phys. Fluids*. 1974. V. 17, N 2.
10. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963.
11. **Харлоу Ф. Н.** Численный метод «частиц в ячейках» для задач гидродинамики // *Вычислительные методы в гидродинамике*. М.: Мир, 1967.
12. **Анучина Н. Н., Петренко В. Е., Шокин Ю. И., Яненко Н. Н.** О численных методах решения задач газовой динамики с большими деформациями // *ЧММСС*. 1970. Т. 1, № 1.
13. **Анучина Н. Н.** О методах расчета течений сжимаемой жидкости с большими деформациями // *ЧММСС*. 1970. Т. 1, № 4.
14. **Аврорин Е. Н., Анучина Н. Н., Гаджиева В. В. и др.** Численное моделирование взаимодействия пылевидных частиц кометы с космическим аппаратом. М., 1985. (Препр. / АН СССР. ИПМ; № 177); *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32, № 2. С. 117–123.
15. **Hirt C. W., Amsden A. A., Cook J. L.** An arbitrary Lagrangian — Eulerian computing method for all flow speed // *J. Comput. Phys.* 1974. V. 14, N 3.
16. **Anuchina N. N., Volkov V. I., Es'kov N. S.** Numerical modeling of multi-dimensional flows with large deformations. Report at Russian // U.S. Weapons Laboratories Introductory Technical Exchange in Computational and Computer Science. Livermore, 1992.
17. **Анучина Н. Н., Волков В. И., Еськов Н. С.** Численный метод расчета контактных границ с большими деформациями // *V Заббахинские научные чтения*. Снежинск, 1998.
18. **Anuchina N. N., Gordeichuck V. A., Es'kov N. S., Puytina O. S., Kozyrev O. M., Volkov V. I.** Tree-dimensional numerical simulation of Rayleigh — Taylor instability by MAH-3 Code // *Proc. of the Sixth Intern. Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing / G. Jourdan and L. Houas (Eds)*. Marseille, 1997.
19. **Анучина Н. Н., Волков В. И., Гордейчук В. А., Еськов Н. С., Илютина О. С., Козырев О. М.** Метод и комплекс программ MAH-3 численного моделирования трехмерных задач газовой динамики // *Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики*. Новороссийск, 1998.
20. **Лыков В. А., Политов В. Ю., Шинкарев М. К.** Программа для расчетов кинетики активных сред рентгеновского лазера. Челябинск-70, 1994. (Препр. ВНИИТФ; № 39).
21. **Хокни Р., Иствуд Дж.** Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987.
22. **Елисеев Г. М., Клинищев Г. Е.** Уравнение состояния твердых веществ и его сплайн-аппроксимация. М., 1982. (Препр. / АН СССР. ИПМ; № 173).
23. **Калиткин Н. Н., Кузьмина Л. В.** Таблицы термодинамических функций вещества при высокой концентрации энергии. М., 1975. (Препр. / АН СССР. ИПМ; № 35).
24. **Калиткин Н. Н., Ритус И. В., Мионов А. М.** Ионизационное равновесие с учетом вырождения электронов. М., 1983. (Препр. / АН СССР. ИПМ; № 46).

25. Сапожников А. Т., Першина А. В. Полуэмпирическое уравнение состояния металлов в широком диапазоне плотностей и температур // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач мат. физики. 1979. Вып. 4 (6). С. 47–56.
26. Сапожников А. Т., Герцук П. Д., Шахова Л. Н. и др. Широкодиапазонное уравнение состояния ГЛОБУС и его применение для описания меди // Вопросы атомной науки. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1991. Вып. 1. С. 9–17.
27. Сапожников А. Т., Першина А. В. Интерполяционное уравнение состояния в области испарения // Вопросы атомной науки. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1984. Вып. 2 (16). С. 29–33.

*Поступила в редакцию 25/III 2003 г.*

---