

УДК 523.68:52-44

ОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТИЦ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ, ДВИГАЮЩИХСЯ В АТМОСФЕРЕ

© 2024 г. В. Ю. Тугаенко^{a,*}, А. В. Водолажский^a, Р. А. Евдокимов^a

^aПубличное акционерное общество “Ракетно-космическая корпорация

“Энергия” им. С.П. Королёва”, Королев, Россия

*e-mail: vjatcheslav.tugaenko@rsce.ru

Поступила в редакцию 10.01.2024 г.

После доработки 22.04.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

Космические тела при прохождении атмосферы Земли подвергаются значительным нагрузкам из-за воздействия высокоскоростного потока газа на их поверхность. Под действием аэродинамических сил и сильных тепловых потоков происходит разрушение этих тел. Механизмы разрушения зависят от их состава, структуры, скорости, размера и прочности. Искусственные космические тела двигаются в атмосфере, в основном сохраняя свою ориентацию в пространстве, и долетают до поверхности, сохраняя целостность из-за высокой прочности. В результате поверхностного разрушения лобовой части этих тел продукты разрушения поступают в плазменный слой, окружающий их при движении в атмосфере. Особенности конструкции спускаемого аппарата Союз позволили исследовать пылевую компоненту плазменного слоя по налету, осевшему на иллюминаторе. Проанализированы данные по частицам, выявленным на поверхности космического аппарата, приводятся результаты статистического анализа полученного распределения частиц по размерам. Показано, что кривая распределения хорошо описывается степенным законом.

Ключевые слова: космические тела, поверхностное разрушение, частицы в плазме, налет на иллюминаторе, степенное распределение

DOI: 10.31857/S0320930X24060088, EDN: NHLKWW

ВВЕДЕНИЕ

Космические тела искусственного и естественного происхождения при прохождении атмосферы Земли подвергаются значительным нагрузкам из-за воздействия высокоскоростного потока газа на их поверхность. Под действием аэродинамических сил, возрастающих по мере проникновения тел в более плотные слои атмосферы, и сильных тепловых потоков от нагретого газа между поверхностью тела и фронтом ударной волны происходит разрушение этих тел. Механизмы разрушения метеороидов в атмосфере зависят от их состава, скорости, структуры, размера и прочности. Разработаны различные подходы к моделированию их разрушения

(Брыкина, 2018). Для достижения соответствия расчетов данным наблюдений в последние годы используют гибридные модели, в которых учитываются разные типы дробления – на крупные куски и на скопление мелких осколков (Slepcha, ReVelle, 2005). Гибридная модель фрагментации крупного метеороида применялась так же и для описания пылевой компоненты (мелких частиц миллиметровых размеров) (Вогорицка и др., 2013). Натурные измерения характеристик пылевых частиц, составляющих аэрозольный след Челябинского астероида, были проведены на метеорологическом спутнике NASA/NOAA NPP/Suomi с прибором OMPS Limb Profiler, предназначенным для получения профилей озона и аэрозолей с высоким вертикальным

разрешением на основе измерений рассеянного солнечного излучения в спектральном диапазоне 290–1000 нм. Был обнаружен избыток аэрозоля в средней стратосфере (высота 25–45 км) (Gorkavyi и др., 2013). Измеренные профили поглощения солнечного излучения на различных длинах волн показали наличие крупных частиц микронного размера в пылевом шлейфе Челябинского астероида.

Искусственные космические тела двигаются в атмосфере, в основном сохраняя свою ориентацию в пространстве, и долетают до поверхности, сохраняя целостность из-за высокой прочности и применения “мягкой” посадки. У таких тел разрушению подвергается только их внешняя поверхность, главным образом из-за сильных тепловых потоков. Продукты разрушения поступают, в основном, в плазменный поток, обтекающий космические аппараты с подветренной стороны. Процессы образования и эволюции пылевых частиц при прохождении космических тел через атмосферу, насколько известно авторам настоящей работы, детально не исследовались. Интересно отметить, что кроме упомянутых выше экспериментальных исследований аэрозольного следа Челябинского астероида, в составе пыли, осевшей на снеговой покров, были неожиданно обнаружены ограниченные углеродные частицы с размерами в несколько десятков микрометров, образовавшиеся, вероятнее всего, на этапе прохождения фрагментов через атмосферу (Savosteenko и др., 2023). Как упоминалось выше, такие процессы не исследовались для плазмы, окружающей космические тела, проходящие через атмосферу, но детальные исследования процессов образования частиц в низкотемпературной плазме проводились в работах по плазменному травлению и плазменной обработке поверхностей, где образование пылевых частиц является распространенным явлением. Актуальной является проблема пыли в пристеночной плазме в установках управляемого термоядерного синтеза (Цытович, Винтер, 1998; Фортов и др., 2004). Известны два механизма формирования пылевых частиц: 1) инъекция пылевых частиц со стенок; 2) конденсация вещества из перенасыщенного пара сложных молекул и кластеров в результате последовательных ионно-молекулярных реакций. В экспериментальных исследованиях явлений, связанных с частицами в плазме низкого давления, показано, что образование и рост пылевых частиц проходит через три последовательных этапа: образование кристаллических кластеров,

образование агрегатов с размерами в десятки нм путем коагуляции и роста частиц за счет поверхностного осаждения различных радикалов до размеров микронного уровня (Boufendi, Bouchoule, 1994; Kamata и др., 1994). В настоящей работе не исследуются процессы образования частиц в плазме, окружающей космические тела при прохождении атмосферы, но приводимые здесь сведения, возможно, указывают на направления поиска объяснений, приводимых в последующих разделах результатов экспериментальных исследований.

Возвращаемые космические аппараты Фотон (Reimer, 2006) и Союз (Bruce, 2013), имеющие поперечные размеры около 2 м и массу несколько тонн, входят в плотные слои атмосферы с орбитальной скоростью около 8 км/с. С такой же скоростью входила в атмосферу и возвращаемая баллистическая капсула Радуга, диаметр которой составляет 0.78 м. Тепловые нагрузки на поверхность этих тел детально исследовались по состоянию теплозащитного покрытия аппаратов, а также по результатам измерений температурных датчиков (для Радуги), расположенных вблизи поверхности спускаемого аппарата. Несмотря на различия в форме и размерах и различные траектории спуска, в целом теплофизическую картину воздействия набегающего потока на эти космические объекты можно описать единообразно. Максимальное динамическое давление (~0.02 МПа) реализуется на высоте ~45–35 км при скорости ~4 км/с. На этом же участке траектории происходит и максимальный нагрев поверхности тел при воздействии теплового потока ~500–1500 кВт/м², максимальная температура на лобовой части достигает значений ~1500°C для Союза и Фотона и ~2200°C для Радуги. Время “поддержания” высокой температуры, соответствующее основному вкладу в процессы поверхностного разрушения тела и оцениваемое по полной ширине на уровне половины высоты зависимости температуры от времени, составляет 200–230 с.

АЭРОФИЗИКА ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Наиболее детально аэрофизика прохождения атмосферы искусственным космическим телом изучена для спускаемого аппарата (СА) Союз (Суржиков, 2016; 2018; Власов, 2012a; 2012b; Тугаенко и др., 2023). Внешний вид спускаемого аппарата приведен на рис. 1.

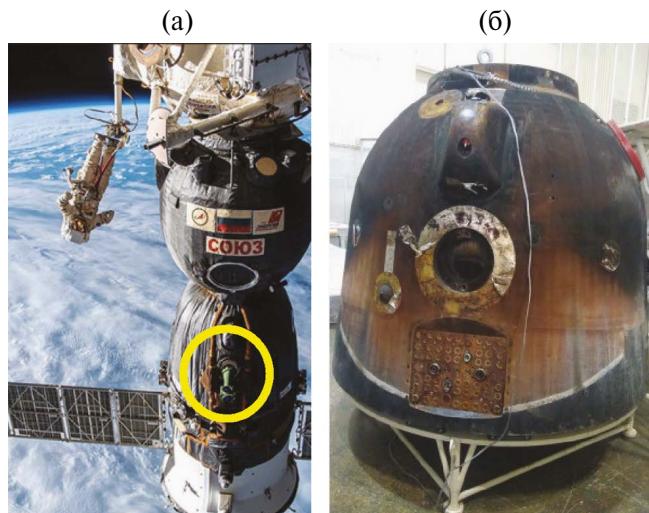


Рис. 1. Спускаемый аппарат в составе транспортного пилотируемого корабля Союз: (а) – в составе МКС, желтым кружком обозначено место расположения иллюминатора; (б) – после спуска.

СА входит в плотные слои атмосферы, имея балансировочный угол атаки в интервале 20° – 30° на участке аэродинамического нагрева. Форма СА осесимметричная, сегментально-коническая и состоит из двух сферических участков и одного участка конической формы. Масса аппарата 2.8 т, длина 2.16 м, диаметр 2.2 м. Продольная дальность движения в атмосфере составляет примерно 2500 км. Форма СА Союз и положение центра масс обеспечивают его устойчивый полет до завершения интенсивного нагрева во время спуска. Тепловая защита СА (Врице, 2013) состоит из двух частей – лобового теплозащитного экрана (ЛТЭ) и сферо-конического участка. ЛТЭ имеет форму сферического сегмента и расположен в передней относительно набегающего потока части СА. ЛТЭ выполнен из слоистого пластика ПКТ-11-К-ФЛ (изготовленного из вязально-прошивного полотна на основе кремнеземно-капроновой ткани, пропитанной фенольно-формальдегидными смолами). Элементный состав ЛТЭ, определенный методом рентгеновского спектрального микронализа, приведен в табл. (Тугаенко и др., 2021). В составе теплозащитного материала методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой были так же определены следующие технологические примеси: магний, калий, железо, кальций, медь, фосфор, хром, цинк и другие элементы в количестве не более 0.1% по массе для каждого компонента.

Таблица. Концентрация элементов в образце теплозащитного материала лобового щита

| Хим. элемент | C | N | O | Na | Al | Si | Cl | Ni |
|---------------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|
| Мас. конц., % | 69.8 | 3.7 | 21.6 | 0.13 | 0.3 | 3.9 | 0.1 | 0.4 |

Основная часть набегающего воздушного потока приходится на лобовой теплозащитный экран, подвергающийся интенсивным конвективным и радиационным нагрузкам от высокотемпературного сжатого слоя (Анфимов, Румынский, 1982). Сжатый слой между фронтом ударной волны и поверхностью ЛТЭ на высотах от 80 до 45 км имеет толщину 12–16 см, распределение поступательной температуры в нем крайне неоднородно, а максимальные температуры газа составляют от 10000 К до 4500 К, соответственно. Высокие температура и плотность в сжатом слое приводят к протеканию большого числа химических процессов. В работе (Тугаенко, 2021) впервые сделаны оценки химического состава сжатого слоя и плазменного потока в подветренной области с учетом термохимического разрушения материала ЛТЭ. Кинетическая модель газофазных процессов включала 87 химических реакций для 21 химической компоненты. В полученных расчетных данных отметим наибольшие концентрации. Это атомы C, N и O и молекулы N₂, NO, в центральной области сжатого слоя и C₃, CO, HCN вблизи поверхности. В работе (Суржиков, 2016) показано, что на высотах менее 60 км течение в значительной части сжатого слоя вдоль поверхности ЛТЭ дозвуковое, что позволяет оценить время на реализацию различных механизмов синтеза сложных образований, упоминавшихся ранее. Исследования состояния ЛТЭ после прохождения атмосферы показывают, что наибольший унос материала наблюдается в областях, где создаются локальные зоны турбулентности из-за выступающих в поток элементов конструкции и по краям щита.

При воздействии теплового потока разрушение поверхности космического тела происходит не только в результате процессов абляции, но существенную роль играет и эрозия, механический унос вещества в виде отдельных частиц, возникающий под действием внутреннего давления или внешних сил, а также вследствие термических напряжений (Полежаев, Юрьевич, 1976). Эти частицы, попадая в поток плазменного сжатого слоя, двигаются вдоль лобовой поверхности тела и затем в потоке, обтекающем

тело с подветренной стороны, могут оседать (в случае с жидкими частицами – конденсироваться) на поверхности, имеющей относительно низкую температуру. Большая часть частиц, конечно, поступает вслед за двигающимся в атмосфере телом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Исследование состава и характеристик пылевой плазмы, образующейся на лобовой поверхности СА Союз и “стекающей” в сторону сравнительно холодной подветренной области, частично оседая на его поверхности, возможно, благодаря наличию в конструкции СА расположенного в этой области иллюминатора (см. рис. 1б). Российской научной программой исследований на МКС планируется проведение серии экспериментов по изучению свечения плазмы на всей трассе спуска в диапазоне длин волн от 300 до 1000 нм. При наземной подготовке этих работ выяснилось, что информацию о пылевой составляющей плазмы можно получить, исследуя поверхность иллюминатора. На рис. 2 приведена фотография фрагмента поверхности иллюминатора, на котором после прохождения СА атмосферы при возвращении на Землю образовался налет от оседания компонентов сжатого слоя, стекающего во время полета в направлении подветренной стороны аппарата. Анализ расположения налета на 21 иллюминаторе спускаемых аппаратов, возвратившихся с орбиты в период с 2011 по 2022 гг., показал, что наиболее часто (~70%) реализуется неравномерное распределение налета по поверхности с зоной наиболее интенсивного осаждения налета, занимающей до 30% площади иллюминатора (Тугаенко, и др., 2024). Проведенный в этой же статье анализ алгоритма работы системы управления спуска СА и особенностей конструкции дал основания считать, что зона интенсивного налета образуется в период времени, характеризуемый максимальной тепловой нагрузкой на лобовую часть спускаемого аппарата, т.е. на высотах от 45 до 35 км, в течение промежутка времени ~120 с. На рис. 2 отчетливо видно, что в составе налета можно различить отдельные частицы с размерами от единиц микрометров до долей мм. Средняя толщина налета, измеренная на лазерном конфокальном микроскопе, составляла ~3 мкм при плотности ~0.4 г/см³.

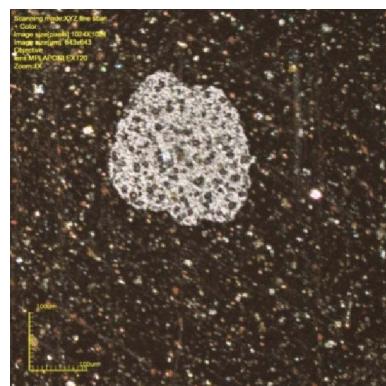


Рис. 2. Фотография фрагмента поверхности иллюминатора с налетом, образовавшимся при прохождении СА атмосферы.

Для проведения исследования статистических закономерностей распределения частиц по размерам с помощью стереомикроскопа Carl Zeiss Stemi 508doc (Германия) были сделаны несколько десятков снимков с использованием объектива 5× и подсветкой холодным белым цветом. Оцифрованные изображения областей исследования размерами 2.5 на 1.5 мм с разрешением 0.792 пикс/мкм изучались на предмет наличия в них частиц с помощью программного инструмента ImageJ, который является общедоступной программой обработки изображений на основе Java, разработанной в Национальном институте здравоохранения США. (Collins, 2007). Для зоны интенсивного налета (по 10 снимкам общей площадью ~25 мм², что составило ~0.3% от исследуемой площади) было выделено ~20000 частиц. Использовался подход, отработанный в аэрозольной физике при проведении прямых исследований распределения частиц по размерам в аэродисперсных системах, при котором для характеристики размера частиц используется проекционный диаметр круга (эффективный диаметр – D) с площадью, равной площади проекции частицы.

Исследовалось распределение числа частиц $N(D)$ в зависимости от их размеров. На рис. 3 ромбами показано количество частиц, приходящееся на интервал значений диаметра шириной 1 мкм для интервала эффективных диаметров от 4 до 59 мкм.

Проведенный статистический анализ показал, что полученные экспериментальные данные описываются степенным законом: $N(D) \propto D^{-\alpha}$. В интервале размеров от 5 до 25 мкм (90% всех частиц, по аналогии с аэрозолями их можно

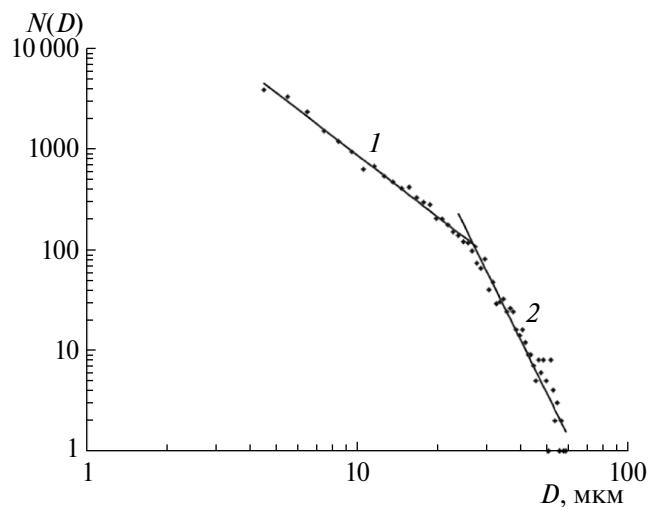


Рис. 3. Распределение частиц на поверхности иллюминатора по размерам: 1 – степенная функция с показателем степени 2.1 для размеров частиц в интервале от 5 до 25 мкм; 2 – степенная функция с показателем степени 5.5 для размеров частиц в интервале от 26 до 59 мкм.

классифицировать как среднедисперсные) распределение хорошо (доверительная вероятность $>95\%$) описывается степенным законом распределения с показателем степени $\alpha = 2.1 \pm 0.1$. Для частиц с размерами больше 25 мкм (грубодисперсные) распределение также хорошо описывается степенным законом (доверительная вероятность $>90\%$), но с показателем $\alpha = 5.5 \pm 0.4$.

Следует отметить, что анализировались проекционные размеры частиц, расположенных на плоской поверхности после осаждения из плазменного слоя. Частицы при осаждении и в процессе остывания могли деформироваться с уменьшением высоты (расплющиваться), но даже в самом консервативном случае, при котором продольный размер среднеразмерных частиц уменьшался до толщины налета на иллюминаторе, показатель степени увеличивался от значения 2.1 до величины 3.0, что не меняет полученного представления о бимодальном распределении во всем интервале наблюдаемых размеров. Предполагается, что грубодисперсные частицы более устойчивы к деформации при осаждении, что определяется природой их происхождения. Отдельный вопрос, пока остающийся неисследованным, связан с наличием и относительным количеством жидких частиц в плазме, образующихся при плавлении легкоплавких материалов, входящих в состав

космических тел. Возможно, на рис. 2 представлена такая, редко встречающаяся, капля, растекшаяся по поверхности.

Степенное распределение для фрагментов разрушаемых тем или иным образом тел встречается в природе достаточно часто. При фрагментации естественных космических тел, входящих в атмосферу Земли, распределение фрагментов по массам является важной характеристикой их разрушения и, как правило, описывается степенным законом, для которого значение степенного индекса подбирается с использованием экспериментальных результатов исследований разрушений различных типов (Брыкина, Егорова, 2022). Распределение размеров фрагментов по степенному закону было замечено при анализе наблюдений за разрушением основного корпуса космического аппарата Hayabusa при его возвращении в атмосферу Земли (Watanabe и др., 2011). В большом количестве экспериментальных работ по динамическому разрушению различных объектов кривая распределения фрагментов от их линейного размера (площади или массы) обычно разбивается на два (иногда три) сегмента, которым соответствуют разные показатели степени для “мелкодисперсной” и “крупнодисперсной” мод (Сильвестров, 2004). В данных, представленных в настоящей статье, так же обнаружена эта закономерность. Следует отметить, что, как упомянуто в вышеприведенной работе, статистические теории фрагментации базируются на принципах случайности, без рассмотрения сложной физики разделения тела на фрагменты. С нашей точки зрения, представленные в настоящей работе экспериментальные данные могут свидетельствовать о различных механизмах образования частиц, например, как упомянуто выше, среднедисперсные частицы могут образовываться в результате конденсации вещества из перенасыщенного пара сложных молекул и кластеров, а грубодисперсные частицы в своей первооснове образуются из-за процессов эрозии космического тела. Подтверждение правомерности этой гипотезы может дать планируемое исследование морфологических характеристик частиц на поверхности СА и определение их элементного состава. Ранее были опубликованы результаты электронно-микроскопических и рентгеноструктурных исследований состава налета, осевшего на иллюминаторе СА, обнаруживших разнообразные ограненные частицы, часть из которых была идентифицирована как минералы, изначально отсутствовавшие в составе теплозащитного

покрытия (Tugaenko и др., 2021). Присутствие в составе налета аэрозольных частиц из стратосферы представляется крайне маловероятным по причине их незначительной концентрации на этих высотах, а также разрушения в высокотемпературном сжатом слое большинства известных типов таких частиц (Solomon и др., 2011). Следует отметить, что частицы космической пыли (Carrillo-Sánchez и др., 2015; 2020), пережившие вход в атмосферу, такие, например, как космические сферулы, в принципе, будучи захваченными в плазменный слой вокруг спускаемого аппарата, могут без разрушения осесть на поверхности аппарата и быть обнаружеными при исследованиях налета на иллюминаторе электронно-микроскопическими методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вокруг возвращаемых космических аппаратов, равно как и крупных метеороидов, при прохождении атмосферы Земли с гиперзвуковой скоростью образуется слой пылевой плазмы, химический состав которого определяется в основном продуктами термодеструкции лобовой части тела в результате взаимодействия с набегающим воздушным потоком. Особенности конструкции спускаемого аппарата Союз позволили исследовать пылевую компоненту плазменного слоя по налету, осевшему на иллюминаторе, расположенному в подветренной зоне. Для проведения исследования статистических закономерностей распределения частиц по размерам – $N(D)$ (D – эффективный диаметр частиц) использовались фотографии поверхности, полученные с помощью стереомикроскопа. С помощью программного инструмента ImageJ было выделено ~ 20000 частиц на площади $\sim 25 \text{ mm}^2$. Статистическое исследование показало, что полученные экспериментальные данные хорошо описываются бимодальным степенным распределением ($N(D) \propto D^{-\alpha}$), состоящим из двух сегментов, которым соответствуют разные показатели степени α , с более крутым наклоном для крупных фрагментов. Для среднедисперсных частиц в интервале размеров от 5 до 25 мкм распределение хорошо описывается степенным законом распределения с показателем степени $\alpha = 2.1 \pm 0.1$, а для грубодисперсных частиц с размерами больше 25 мкм с показателем степени $\alpha = 5.5 \pm 0.4$. По аналогии с процессами образования частиц в низкотемпературной плазме высказывается гипотеза о возможном объяснении обнаруженной особенности распределения

частиц по размерам различными механизмами образования частиц, что предлагается проверить исследованием морфологических характеристик частиц на поверхности СА и определением их элементного состава.

Исследование выполнено в рамках инициативной работы авторов при наземной подготовке космического эксперимента “Плазма-СА”, входящего в Программу отработки перспективных космических технологий, необходимых для освоения космического пространства, реализуемую Госкорпорацией “Роскосмос” на МКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфимов Н.А., Румынский А.Н. Лучисто-конвективный теплообмен и теплозащита космических аппаратов, спускаемых на поверхность Земли и других планет Солнечной системы. Проблемы механики и теплообмена в космической технике. М.: Машиностроение, 1982. 272 с.
2. Брыкина И.Г. О модели фрагментации крупного метеороида: моделирование взаимодействия Челябинского метеороида с атмосферой // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 437–446. (Brykina I.G. Large meteoroid fragmentation: modeling the interaction of the Chelyabinsk meteoroid with the atmosphere // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. P. 426–434.)
3. Брыкина И.Г., Егорова Л.А. О степенном законе для описания распределения фрагментов разрушенного космического тела по массам // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 5. С. 356–368. (Brykina I.G., Egorova L.A. On the power law for describing the mass distribution of fragments of a disrupted cosmic body // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. P. 338–350.)
4. Власов В.И., Залогин Г.Н., Ковалев Р.В., Чураков Д.А. Лучисто-конвективный теплообмен спускаемого аппарата с разрушающей тепловой защитой // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012а. www.Chemphys.edu.ru/pdf/2012-12-26-001.pdf.
5. Власов В.И., Залогин Г.Н., Лунев В.В., Чураков Д.А. Лучисто-конвективный теплообмен спускаемых аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012б. www.Chemphys.edu.ru/pdf/2012-02-16-001.pdf.
6. Полежаев Ю.В., Юрьевич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 408 с.
7. Сильвестров В.В. Применение распределения Гилварри для описания статистики фрагментации твердых тел при динамическом нагружении // ФГ В. 2004. Т. 40. № 2. С. 111–124.
8. Суржиков С.Т. Аэрофизика гиперзвукового потока воздуха у поверхности спускаемого

- космического аппарата на высотах менее 60 км // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 5. С. 33–45.
9. Суржиков С.Т. Пространственная задача аэрофизики сверхорбитального космического аппарата на больших высотах // Докл. АН. 2018. Т. 482. № 3. С. 270–274.
10. Тугаенко В.Ю., Грибков А.С., Суржиков С.Т. Физико-химические характеристики плазменного потока, окружающего возвращаемые космические аппараты при входе в атмосферу Земли с орбитальной скоростью // Теплофизика высоких температур. 2023. № 3. Т. 61. № 3. С. 1–10.
11. Тугаенко В.Ю., Грибков А.С., Гранкина Е.Н., Шербенко Н.В. Особенности обтекания плазменным потоком спускаемого космического аппарата на спуске при наличии выступа на боковой поверхности // Инженерный журнал: наука и инновации. 2024. Вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-1-2328>
12. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак В.И., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // УФ Н. 2004. Т. 174. № 5. С. 495–542.
13. Цытович В.Н., Винтер Дж. Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза // УФ Н. 1998. Т. 168. № 8. С. 899–907.
14. Borovička J., Toth J., Igaz A., Spurný P., Kalenda P., Haloda J., Svoren J., Kornos L., Silber E., Brown P., Husarik M. The Košice meteorite fall: Atmospheric trajectory, fragmentation, and orbit // Meteorit. and Planet. Sci. 2013. V. 48. P. 1757–1779.
15. Boufendi L., Bouchoule A. Particle nucleation and growth in a low-pressure argon-silane discharge // Plasma Sources Sci. Technol. 1994. № 3. P. 262–267.
16. Bruce A. Davis. International Space Station Soyuz Vehicle Descent Module Evaluation of Thermal Protection System Penetration Characteristics // NASA Lyndon B. Johnson Space Center, JSC-66527, Houston, Texas, USA, 2013.
17. Carrillo-Sánchez J.D., Plane J.M., Feng W., Nesvorný D., Janches D. On the size and velocity distribution of cosmic dust particles entering the atmosphere // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 6518–6525.
18. Carrillo-Sánchez J.D., Gomez-Martin, Bones D.L., Nesvorný D., Pokorný P., Benna M., Flynn G.J., Plane J.M. Cosmic dust fluxes in the atmospheres of Earth, Mars, and Venus // Icarus. 2020. V. 335. Id. 113395.
19. Ceplecha Z., ReVelle D.O. Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere // Meteoritics and Planet. Sci. 2005. V. 40. № 1. P. 35–54.
20. Collins T.J. ImageJ for microscopy // BioTechniques. 2007. V. 43. № 1S. P. S25–S30.
21. Gorkavyi N., Rault D.F., Newman P.A., da Silva A.M., Dudorov A.E. New stratospheric dust belt due to the Chelyabinsk bolide // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 4728–4733.
22. Kamata T., Kakuta S., Yamaguchi Y., Makabe T. A correlation between particle growth and spatiotemporal RF plasma structure // Plasma Sources Sci. Technol. 1994. № 3. P. 310–313.
23. Reimer T. The KERAMIK Thermal Protection System Experiment on the FOTON-M2 Mission // Proc. 5th European Workshop: Thermal Protection Systems and Hot Structures, held 17–19 May, 2006 at ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. 2006 / Ed. Fletcher K. ESA SP-631.
24. Savosteenko G., Taskaev S., Avramov P. Structure and Raman spectra of exotic carbon microcrystals from meteoritic dust of Chelyabinsk superbolide // Nanomaterials. 2023. № 13. P. 73–83.
25. Solomon S., Daniel J.S., Neely R.R., Vernier J.-P., Dutton E.G., Thomason L. The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change // Science. 2011. V. 333. № 6044. P. 866–870.
26. Tugaenko V.Y., Ovchinnikov D.S., Isaenkova M.G., Kargin N.I., Krymskaya O.A., Timofeev A.A., Babich Y.A. The chemical and mineral composition of particles precipitated from a plasma–dust layer on the porthole of the descend space vehicles during the passage of the Earth's atmosphere // Geochem. Intern. 2021. V. 59. № 1. P. 107–112.
27. Watanabe J., Ohkawa T., Sato M., Ohnishi K., Iijima Y. Fragmentation of the HAYABUSA spacecraft on reentry // Publ. Astron. Soc. Japan. 2011. V. 63. P. 955–960.