03

Капли, образующиеся при абляции поверхности космических аппаратов в атмосфере

© В.Ю. Тугаенко,[1] Р.А. Воропаев,[1] Р.М. Хацаева[2]

[1] Ракетно-космическая корпорация „Энергия“ им. С.П. Королёва,
141070 Королев, Россия
[2] Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН,
119071 Москва, Россия
e-mail:vjatcheslav.tugaenko@rsce.ru

Поступило в Редакцию 2 декабря 2025 г.
В окончательной редакции 12 февраля 2026 г.
Принято к публикации 24 февраля 2026 г.

Приведены результаты исследований характеристик капель, образуемых при абляции поверхности космических аппаратов при прохождении атмосферы. Обоснованы механизмы образования капель из волокнистых материалов, входящих в состав теплозащитного материала, и из расплава, образующегося на лобовой поверхности. Оценена скорость падения капель на подветренную поверхность космического аппарата, сделаны оценки налипания на поверхность пылевой компоненты плазменного слоя.

Ключевые слова: космические тела, абляция, капли, поверхность космического аппарата, микрочастицы, механизмы образования капель, скорость падения капель, растекание.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63126.324-25

Введение

Прохождение возвращаемых космических аппаратов через атмосферу приводит к сильному разогреву поверхности из-за взаимодействия с высокоскоростным набегающим потоком. Наиболее детально аэрофизика прохождения атмосферы Земли изучена для спускаемого аппарата (СА) Союз [1–5]. СА массой 2.8 t, диаметром 2.2 m длиной 2.16 m входит в плотные слои атмосферы со скоростью примерно 7.8 km/s, имея балансировочный угол атаки в диапазоне $20-30^\circ$ на участке аэродинамического нагрева. Основная часть набегающего воздушного потока приходится на лобовой теплозащитный экран (ЛТЭ), подвергающийся интенсивным конвективным и радиационным нагрузкам от высокотемпературного сжатого слоя. Максимальное динамическое давление (~ 0.02 MPa) реализуется на высоте $\sim 45-35$ km при скорости ~ 4 km/s. На этом же участке траектории устойчивого полета происходит и максимальный нагрев лобовой поверхности при воздействии теплового потока $\sim 0.5-1.5$ MW/m^2, максимальная температура на ЛТЭ достигает значений $\sim 1500\,^\circ$C. Время „поддержания“ высокой температуры, соответствующее основному вкладу в процессы поверхностного разрушения тела, составляет $200-230$ s [6].

ЛТЭ имеет форму сферического сегмента и изготовлен из композиционного теплозащитного материала на основе ткани из нитей (кремнеземных и капроновых), состоящих из волокон диаметром $6\,\mu$m, заливаемых фенольно-формальдегидной смолой [7]. Элементный состав ЛТЭ, определенный методом рентгеновского спектрального микроанализа, приведен на рис. 1 [8]. 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 mass% для каждого компонента.

Основные механизмы уноса массы с поверхности СА определяются абляцией, т. е. испарением, плавлением и механическим уносом из-за различных видов дробления (эрозии) вещества, входящего в состав теплозащиты космического аппарата. Много экспериментальных и расчетных исследований проводилось по изучению процессов разрушения теплозащиты космических аппаратов при высоких тепловых нагрузках [5,9–11]. Основное внимание уделялось абляционной термохимии и анализу реакций, проходящих на поверхности космических

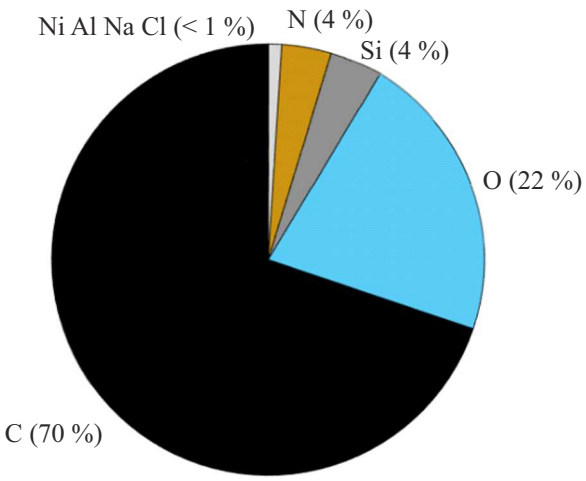


Рис. 1. Концентрация элементов в теплозащитном материале лобового щита.

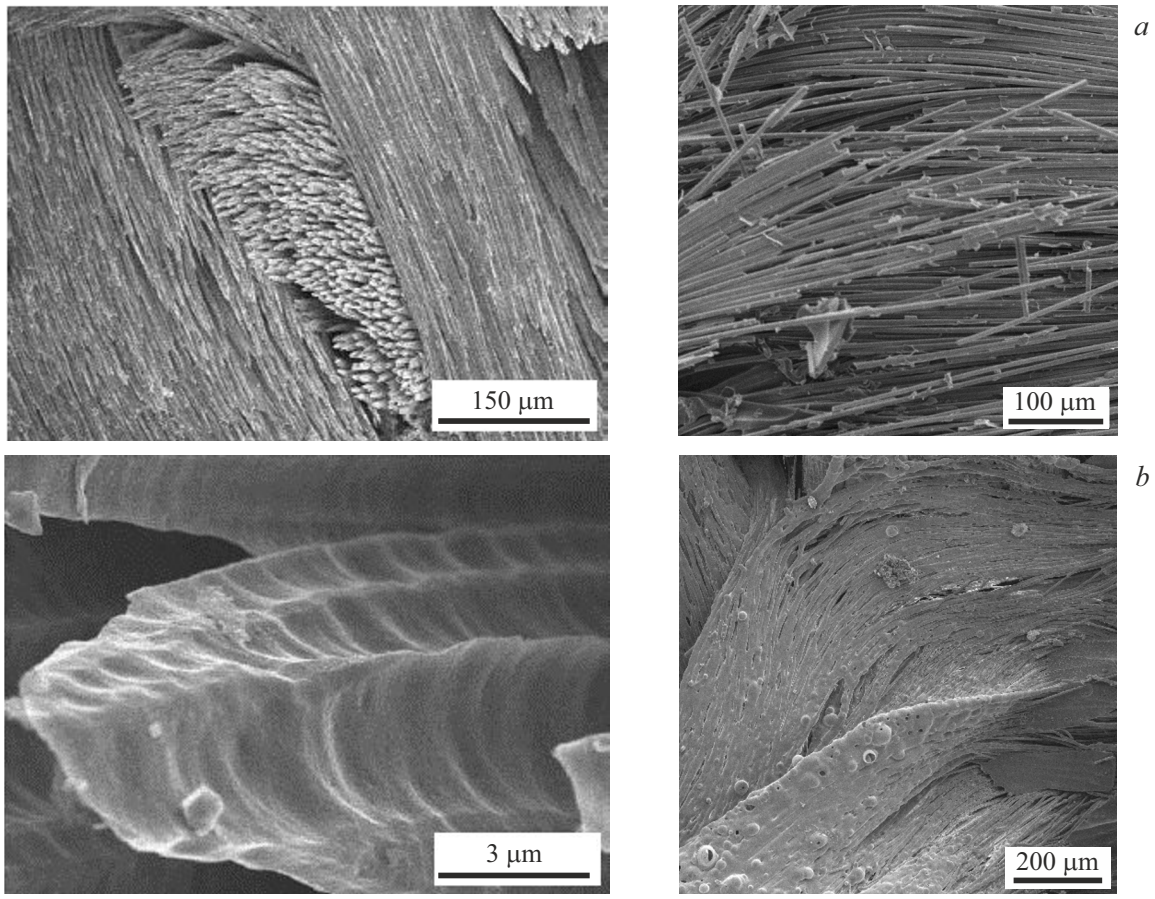


Рис. 2. СЭМ фотографии поверхностей материалов теплозащитных покрытий возвращаемых космических аппаратов, после воздействия газовых потоков, характерных для прохождения атмосферы. *a* — углеродно-углеродные (C/C) композиты [17], *b* — теплозащитное покрытие СА „Союз“. Вверху — исходное состояние материала, внизу — после абляции.

аппаратов и в сжатом слое и соответственно уносимому испарением веществу. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных как для земных материалов, так и для образцов метеоритов, показывают, что эффективная теплота абляции (количество энергии, необходимое для удаления единицы массы космического тела) сильно зависит от скорости. Эта зависимость связана с тем, что с изменением скорости происходит смена ведущих механизмов абляции. Для искусственных космических тел работ, анализирующих влияние различных форм абляции на потерю массы космических аппаратов при прохождении атмосферы, авторам неизвестно, а что касается метеороидов, то в литературе присутствуют различные точки зрения об определяющем механизме уноса массы при движении в атмосфере [11], в значительной степени зависящем от состава космического тела. Вопросы уноса массы космического тела при прохождении атмосферы за счет механизмов плавления, течения жидкого вязкого слоя по поверхности и сброса в виде капель более детально исследовались в экспериментальных работах с использованием плазменных струй и расчетных исследованиях для метеороидов [12–15,11]. В работе [16] показано, что на подветренной поверхности СА „Союз“ после прохождения атмосферы были обнаружены разнообразные микрочастицы, образовавшиеся при взаимодействии плазменного потока с космическим аппаратом. В настоящей работе представлены результаты исследований капель, возникших в результате плавления материалов тепловой защиты космического аппарата, осевших на его поверхности при прохождении атмосферы.

Для уноса массы космического тела в результате плавления большое значение имеет состояние поверхности, которая воспринимает на себя основной набегающий поток и по которой стекают расплавляющиеся компоненты внешней поверхности тела. Для космических тел это явление детально исследовано расчетным и экспериментальным путем, влияние шероховатости поверхности, вызываемой абляцией, приводит к ускоренному переходу ламинарного режима в турбулентный, что вызывает сильное повышение массообмена между поверхностью тела и окружающей средой [17]. Экспериментально наблюдалось, что тепловой поток может локально увеличиваться в 3 раза, а образующиеся при этом морфологические изменения поверхности тела приводят к существенным изменениям режимов течения вязкой жидкости, что должно сказываться на образовании капель. Абляция обычно создает узоры на поверхности любого материала. На рис. 2 приведены фотографии поверхностей материалов теплозащитных

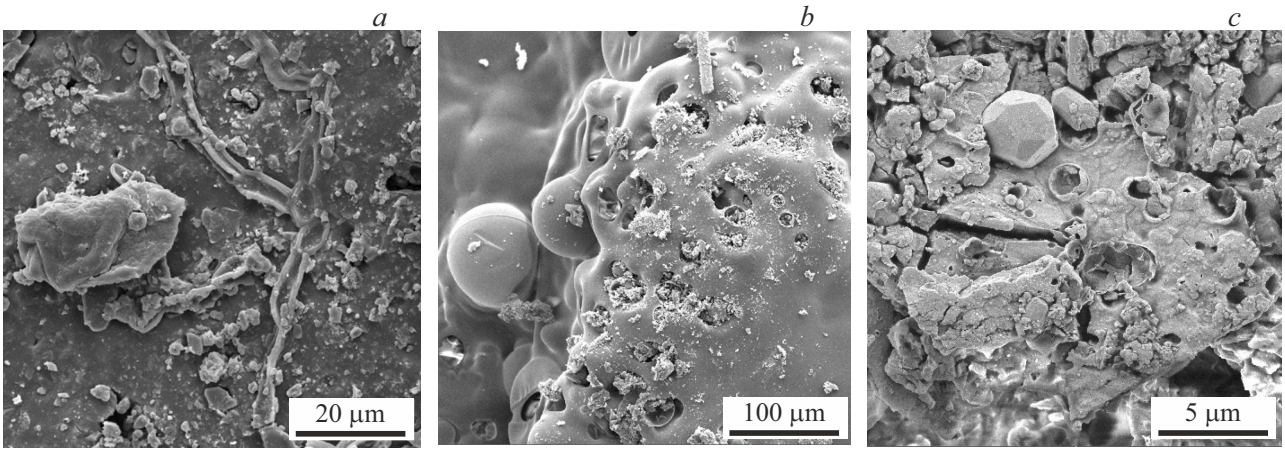


Рис. 3. Образование капель на поверхности теплозащитного покрытия СА при прохождении атмосферы. *a* — тепловая деструкция капроновых волокон; *b* — образование капель на поверхности расплавленных компонентов теплозащитного покрытия; *c* — следы от капель, покинувших жидкий слой, на поверхности фрагмента лобового теплозащитного экрана СА.

покрытий возвращаемых космических аппаратов, после воздействия газовых потоков, характерных для прохождения атмосферы.

1. Образование капель и их морфологические характеристики

С ростом температуры поверхности лобовой части СА по мере входа в атмосферу фенолформальдегидная смола (температура плавления 225 °C) и капроновые волокна (другое название нейлон-6, температура плавления 220 °C) начинают плавиться в каркасе из более тугоплавких кремнеземных нитей. На подветренной поверхности СА были обнаружены фрагменты капроновых волокон, занесенные плазменным потоком, в который они поступают в результате эрозии ЛТЭ. На рис. 3, *a* приведены фрагменты такого волокна в промежуточном состоянии его жизненного цикла, когда вследствие высокой температуры волокно начинает деформироваться с появлением вдоль длины квазипериодических перетяжек/утончений, которые при дальнейшем нагреве могут приводить к появлению фрагментов, переходящих в жидкие капли, информация о которых приведена в следующем разделе.

По мере увеличения количества вязкой жидкой фазы на поверхности ЛТЭ в пограничный слой поступают капли с поверхности жидкости. На рис. 3, *b* приводится фотография теплозащитного покрытия, подвергнутого тепловому нагреву плазменным потоком на плазмотроне, эквивалентного по тепловой нагрузке воздействию атмосферы на траектории спуска СА. На рис. 3, *c* приведена фотография фрагмента теплозащитного покрытия СА, прошедшего атмосферу, так же как и в случае рис. 3, *a*, обнаруженного на подветренной поверхности СА. Рис. 3, *b, c* демонстрируют различные фазы процесса поступления капель двухкомпонентной жидкости (фенолформальдегидная смола и капрон/нейлон-6) в пограничный слой плазменного потока, окружающего космическое тело при прохождении атмосферы. Формирование капель и, по-видимому, в отдельных случаях пузырей, видно на рис. 3, *b*, а на рис. 3, *c*, видны следы, оставшиеся на поверхности застывшей жидкости после отрыва капель.

Исследования состава капель и их морфологии проводились с образцами налета, образовавшегося при взаимодействии плазменного потока, окружающего СА при спуске в атмосфере, с боковой поверхностью аппарата в подветренной области т. е. вне действия „прямого“ набегающего потока. Использовались различные способы подготовки проб для проведения экспериментальных исследований налета методами оптической микроскопии, лазерной сканирующей конфокальной микроскопии, рентгеноструктурными, электронно-микроскопическими, масс-спектрометрическими и пр. Большинство результатов были получены на образцах, перенесенных с поверхности на углеродный/медный скоч, или путем смыва или соскабливания. Особенности конструкции спускаемого аппарата „Союз“ позволили исследовать результаты взаимодействия плазменного потока с поверхностью иллюминатора, расположенного в подветренной зоне в углублении корпуса. Это позволило проводить прямые микроскопические и рентгенографические исследования непосредственно на поверхности СА, без процедур пробоподготовки. В работе [16] представлены результаты исследования микроскопических частиц, обнаруженных в составе налета на поверхности иллюминатора, в том числе и жидких капель, обнаруживаемых на стеклянной поверхности иллюминатора в виде характерных круглых образований. Пробы, взятые на боковой поверхности СА, вне ниши иллюминатора содержат в основном образцы застывших до падения на поверхность капель, что, по-видимому, определяется особенностями плазменного потока, обтекающего СА при пролете атмосферы. На рис. 4 представлены микроскопические снимки различных капель, обнаруженных

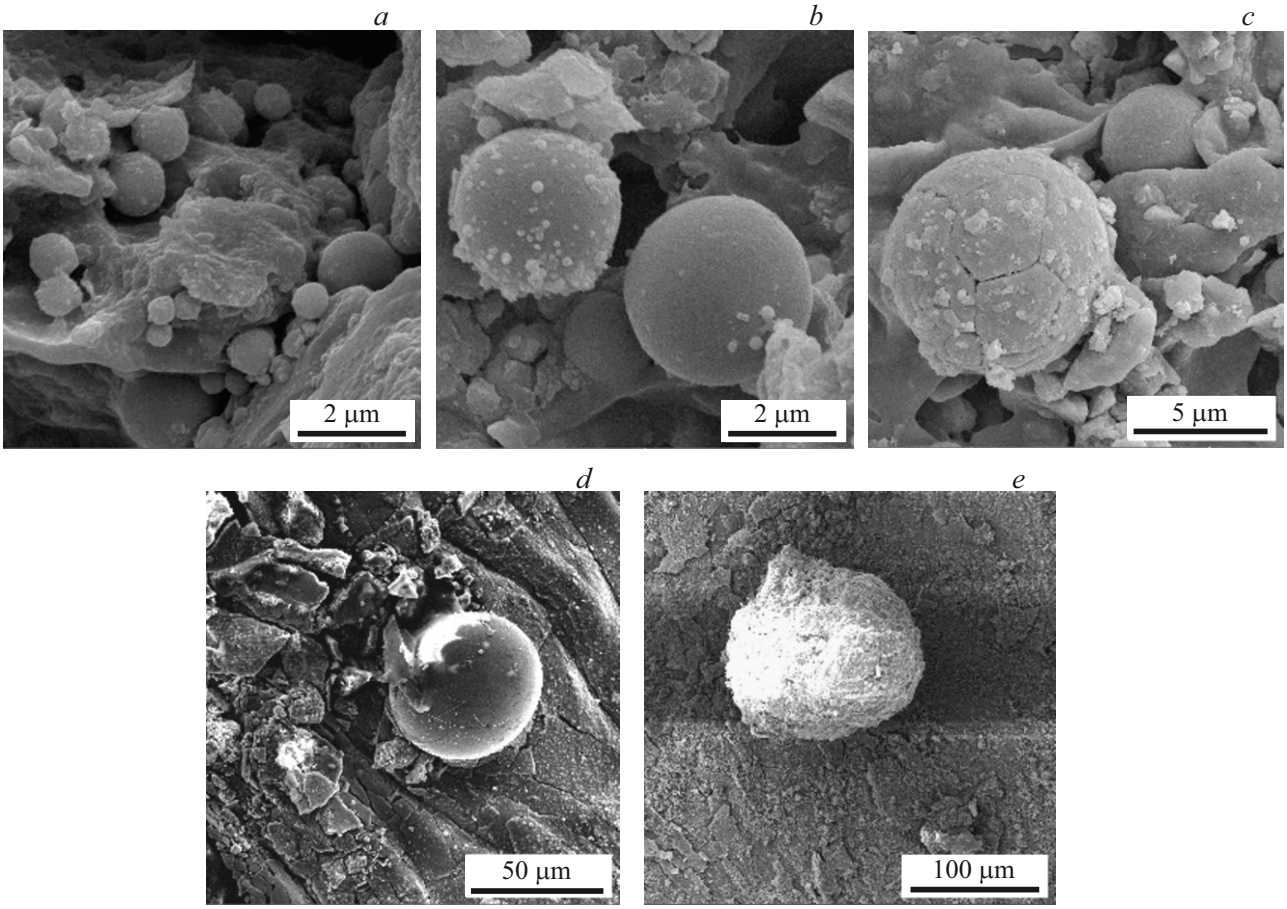


Рис. 4. Застывшие до падения на поверхность капли на боковой поверхности СА с подветренной стороны. *a* — россыпь капель; *b* — две капли схожего размера с различным состоянием поверхности; *c* — капля с растрескавшимся внешним слоем; *d* — крупная капля; *e* — очень крупная капля, по-видимому, длительное время находящаяся в плазменном потоке.

в налете на боковой поверхности СА и подобранные чтобы продемонстрировать разнообразие их размеров и состояние поверхности, формируемое при рождении, движении в плазменном слое и при их „обдуве“ во время нахождения на поверхности СА.

Из анализа полученных снимков капель можно сделать следующие выводы:

— диапазон размеров наблюдаемых капель, попавших на поверхность в твердом состоянии, от долей μm до сотен μm;

— капли перемещаются в плазменном слое как поодиночке, так и сгустками вызванными турбулентностью;

— поверхность капель в результате адсорбции может содержать слой прилипших частиц, в отдельных случаях наблюдаются капли, полностью покрытые частицами пылевой компоненты плазменного слоя.

2. Растекание капель

В разд. 1 была приведена информация о характеристиках капель, обнаруженных в различных местах боковой поверхности СА в подветренной зоне и упавших на поверхность в твердом состоянии, на что указывает видимое отсутствие следов деформации при падении. Конструктивные особенности спускаемого аппарата „Союз“ позволили исследовать результаты взаимодействия плазменного потока с поверхностью иллюминатора, расположенного в подветренной зоне и углубленного в корпус аппарата. В работе [18] проанализирована форма осевшего на иллюминаторе налета и сделано предположение, что участки с меньшей толщиной налета образуются на больших высотах в начале прогрева ЛТЭ до периода интенсивного уноса массы с ЛТЭ, который предположительно начинается с высоты 40 km. Микрофотографии следов от падения капель на этих участках представлены на рис. 5.

Для получения оценок размеров наблюдаемых капель применялся 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_s) с площадью, равной площади проекции частицы. В первом приближении предполагалось, что сферическую каплю с диаметром D_0, растекшуюся по поверхно-

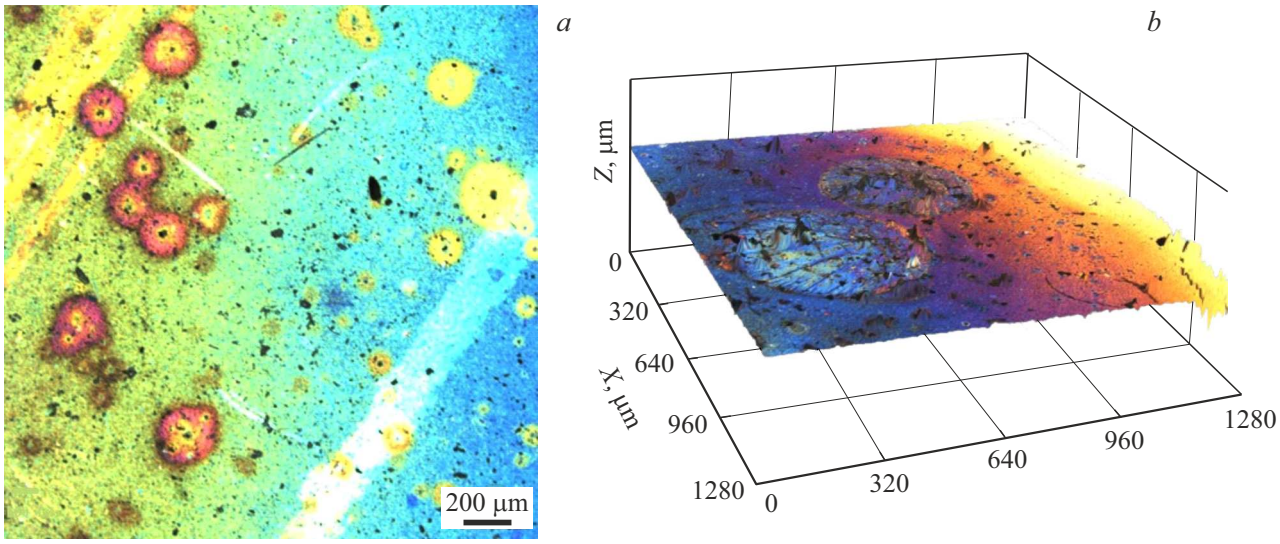


Рис. 5. Микрофотографии фрагментов поверхности иллюминатора, полученные с помощью лазерного сканирующего конфокального микроскопа в различных режимах съемки: *a* — микроскопическое изображение в плоскости области размером $1280 \times 1280\,\mu$m; *b* — объемное изображение области размером $1280 \times 1280\,\mu$m, содержащей две застывшие капли.

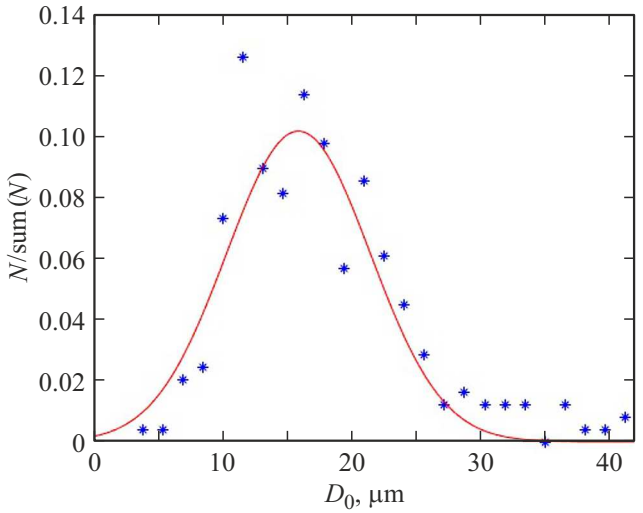


Рис. 6. Распределение капель, обнаруженных в налете на иллюминаторе СА „Союз“ по размерам (объемному диаметру). $*$ — экспериментальные данные, – — аппроксимация.

сти, можно представить в виде цилиндра с диаметром D_s и высотой, соизмеримой с толщиной налета в этой зоне, оцениваемой в $1\,\mu$m. Экспериментальные данные по размерам капель были получены на фотографиях, аналогичных рис. 5, *a*, с помощью программного инструмента ImageJ [19]. На рис. 6 звездочками показано относительное количество частиц N, приходящееся на интервал значений диаметра D_0 шириной $1\,\mu$m для интервала объемных диаметров от 4 до $44\,\mu$m, соответствующих D_s от 7 до $238\,\mu$m.

Проведенный статистический анализ (на основе выборки из ~ 200 следов капель) показал, что полученные экспериментальные данные описываются нормальным распределением со средним значением объемного диаметра $(D_0)_{\text{av}} \sim 16\,\mu$m (поверхностный диаметр при этом $(D_s)_{\text{av}} \sim 50\,\mu$m) и доверительной вероятностью $\sim 78\,\%$.

Морфологию следов от падения капель типа, представленных на рис. 5, можно описать как дискообразную по аналогии с работой [20], идеализированная форма которой представлена на рис. 7.

При попадании капли на твердую поверхность она растекается в тонкий слой толщиной h, так как подложка находится при температуре ниже температуры плавления капли, в ней за время, необходимое для достижения максимального распространения, вырастает твердый слой толщиной s. Параметр затвердевания определяется как отношение толщины твердого слоя к толщине капли $\theta = s/h$ или в безразмерном виде, используя диаметр падающей капли D_0 как характерную шкалу длины, $\theta = \frac{s/D_0}{h/D_0} = \frac{s*}{h*}$. Безразмерная толщина твердого слоя $s*$, как функция безразмерного времени $t^* = \frac{t \cdot V_0}{D_0}$, определя-

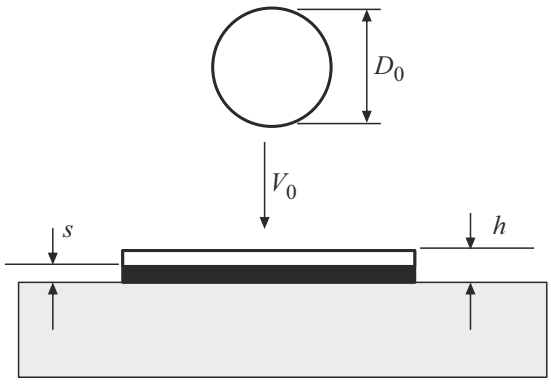


Рис. 7. Деформация расплавленной капли в тонкий диск с образованием твердого слоя.

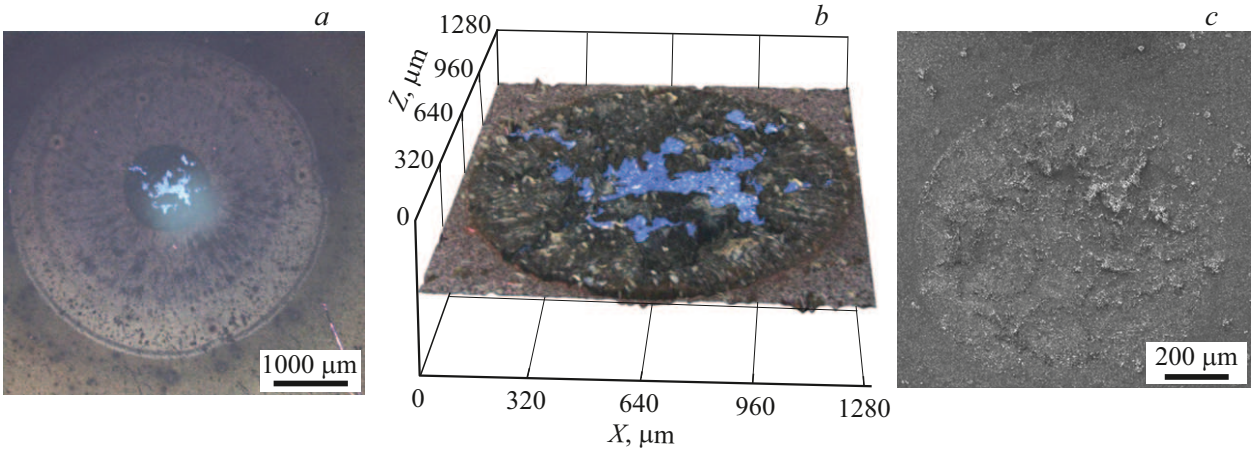


Рис. 8. Микрофотографии „крупной“ капли на поверхности иллюминатора в зоне интенсивного налета, полученные с помощью лазерного сканирующего конфокального микроскопа (a, b) в различных режимах съемки и электронного микроскопа (c): a — микроскопическое изображение в плоскости области размером $5000 \times 5000\,\mu$m; b — объемное изображение области размером $1280 \times 1280\,\mu$m с центральной частью капли; c — фотография тыльной стороны центральной части капли.

ется как [20]:

$$s^* = \frac{2}{\sqrt{\pi}} Ste \sqrt{\frac{\gamma_s t^*}{\gamma_d Pe}} \times \left\{ 1 - Bi \sqrt{\frac{\gamma_s Pe}{\gamma_d \pi t^*}} \ln \left[1 + Bi \sqrt{\frac{\gamma_d \pi t^*}{\gamma_s Pe}} \right] \right\}, \quad (1)$$

где индексы d и s означают droplet (капля) и substrate (подложка) соответственно, $\gamma = k\rho c$ (k, ρ, c —- теплопроводность, плотность и теплоемкость), Ste, Pe, Bi соответственно безразмерные числа Стефана, Пекле, Био.

Используя в соответствии с [21] коэффициент распространения $\xi_{\max} = D_S/D_0$, определяющийся через отношение максимального диаметра капли после растекания и затвердевания на поверхности D_S) и диаметра D_0, приведем выражение для $\xi_{\max}$:

$$\xi_{\max} = \sqrt{\frac{We + 12}{\frac{3}{8} \cdot We \cdot s^* + 3(1 - cos\theta) + 4\left(\frac{We}{\sqrt{Re}}\right)}}, \quad (2)$$

где We — число Вебера, Re — число Рэйнольдса, θ — угол смачивания.

Из геометрических соображений толщина h определяется

$$h = \frac{2D_0}{3\xi_{\max}^2}. \quad (3)$$

После объединения формул (1)–(3) и с учетом используемого в литературе [22] безразмерного времени t^*, необходимого ударяющейся капле для достижения максимального распространения, оцениваемого как $t^* = 8/3$, получим выражение для Θ:

$$\Theta = \frac{s^*}{h^*} = \frac{s^*}{\frac{2\left(\frac{3}{8} We \cdot s^* + 3(1 - cos\theta) + \frac{4 \cdot We}{\sqrt{Re}}\right)}{3(We + 12)}}. \quad (4)$$

Параметр Θ позволяет классифицировать капли на поверхности в широком диапазоне возможных процессов растекания от полного „разбрызгивания“ до компактных образований без внутренних разрывов. В соответствии с классификацией, приведенной в работе [20], параметр Θ для рассматриваемых нами капель можно определить $\Theta \sim 0.1$–0.3, так как растекшиеся и затвердевшие капли представлены в форме диска, в котором нет „пальцев“, характерных для $\Theta \sim 1$, и нет разбрызгиваний, как для $\Theta \ll 1$.

Для рассматриваемых оценочных значений параметра Θ можно оценить скорость падения капель на стеклянную поверхность, имеющую температуру во время создания налета в диапазоне 40 °C–50 °C (по измерениям датчика температуры оправы иллюминатора) исходя из того, что в формуле (4) скорость падения капли V присутствует в безразмерных числах Рэйнольдса $\mathrm{Re} = \frac{\rho V D_0}{\mu}$, Вебера $We = \frac{\rho V^2 D_0}{\sigma}$ и в числе Пекле $Pe = \frac{\rho c V D_0}{k}$. Предполагая, что контактное сопротивление (R_c) между подложкой и каплей находится в пределах от $1 \cdot 10^{-5}$ (m^2·K)/W до $3 \cdot 10^{-5}$ (m^2·K)/W [23], и используя характеристики материалов получим, что скорости падения капель, оставляющих следы на поверхности иллюминатора, описанные в настоящем разделе, находятся в диапазоне $V = 1$–3 m/s.

В зоне интенсивного налета на иллюминаторе, образовавшегося на этапе максимального теплового воздействия на СА при спуске [18] присутствуют следы от капель, образованных двухкомпонентной вязкой жидкостью, которая упоминалась выше. Встречаются следы, существенно большего размера, чем от капель образованных из волокон, их размеры на плоскости могут составлять миллиметры в диаметре. Микрофотографии одной из таких „больших“ капель, снятые в различных режимах с помощью лазерного сканирующего конфокального микроскопа и на электронном микроскопе, приведены на рис. 8. В отличии от капель,

образовавшихся из тонких волокон, капли, выделившиеся из локальных расплавов на лобовой поверхности, оставляют на поверхности иллюминатора следы, состоящие из центральной застывшей части и периферийной, существенно более тонкой области диаметром, превышающим основную область в 3–5 раз. Центральная часть, как видно из приведенных микрофотографий, обладает значительными запасами вещества не только из материалов жидких компонентов, но и осевших на поверхность капли при нахождении в плазменном слое. Рентгеновский спектральный микроанализ, проведенный в центральной области, показал существенное уменьшение концентрации, по сравнению с исходным составом ЛТЭ, кремния и кислорода, что связано с высокой устойчивостью к термодеструкции минеральных нитей, входящих в состав теплозащиты. Еще одним существенным изменением элементного состава капли стало наличие сравнительно больших количеств (2 mass%–5 mass%) фтора, который мог попасть в плазменный слой в результате нагрева (излучением сжатого слоя) боковой поверхности СА с подветренной стороны, содержащей фторлоновую ткань [5], и затем сорбироваться на поверхность капли. Появление фтора в плазменном слое может быть вызвано и сложным возвратно-вихревым течением, заносящим в подветренную область продукты термодеструкции поверхности СА, содержащие фторловое покрытие. По мере остывания на поверхности образуются различные вырастающие структуры кристаллической природы, затравками для которых могут служить как кристаллиты находящиеся на поверхности стекла до падения капли, так и попавшие на поверхность капли во время нахождения в плазме.

Заключение

Исследовались капли, образуемые в результате нагрева лобовой поверхности спускаемого космического аппарата при прохождении через атмосферу. Образцы для исследований были получены с поверхности аппарата, в различных областях подветренной зоны, после спуска. Наблюдались как капли, попавшие на поверхность в твердом виде (остывшие) в диапазоне объемных диаметров от долей μm до сотен μm, так и следы от растекшихся жидких капель в диапазоне размеров от десятков μm до единиц mm.

Приведены обоснования двух механизмов образования капель с поступлением их в пограничный слой, обтекающего спускаемый аппарат потока плазмы. На начальной стадии нагрева лобовой поверхности спускаемого аппарата в результате тепловой деструкции легкоплавких волокнистых материалов, входящих в состав теплозащитного материала, образуются капли примерно одинакового диаметра, что обусловлено специфической деформацией волокон с образованием вдоль длины квазипериодических перетяжек/утончений. По мере роста температуры лобовой поверхности плавление легкоплавких материалов приводит к появлению областей вязкой жидкой фазы в каркасе, образуемом при абляции, из более тугоплавких материалов. В экспериментах на плазмотроне и при исследовании фрагментов лобовой поверхности спускаемого аппарата показано, что в основном капли, но, иногда, и пузыри „выдавливаются“ с поверхности жидкости.

Анализ следов растекания жидких капель по стеклянной поверхности иллюминатора позволил оценить скорость падения капель из плазменного слоя на поверхность, которая составляет 1–3 m/s. При взаимодействии капли с плазменным слоем доля вещества, сорбированного на поверхности, может составлять до 5 % от массы капли.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] С.Т. Суржиков. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, **5**, 33 (2016). DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-33-45

[2] С.Т. Суржиков. ДАН, **482** (3), 270 (2018). DOI: 10.31857/S086956520003137-3

[3] В.И. Власов, Г.Н. Залогин, Р.В. Ковалев, Д.А. Чураков. Физико-химическая кинетика в газовой динамике, **13** (2), 17 (2012).

[4] В.И. Власов, Г.Н. Залогин, В.В. Лунев, Д.А. Чураков. Физико-химическая кинетика в газовой динамике, **13** (1), (2012).

[5] В.Ю. Тугаенко, А.С. Грибков, С.Т. Суржиков. ТВТ, **61** (3), 1 (2023). DOI: 10.31857/S0040364423030225

[6] V.Y. Tugaenko, A.V. Vodolazhsky, R.A. Evdokimov. Solar System Res., **58** (6), 699 (2024). DOI: 10.1134/S0038094624700540

[7] B.A. Davis, E.L. Christiansen, D.M. Lear, T Prior. *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)

[8] V.Y. Tugaenko, D.S. Ovchinnikov, M.G. Isaenkova, N.I. Kargin, O.A. Krymskaya, A.A. Timofeev, Y.A. Babich. Geochem. Intern., **59** (1), 107 (2021). DOI: 10.1134/S0016702921010110

[9] В.А. Батыгина. Физико-химическая кинетика в газовой динамике, **25** (7), (2024).

[10] Y.K. Chen. AIAA Paper 1514, 25 (2016). DOI: 10.2514/6.2016-1514

[11] G. Colonna, M. Capitelli, A. Laricchiuta. *Hypersonic Meteoroid Entry Physics. IOP Series in Plasma Physics* (IOP Publishing, Bristol, UK, 2019), ISBN: 978-0-7503-1668-2

[12] P. Agrawal, P.M. Jenniskens, E. Stern, J. Arnold, Y.K. Chen. AIAA, Paper 4284, 17 (2018).

[13] S. Loehle, F. Zander, T. Hermann, M. Eberhart, A. Meindl, R. Oefele, J. Vaubaillon, F. Colas, P. Vernazza, A. Drouard, J. Gattacceca. Astrophys. J. **837** (112), (2017). DOI: 10.3847/1538-4357/aa5cb5

[14] B. Dias, A. Turchi, E.C. Stern, T.E. Magin. Icarus., **345** (113710), (2020). DOI: 10.1016/j.icarus.2020.113710
[15] M.C. Adams, W.E. Powers, S.J. Georgiev. Aerospace Sci., **27** (7), 535 (1960).
[16] V.Y. Tugaenko, R.A. Voropaev, S.P. Sokolova, R.M. Khatsaeva, D.O. Zaikin, A.A. Timofeev, M.M. Grehov. J. Surf. Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques, **19** (5), 1261 (2025). DOI: 10.1134/S1027451025701812.
[17] G. Duffa, G.L. Vignoles, J.M. Goyhénèche, Y. Aspa. Intern. J. Heat Mass Transfer, 2005, **48**, 3387 (2005).
[18] В.Ю. Тугаенко, А.С. Грибков, Е.Н. Гранкина, Н.В. Щербенко. Инженерный журнал: наука и инновации, 1, (2024). DOI: 10.18698/2308-6033-2024-1-2328
[19] T.J. Collins. BioTechniques, **43** (1S), S25 (2007). DOI: 10.2144/000112517
[20] R. Dhiman, A.G. McDonald, S. Chandra. Surf. Coatings Technol., **201** (18), 7789 (2007). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.03.010
[21] R. Dhiman, S. Chandra. Intern. J. Heat Mass Transfer, **48** (25–26), 5625 (2005).
[22] M. Pasandideh-Fard. Phys. Fluids, **8** (3), 650 (1996). DOI: 10.1063/1.868850
[23] S.D. Aziz, S. Chandra. Intern. J. Heat Mass Transfer, **43** (16), 2841 (2000).