

## Спектроскопическое исследование процесса абляции углерода с графитовой поверхности при воздействии ударной волны

© М.А. Котов<sup>1,2</sup>, П.В. Козлов<sup>1</sup>, В.Ю. Левашов<sup>1</sup>, Г.Я. Герасимов<sup>1</sup>, Н.Г. Быкова<sup>1</sup>, И.Е. Забелинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

E-mail: kotov@ipmnet.ru

Поступило в Редакцию 15 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 9 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Исследованы спектральные характеристики продуктов абляции графитовой поверхности за отраженной ударной волной в воздухе в диапазоне длин волн от 400 до 1100 нм. Эксперименты проводились на однодиафрагменной ударной трубе. Показано, что спектр излучения продуктов абляции близок к спектру излучения абсолютно черного тела. Дополнительные эксперименты по отражению ударной волны от кварцевой поверхности позволяют сделать вывод, что фиксируемый спектр излучения связан с излучением твердых микрочастиц углерода, образующихся в воздушной среде вблизи графитовой поверхности в результате воздействия на нее ударной волны.

**Ключевые слова:** ударная волна, спектр излучения, абляция, микрочастицы углерода.

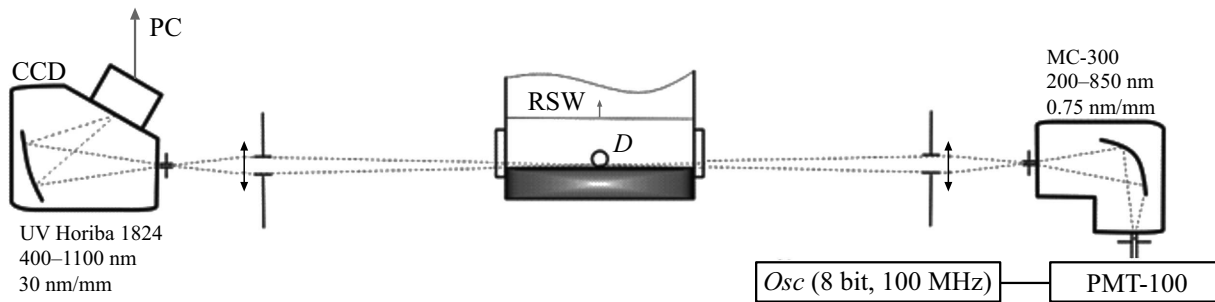
DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59392.6247k

Движение спускаемого космического аппарата в атмосфере Земли сопровождается большими тепловыми нагрузками на его поверхность. Поэтому создание надежных систем тепловой защиты является актуальной задачей при разработке новой космической техники. Исследованию конвективных и радиационных тепловых потоков за отошедшей ударной волной, которые оказывают влияние на спускаемый космический аппарат, посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ [1–3]. Моделирование реакции поверхностного защитного слоя аппарата на тепловые нагрузки играет важную роль для обеспечения безопасности полета [4].

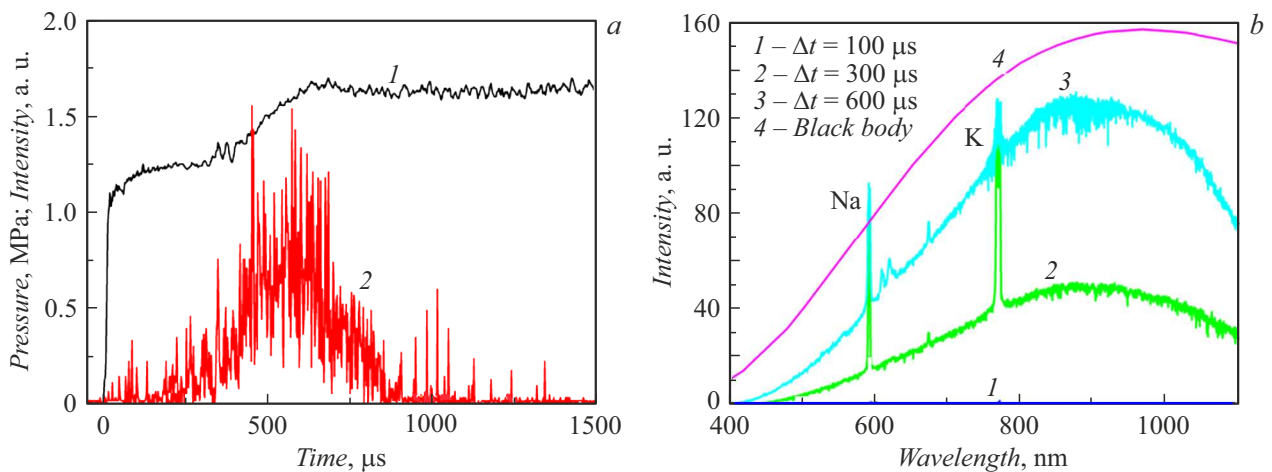
Теплозащитные системы, как правило, состоят из композиционных материалов на основе углерода. Для изучения абляционных свойств таких материалов используются различные экспериментальные установки. Это в первую очередь установки непрерывного действия, такие как плазменная аэродинамическая труба [5] и электродуговая установка [6], которые позволяют исследовать реакцию материала на термохимическое воздействие потока низкотемпературной плазмы. В условиях импульсных нагрузок применяются лазерные установки [7], с помощью которых можно оценить концентрации различных углеродсодержащих компонентов в продуктах лазерной абляции графитовой поверхности образца, а также ударные трубы [8], позволяющие воспроизвести сверхзвуковое обтекание тестируемой модели после прохождения ударной волны. Современное состояние экспериментальных и теоретических исследований абляции теплозащитного слоя спускаемого космического аппарата при его движении в атмосфере Земли представлено в недавнем обзоре [9].

В настоящей работе проведено спектроскопическое исследование абляционных процессов, протекающих в воздухе вблизи графитовой поверхности после отражения от нее сильной ударной волны. Эксперименты проводились на однодиафрагменной ударной трубе, входящей в состав экспериментального комплекса „Ударная труба“ Института механики МГУ. Внутренний диаметр установки составляет 57 мм, длина камер высокого и низкого давления равна 1.0 и 3.7 м соответственно. Между камерами устанавливается медная диафрагма с калиброванными насечками. Подробное описание установки приведено в [10].

Измерительная система установки, схема которой приведена на рис. 1, состоит из двух каналов регистрации, первый из которых фиксирует временной профиль излучения на фотоэлектронный умножитель РМТ-100 с помощью монохроматора МС-300. Решетка в монохроматоре располагалась в „нулевом порядке“ и работала как зеркало, отражающее излучение в спектральном диапазоне 200–2500 нм. Фотоэлектронный умножитель имеет область спектральной чувствительности 170–850 нм. Второй измерительный канал записывает интегральную по времени интенсивность излучения в VIS/IR-спектральном диапазоне ( $\lambda = 400–1100$  нм) на линейном CCD-детекторе Hamamatsu S11156, который установлен на выходе спектрографа Horiba 1824. Фоточувствительность детектора скорректирована в зависимости от длины волны излучения. Линия визирования расположена на расстоянии 0.5 мм от поверхности образца. Основной объем излучения (порядка 90%) регистрируется из цилиндра диаметром 1 мм и длиной 57 мм. Край датчика давления  $D$  марки РСВ 113В24 примыкает к образцу. Время процесса фиксируется от момента формирования отраженной ударной волны



**Рис. 1.** Схема измерительной системы ударной трубы. CCD UV Horiba 1824 — спектрограф, PC — персональный компьютер, RSW — отраженная ударная волна,  $D$  — датчик давления, MC-300 — монохроматор, PMT-100 — фотоэлектронный умножитель, Osc (8 bit, 100 MHz) — осциллограф.



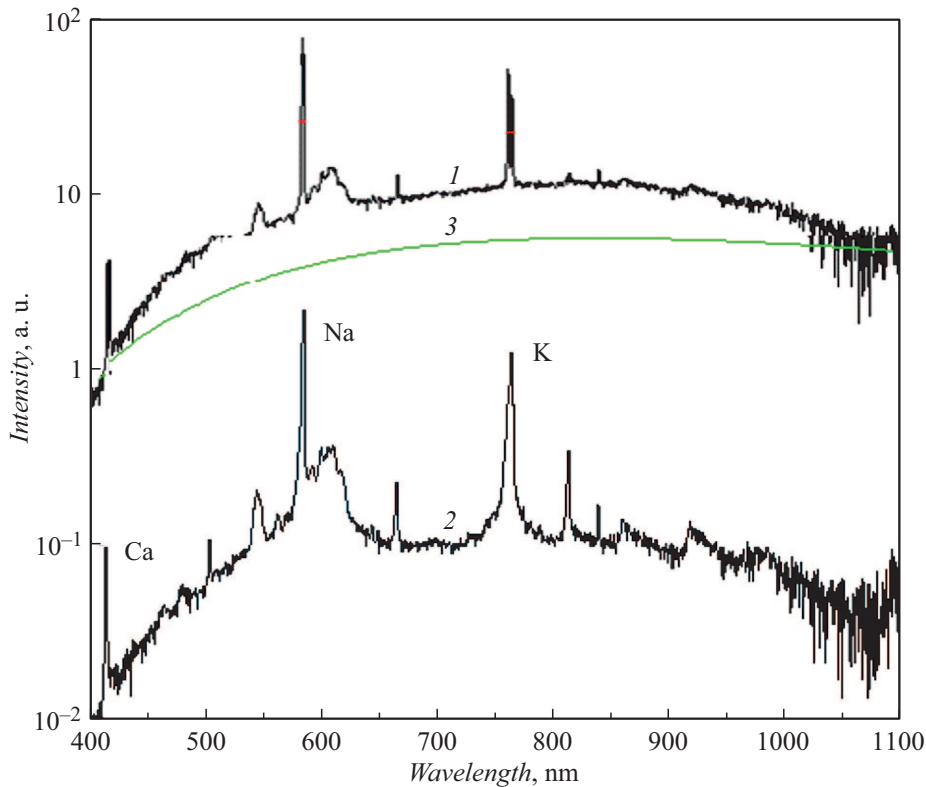
**Рис. 2.** Эволюция давления газа за отраженной ударной волной ( $I$ ) и интенсивности излучения в диапазоне длин волн 200–850 нм ( $2$ ) ( $a$ ) и спектр излучения ( $b$ ) продуктов абляции графитовой поверхности при  $P_1 = 6118$  Па и  $V_{SW} = 1.58$  км/с. Кривая для  $\Delta t = 100 \mu\text{s}$  почти сливается с осью абсцисс.

(RSW). Скорость ударной волны  $V_{SW}$  определяется с помощью датчиков давления, расположенных на боковой поверхности ударной трубы.

Спектральные характеристики продуктов абляции графитовой поверхности за отраженной ударной волной, полученные при начальном давлении в камере низкого давления  $P_1 = 6118$  Па и скорости ударной волны  $V_{SW} = 1.58$  км/с, приведены на рис. 2. В качестве образца использовался плотный графит улучшенной структуры (марка ЗОПГ). Температура газа за отраженной ударной волной, рассчитанная по начальным параметрам ударного процесса с помощью программы GASEQ [11], равна  $T = 2500$  К. Как видно из рис. 2,  $a$ , временная зависимость давления имеет две характерные полки. Первая полка связана со скачком давления при отражении ударной волны от графитовой поверхности. Вторая полка фиксирует момент прихода переотраженной ударной волны от контактной поверхности между исследуемым и толкающим газами. Начальная стадия исследуемого процесса между моментом отражения ударной волны от графитовой поверхности и моментом начала излучения ( $t \leq 200 \mu\text{s}$ ) представляет собой индукционный период,

когда интенсивность излучения продуктов абляции графитовой поверхности практически равна нулю. По мере протекания процесса интенсивность излучения резко увеличивается, достигает максимума в интервале от 400 до 700  $\mu\text{s}$  и затем спадает.

Интегральная по времени интенсивность излучения (рис. 2,  $b$ ), полученная при различных временных интервалах  $\Delta t$  от начала процесса, подтверждает наличие индукционного периода и дальнейший быстрый рост интенсивности излучения. Под величиной  $\Delta t$  здесь понимается время интегрирования сигнала излучения от начала процесса (момент отражения ударной волны от графитовой поверхности) до времени  $t$ . На рис. 2,  $b$  приведен также спектр излучения абсолютно черного тела, вычисленный при  $T = 2500$  К. Сравнение приведенных спектрограмм показывает, что спектр излучения продуктов абляции графитовой поверхности близок к спектру излучения абсолютно черного тела. Это свидетельствует о том, что фиксируемое излучение в данном спектральном интервале, скорее всего, связано с излучением твердых микрочастиц углерода, отколовшихся от графитовой поверхности при воздействии на нее ударной волны. В этом



**Рис. 3.** Интегральная по времени интенсивность излучения продуктов абляции графитовой (1) и кварцевой (2) поверхности при  $P_1 = 1000$  Па и  $V_{SW} = 2.2$  км/с. 3 — спектр излучения абсолютно черного тела, вычисленный при  $T = 3600$  К.

случае под индукционным периодом можно понимать время нагрева холодных микрочастиц до температуры ударно-нагретого газа. Следует отметить, что спектр излучения, приведенный на рис. 2, *b*, — осредненный по времени спектр излучения. Поэтому нельзя однозначно сказать, что в нем доминирует излучение, соответствующее максимальной температуре продуктов абляции, совпадающей с температурой ударно-нагретого газа. Соответственно, сравнение спектра излучения продуктов абляции со спектром излучения абсолютно черного тела при определенной температуре не совсем корректно.

С ростом интенсивности ударной волны мощность излучения резко возрастает. В частности, при увеличении  $V_{SW}$  от 1.4 км/с при  $P_1 = 6250$  Па до 2.2 км/с при  $P_1 = 1000$  Па интегральная по времени интенсивность излучения увеличивается примерно на порядок. Это может быть связано не только с ростом температуры газа за отраженной ударной волной, но и с увеличением количества образующихся микрочастиц углерода. Появление линий щелочных металлов в спектре излучения связано, скорее всего, с люминесценцией кварцевого стекла окон наблюдения под действием жесткого излучения из области вакуумного ультрафиолета, возникающего за фронтом отраженной ударной волны.

Для подтверждения того факта, что излучают твердые микрочастицы углерода, поступающие в воздушную среду с графитовой поверхности при импульсном

воздействии на нее ударной волны, была проведена серия экспериментов по отражению ударной волны от кварцевой поверхности. На рис. 3 приводится сравнение спектров излучения, полученных при  $P_1 = 1000$  Па и  $V_{SW} = 2.2$  км/с за время  $\Delta t = 400$  мкс после отражения ударной волны от графитовой и кварцевой поверхности. В рассматриваемом случае температура газа за отраженной волной равна 3600 К. Линией 3 показан спектр излучения абсолютно черного тела, вычисленный при  $T = 3600$  К. Видно, что в случае отражения ударной волны от кварцевой поверхности регистрируемая интегральная по времени интенсивность излучения на два порядка ниже.

Оценки, основанные на решении уравнения теплопроводности, показывают, что температура графитовой поверхности за время наблюдения повышается всего лишь на несколько десятков градусов за счет теплопередачи от ударно-нагретого воздуха. Такая низкая температура поверхности исключает протекание различных физико-химических процессов, включая сублимацию, аспекты гетерогенных систем и конденсацию газообразных продуктов абляции. В связи с этим можно предположить, что основным механизмом образования микрочастиц углерода вблизи исследуемого образца является их механический откол (spallation) от графитовой поверхности за счет импульсных механических нагрузок в момент отражения от поверхности падающей ударной волны.

Исследованию рассматриваемого механизма посвящено небольшое число работ (см., например, [12–14]). Поэтому полученные в настоящей работе результаты вносят существенный вклад в понимание абляционных процессов, протекающих вблизи графитовой поверхности при воздействии на нее ударной волны. Следует отметить, что без дополнительных исследований поверхности образцов графита до и после экспериментов нельзя с уверенностью утверждать, что указанный механизм образования микрочастиц графита является доминирующим.

Таким образом, в результате проведенных спектроскопических исследований показано, что при отражении сильной ударной волны от графитового образца вблизи его поверхности образуются микрочастицы углерода, спектр излучения которых близок к спектру излучения абсолютно черного тела. Теоретические оценки позволяют предположить, что основным механизмом образования микрочастиц является их механический откол от графитовой поверхности.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ „Экспериментальное и теоретическое исследование кинетических процессов в газах“ (номер госрегистрации АААА-А19-119012990112-4).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] B.A. Cruden, A.M. Brandis, *J. Thermophys. Heat Transfer*, **34** (1), 154 (2020). DOI: 10.2514/1.T5735
- [2] Y. Zhao, H. Huang, *Acta Astron.*, **169**, 84 (2020). DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.01.002
- [3] P.V. Kozlov, N.G. Bykova, G.Ya. Gerasimov, V.Yu. Levashov, M.A. Kotov, I.E. Zabelinsky, *Acta Astron.*, **214**, 303 (2024). DOI: 10.1016/j.actaastro.2023.10.033
- [4] V.T. Le, N.S. Ha, N.S. Goo, *Composites B*, **226**, 109301 (2021). DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109301
- [5] A. Fagnani, B. Helber, A. Hubin, O. Chazot, *Meas. Sci. Technol.*, **34** (7), 075401 (2023). DOI: 10.1088/1361-6501/acc67c
- [6] F. Grigat, S. Loehle, F. Zander, S. Fasoulas, in *AIAA Scitech 2020 Forum* (Orlando, FL, 2020), AIAA paper 2020-1706. DOI: 10.2514/6.2020-1706
- [7] G. Radhakrishnan, P.M. Adams, L.S. Bernstein, *J. Appl. Phys.*, **134** (1), 013303 (2023). DOI: 10.1063/5.0153331
- [8] S.W. Lewis, R.G. Morgan, T.J. McIntyre, *J. Spacecraft Rockets*, **53** (5), 887 (2016). DOI: 10.2514/1.A33267
- [9] N.N. Mansour, F. Panerai, J. Lachaud, T. Magin, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **56**, 549 (2024). DOI: 10.1146/annurev-fluid-030322-010557
- [10] A.M. Tereza, P.V. Kozlov, G.Ya. Gerasimov, V.Yu. Levashov, I.E. Zabelinsky, N.G. Bykova, *Acta Astron.*, **204**, 705 (2023). DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.11.001
- [11] *A chemical equilibrium program for Windows* [Электронный ресурс]. <http://www.gaseq.co.uk/>
- [12] C. Park, G.A. Raiche II, D.M. Driver, *J. Thermophys. Heat Transfer*, **18** (4), 519 (2004). DOI: 10.2514/1.8098
- [13] A. Martin, C.C. Bailey, F. Panerai, R.S.C. Davuluri, H. Zhang, A.R. Vazsonyi, Z.S. Lippay, N.N. Mansour, J.A. Inman, B.F. Bathel, S.C. Splinter, P.M. Danehy, *CEAS Space J.*, **8** (4), 229 (2016). DOI: 10.1007/s12567-016-0118-4
- [14] K.J. Price, J.M. Hardy, C.G. Borchetta, S.C.C. Bailey, A. Martin, in *AIAA Aviation 2020 Forum* (Virtual event, 2020), AIAA paper 2020-3279. DOI: 10.2514/6.2020-3279