

03.1

Регистрация радиационного теплового потока в ударной трубе с помощью термоэлектрического детектора

© М.А. Котов^{1,2}, П.В. Козлов², В.Ю. Левашов², Г.Я. Герасимов², Н.Г. Соловьев¹, А.Н. Шемякин¹, М.Ю. Якимов¹, В.Н. Глебов³, Г.А. Дуброва³, А.М. Малютин³

¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

² Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Московская обл., Россия

E-mail: kotov@ipmnet.ru

Поступило в Редакцию 22 мая 2023 г.

В окончательной редакции 6 июля 2023 г.

Принято к публикации 7 июля 2023 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований по регистрации радиационной составляющей полного теплового потока термоэлектрическим детектором за отраженной ударной волной. Обнаружен рост вклада излучения в тепловой поток при увеличении интенсивности ударной волны. Показано, что применяемая методика может быть использована при проведении экспериментов в ударных трубах для выделения радиационной составляющей теплового потока, а сам термоэлектрический детектор может успешно применяться для регистрации подобных параметров с микросекундным разрешением.

Ключевые слова: ударная труба, термоэлектрический детектор, радиационный теплообмен.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.17.56086.19633

Интерес к созданию новых космических аппаратов и развитию программ дальнейшего исследования планет Солнечной системы неуклонно растет. Комплекс вопросов, связанных с характеристиками плазменного слоя, возникающего у поверхности спускаемого аппарата при его движении в атмосфере, относится к задачам, решение которых является чрезвычайно актуальным. Полный тепловой поток на поверхность аппарата при высоких скоростях полета сильно зависит от радиационной составляющей, которая в свою очередь зависит от излучающей и поглощающей способности образовавшегося плазменного слоя [1]. Достоверное определение долей конвективного и радиационного нагрева в возникающих ударно-волновых структурах имеет как фундаментальное значение, связанное с изучением процессов высокоскоростной газодинамики и физико-химической кинетики [2,3], так и прикладное значение, связанное с определением термохимических свойств теплозащитных материалов и проектированием элементов аппарата [4–7].

Для наземного моделирования таких условий используются газодинамические установки типа ударных труб, так как они позволяют достигать больших значений энтальпий набегающего газового потока (до 60 MJ/kg и более [1]). Однако время рабочего режима в них ограничивается несколькими миллисекундами [8], что предъявляет жесткие требования к методам регистрации. Под измерением радиационных характеристик в таких экспериментах понимается регистрация интенсивности излучения с помощью различных оптических схем и приемников, настроенных обычно на широкополосный диапазон 300–1100 nm или его отдельные участки. Недавние исследования термоэлектрических детекторов

показали, что эти устройства способны регистрировать излучение в процессе самовоспламенения горючей смеси в падающей ударной волне [9].

Для экспериментального определения теплового потока в импульсных газодинамических процессах используются либо специальные датчики с различными механизмами работы [10,11], либо термочувствительные покрытия [12]. Одна из основных проблем организации такого эксперимента заключается в недостаточно высоких частотах регистрации (до 1 MHz), из-за чего при непосредственном измерении теплового потока получают его среднее значение на приемной апертуре датчика или покрытия за несколько микросекунд. Термоэлектрический детектор имеет чувствительный элемент с толщиной 0.3 μm и приемной апертурой 4 × 4 mm, который нанесен на кремниевую подложку и состоит из кристаллитов хрома с малой пространственной разориентацией. Благодаря их наклонной структуре между внешней и внутренней плоскостями чувствительного элемента при его нагреве формируется составляющая термоэдс, которая проецируется поперек подложки и снимается с контактных площадок, расположенных по бокам детектора. За счет тонкого чувствительного элемента датчик позволяет регистрировать полный тепловой поток с частотой более 10 MHz при достаточно экстремальных условиях: температура более 10⁴ K [13], давление более 30 atm [9].

Излучение вносит значительный вклад в процессы теплопереноса, когда температура газа за фронтом ударной волны (УВ) становится достаточно большой (более нескольких тысяч градусов Кельвина). Косонапыленные пленки термоэлектрического детектора позволяют получить высокую чувствительность к мгновенному тепловому

му воздействию за счет тонкой наклонной структуры, генерирующей высокий сигнал термоэдс. Важно отметить, что такой чувствительный элемент генерирует сигнал как в случае конвективного, так и в случае радиационного теплового потока. Более подробная информация о принципе работы датчика и его характеристиках содержится в [9,13–15]. Таким образом осуществляется регистрация суммарного (полного) теплового потока.

Для калибровки термоэлектрических детекторов применяются методики нагрева лампой с нитью накаливания, лазерным диодом, а также проводятся эксперименты в ударной трубе с эталонным датчиком и осуществляется сравнение полученных показаний теплового потока за отраженной УВ. Более подробно процедуры калибровки описаны в [9,15,16]. В настоящей работе использовался датчик без калибровочного коэффициента, поэтому представленные в относительных единицах значения пропорциональны тепловому потоку в W/m^2 .

Эксперименты по выделению радиационной составляющей теплового потока выполнялись на ударной трубе, работающей за отраженной УВ. Схема установки представлена на рис. 1. Проводилась серия экспериментов с аналогичными начальными условиями. В некоторых из них для отсеечения конвективного теплового потока перед поверхностью детектора устанавливалась оптическая вставка из кварцевого стекла с коэффициентом пропускания в диапазоне 400–1000 nm более 95%, в том числе и при высоких температурах [17]. Результаты регистрации теплового потока с падающей ударной волны малой интенсивности (скорость падающей УВ составляет 1 km/s) в аргоне показаны на рис. 2.

Данные представлены без учета амплитудно-частотной характеристики. Радиационный тепловой поток ($TD + quartz$), зарегистрированный термоэлектрическим детектором, много меньше полного теплового потока (TD). В момент отражения УВ от торцевой стенки трубы (момент времени $t = 0$ на рис. 2) показания TD и $TD + quartz$ различаются более чем в 20 раз, что свидетельствует о малом радиационном вкладе в общий тепловой поток. Аналогичные эксперименты проводились в аргоне при более высоких скоростях падающей УВ. Полученные результаты демонстрируют

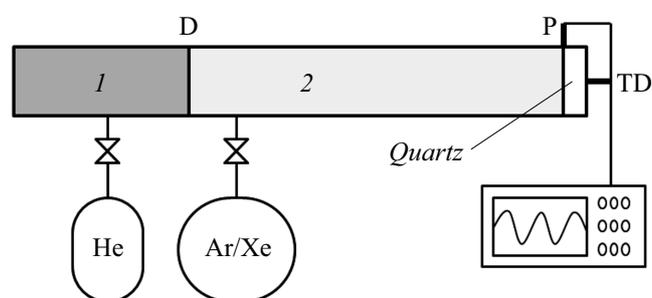


Рис. 1. Схема ударной трубы. Камеры высокого и низкого давлений (1 и 2) разделены диафрагмой D. Датчик давления P регистрирует момент прихода падающей УВ на кварцевую стенку (*Quartz*), термоэлектрический детектор TD регистрирует тепловой поток.

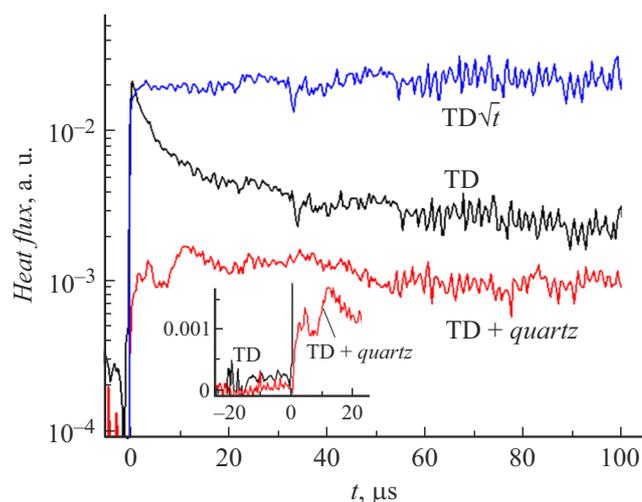


Рис. 2. Регистрация теплового потока в аргоне за отраженной УВ. TD — показания термоэлектрического детектора; $TD\sqrt{t}$ — данные TD , умноженные на квадратный корень от времени; $TD + quartz$ — данные с кварцевой вставкой. Начальное давление аргона 0.1 atm при 293 K, скорость падающей УВ составляет 1 km/s.

постепенный рост радиационной составляющей теплового потока с ростом скорости УВ, так как ударно нагретый аргон начинает сильнее излучать, особенно в видимом диапазоне [18].

В задаче с УВ, отраженной от плоской стенки, для сравнения экспериментальных данных с теоретическими и определения степени их согласованности удобно использовать нормированный тепловой поток, который зависит только от параметров газа за отраженной УВ [19,20]. Как видно из рис. 2, соответствующий этому параметр $TD\sqrt{t}$, демонстрирующий показания термоэлектрического детектора, не претерпевает значительных изменений, что свидетельствует о достоверности полученных результатов, поскольку его среднее значение остается постоянным. Аналогичное поведение данного параметра наблюдается и в других экспериментах.

Результаты регистрации лучистого теплового потока в ксеноне за отраженной УВ представлены на рис. 3. Данные $TD + quartz$ показывают рост радиационного теплового потока сразу после прихода УВ и ее отражения от кварцевой стенки (как и в случае рис. 2). За счет более высокой температуры ксенона за отраженной УВ зарегистрированные значения радиационного теплового потока более чем на три порядка выше, чем при регистрации в аргоне (рис. 2, данные $TD + quartz$). Датчик давления P расположен на боковой стенке ударной трубы непосредственно перед кварцевой проставкой (рис. 1), поэтому рост показаний от прихода УВ на нем наблюдается немного раньше.

Экспериментальные исследования по регистрации тепловых потоков с использованием материала, прозрачного для излучения в конкретном спектральном диапазоне, позволяют применять термоэлектрические

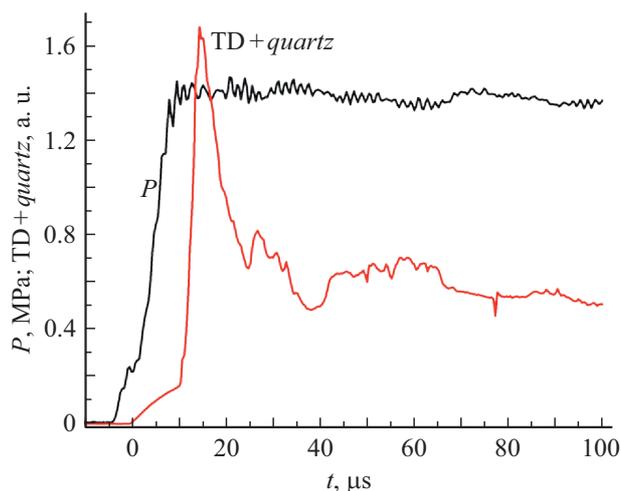


Рис. 3. Регистрация радиационной составляющей теплового потока и давления в ксеноне за УВ, отраженной от кварцевой стенки (момент времени отражения $t = 0$). Приемная апертура датчика P составляет 5 мм, скорость падающей УВ равна 1.2 км/с.

детекторы для определения интенсивности радиационного теплопереноса в рассматриваемом физическом процессе. Использование описанного метода может быть полезно для наземных испытаний в ударных трубах по имитации входа космического аппарата в плотные слои атмосфер планет и спутников Солнечной системы и сравнения полученных данных с показаниями радиометров, которые устанавливаются на таком аппарате и фиксируют значения радиационного теплового потока в процессе полета и спуска [21,22].

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00096.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (Физматлит, М., 2008). [Ya.B. Zel'dovich, Yu.P. Raizer, *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena* (Dover Publ., 2002).].
- [2] С.Т. Суржиков, *Расчетное исследование аэротермодинамики гиперзвукового обтекания затупленных тел на примере анализа экспериментальных данных* (ИПМех РАН, М., 2011).
- [3] С.Т. Суржиков, *Компьютерная аэрофизика спускаемых космических аппаратов. Двумерные модели* (ИПМех РАН, М., 2018).
- [4] В.Л. Ковалев, А.Ф. Колесников, А.А. Крупнов, М.И. Якушин, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 6, 133 (1996). [V.L. Kovalev, A.F. Kolesnikov, A.A. Krupnov, M.I. Yakushin, *Fluid Dyn.*, **31** (6), 910 (1996). DOI: 10.1007/BF02030113].
- [5] В.В. Лунев, *Течение реальных газов с большими скоростями* (Физматлит, М., 2007). [V.V. Lunev, *Real gas flows with high velocities* (CRC Press, 2017).].
- [6] Г.Г. Чёрный, *Газовая динамика* (Наука, М., 1988).
- [7] В.Т. Калугин, *Аэрогазодинамика органов управления полетом летательных аппаратов* (Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2004).
- [8] Ю.П. Райзер, *Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков* (Физматлит, М., 2011). [Yu.P. Raizer, *Gas discharge physics* (Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 1991).
- [9] М.А. Котов, П.В. Козлов, Г.Я. Герасимов, В.Ю. Левашов, А.Н. Шемыakin, Н.Г. Соловьев, М.Ю. Yakimov, В.Н. Glebov, Г.А. Dubrova, А.М. Malyutin, *Acta Astron.*, **204**, 787 (2023). DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.11.036
- [10] S. Sapochnikov, V. Mityakov, A. Mityakov, *Heatmetry. The science and practice of heat flux measurement* (Springer, Netherlands, 2020).
- [11] H. Knauss, T. Roediger, D.A. Bountin, B.V. Smorodsky, A.A. Maslov, J. Srulijes, J. Spacecr. Rockets, **46** (2), 255 (2009). DOI: 10.2514/1.32011
- [12] V.E. Mosharov, V.N. Radchenko, I.V. Senuev, M.A. Kотов, L.B. Ruleva, S.I. Solodovnikov, S.T. Surzhikov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1009**, 012036 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1009/1/012036
- [13] M.A. Kотов, A.N. Shemyakin, N.G. Solovyov, M.Yu. Yakimov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malyutin, P.A. Popov, S.A. Poniaev, T.A. Lapushkina, N.A. Monakhov, V.A. Sakharov, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2103**, 012218 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012218
- [14] V.N. Glebov, V.M. Manankov, A.M. Malyutin, N.N. Golovatyuk, Y.V. Zastavny, *Proc. SPIE*, **2257**, 225 (1994). DOI: 10.1117/12.171658
- [15] M.A. Kотов, A.N. Shemyakin, N.G. Solovyov, M.Y. Yakimov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malyutin, P.A. Popov, S.A. Poniaev, T.A. Lapushkina, N.A. Monakhov, V.A. Sakharov, *Appl. Therm. Eng.*, **195**, 117143 (2021). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117143
- [16] M.A. Kотов, N. Solovyov, V. Glebov, G. Dubrova, A. Malyutin, *St. Petersburg State Polytech. Univ. J. — Physics and Mathematic*, **16** (1.1), 472 (2023). DOI: 10.18721/JPM.161.180
- [17] Н.Н. Огурцова, И.В. Подмошенский, В.М. Шелемина, *ТВТ*, **16** (4), 744 (1978).
- [18] Н.Г. Быкова, И.Е. Забелинский, П.В. Козлов, В.Ю. Левашов, Л.Б. Ибрагимов, О.П. Шаталов, *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, **16** (3), 8 (2015).
- [19] J.A. Fay, N.H. Kemp, *J. Fluid Mech.*, **21** (4), 659 (1965). DOI: 10.1017/S002211206500040X
- [20] П.А. Попов, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, Р.О. Куракин, *Письма в ЖТФ*, **48** (20), 7 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.20.53688.19297 [P.A. Popov, N.A. Monakhov, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, R.O. Kurakin, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (10), 46 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.10.54798.19297].
- [21] A. Gülhan, T. Thiele, F. Siebe, R. Kronen, T. Schleutker, *J. Spacecr. Rockets*, **56** (1), 68 (2019). DOI: 10.2514/1.A34228
- [22] С.Т. Суржиков, Д.С. Яцухно, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 6, 73 (2022). DOI: 10.31857/S0568528122600394 [S.T. Surzhikov, D.S. Yatsukhno, *Fluid Dyn.*, **57** (6), 768 (2022). DOI: 10.1134/S0015462822600924].