

03

Использование термоэлектрического детектора в газовой среде, ионизированной ударной волной

© 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–Шатура Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ „Курчатowski институт“, Шатура, Московская обл., Россия

E-mail: kotov@ipmnet.ru

Поступило в Редакцию 18 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 26 марта 2025 г.

Принято к публикации 26 марта 2025 г.

Рассматриваются аспекты работы термоэлектрического детектора в ударно-нагретой частично ионизированной воздушной среде. Продемонстрировано влияние на показания детектора заряженных частиц, находящихся около его чувствительного элемента. Приведены данные по регистрации процесса фотоионизации перед фронтом ударной волны.

Ключевые слова: ударная труба, термоэлектрический детектор, ионизация.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.12.60614.20289

Изучение процессов, протекающих вблизи поверхности спускаемого космического аппарата при его движении в атмосфере Земли и других планет Солнечной системы, представляет особую актуальную задачу для развития ракетно-космической отрасли [1,2]. Для наземного моделирования условий, реализуемых при обтекании космического аппарата потоком ударно-нагретого газа, используются установки различного типа, включая ударные трубы. Применение ударных труб позволяет достичь больших значений энтальпий набегающего газового потока, но характерное время таких процессов ограничивается несколькими десятками микросекунд. Измерение тепловых потоков в таких условиях может проводиться специальными термоэлектрическими детекторами (ТД), вырабатывающими термоэдс в результате тепловой нагрузки. Большинство из них имеет чувствительные элементы из электропроводящих материалов, показания которых могут быть подвержены влиянию заряженных частиц, возникающих в ударно-нагретом газе в результате ионизационных процессов. Подробная информация о конструкции различного вида ТД и генерации сигнала на тепловую нагрузку содержится в [3].

Следует отметить, что в условиях, когда степень ионизации газа является малой, использование ТД для измерения тепловых потоков дает достаточно корректные результаты. В частности, такого рода детектор использовался ранее для регистрации воспламенения пропан-воздушной смеси за отраженной ударной волной при температуре ударно-нагретого газа до 1700 К и давлении до 20 atm и выше [3]. Интенсивности тепловых потоков, зафиксированные в процессе измерений, достигали 7 MW/m^2 в течение $0.5 \mu\text{s}$, начала фронтов подъема

на соответствующих временных зависимостях совпадали с показаниями датчика давления.

В частично ионизированных газах данные, получаемые с помощью определенных типов ТД, могут трактоваться не совсем однозначно. На это указывают эксперименты по регистрации теплового потока за отраженной ударной волной в ксеноне со значительной степенью ионизации, в которых наблюдались некоторые особенности сигналов, свидетельствующие о влиянии заряженных частиц [4]. Настоящая работа посвящена анализу результатов, полученных с помощью ТД в частично ионизированном воздухе, описанию влияния заряженных частиц на его показания и рассмотрению возможности его применения для регистрации ионизационных процессов перед и за фронтом сильной ударной волны (УВ).

Эксперименты выполнялись на двухдиафрагменной ударной трубе, принцип действия которой подробно описан в [5]. В камере низкого давления (КНД) с внутренним круглым сечением диаметром 57 mm, содержащей воздух, формировалась ударная волна. Электрические зонды Z1 и Z2 для регистрации параметров плазмы имели одноэлектродную конструкцию и располагались по ходу движения ударной волны. Длина выступа электродов в рабочую часть КНД составляла около 1 mm (выступ мог немного варьироваться из-за сложности контроля его значения в КНД после установки зонда), диаметр 0.4 mm. Материал электродов — нержавеющая сталь марки AISI 304. Между электродами заподлицо с внутренней стенкой КНД устанавливался ТД с чувствительным элементом на основе кристаллитов хрома. Запись показаний осуществлялась через аналого-цифровой преобразователь с частотой регистрации 2.5 MHz на

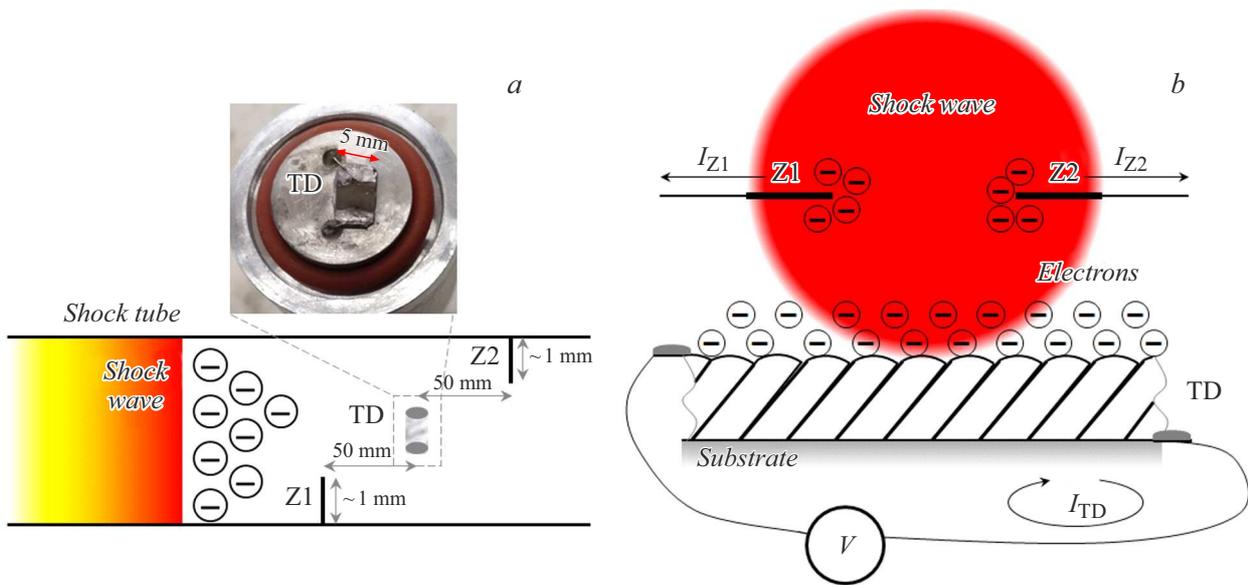


Рис. 1. Схема расположения зондов (Z1, Z2) и термоэлектрического детектора (TD) в КНД ударной трубы. *a* — вид сбоку, *b* — вид спереди навстречу движению УВ.

канал. Схема эксперимента, расположение и размеры измерительных устройств представлены на рис. 1.

В виде кружков с минусами на рис. 1 схематично показаны области электронов, образовавшиеся рядом с Z1, TD и Z2 в результате фотоионизации. Ширина TD составляла 5 мм (рис. 1, *a*, фотография сверху), внешний электрический потенциал в средствах измерения Z1, TD и Z2 отсутствовал.

Излучение ударно-нагретого газа за фронтом сильной УВ с энергией фотонов, превосходящей энергию ионизации молекул газа, распространяется в область невозмущенного газа перед УВ и частично поглощается ближайшим к фронту УВ слоем, что приводит к его фотоионизации ($N_2 + h\nu \rightarrow N_2^+ + e^-$ и $O_2 + h\nu \rightarrow O_2^+ + e^-$) [5]. Образование электронов и их последующее тепловое движение к поверхности Z1, TD и Z2 приводит к генерации токов I_{Z1} , I_{TD} и I_{Z2} . Чувствительный слой используемого TD представляет собой систему разноосных кристаллитов хрома, размещенных на высокоомной подложке с помощью вакуумного напыления при наклонном угле конденсации (рис. 1, *b*). Регистрация ЭДС происходит через контактные площадки, расположенные на подложке датчика. Подобно одноэлектродным зондам в такой структуре при появлении отрицательного потенциала на верхней плоскости (увеличение концентрации электронов) возникает направленное движение заряженных частиц в замкнутом контуре. Разница зарядов между верхней (дополнительные электроны, образовавшиеся перед УВ) и нижней плоскостями создает ток I_{TD} .

На рис. 2 приведены временные зависимости показаний зондов Z1 и Z2 и детектора TD, записанные во временном интервале от -140 до $0 \mu s$, где нулевой момент времени совпадает с приходом ударного фронта

к детектору TD. Начальное давление в КНД 0.25 Torr, скорость фронта УВ 9.86 km/s. В показаниях Z1 и Z2 на больших расстояниях от УВ наблюдается влияние фотоэффекта от излучения ударно-нагретого газа, который сменяется фиксацией фотоионизации непосредственно перед приходом фронта УВ.

Значения работы выхода электрона с поверхности нержавеющей стали, из которой изготовлены зонды, оцениваются в диапазоне от 3.5 eV и выше [6], что эквивалентно энергии фотонов на длине волны 354 nm и ниже. Температура наиболее нагретой части неравновесной плазмы воздуха за фронтом УВ при данных параметрах может быть оценена приблизительно в 10 kK [7]. Спектр излучения такой плазмы имеет как несколько типичных полос в УФ-области, так и излучение континуума, описываемое законом Планка [5]. Спектральная яркость плазмы является достаточной для выбивания электронов с поверхности электродов зондов и увеличения их потенциалов (рис. 2, Z1: от -140 до $-50 \mu s$, Z2: от -110 до $20 \mu s$). Излучение нагретой плазмы с энергией, превосходящей энергию ионизации частиц воздуха перед фронтом УВ, частично поглощается ближайшим к фронту УВ слоем воздуха, что приводит к его ионизации, частично распространяется далее и ионизует области газа, все более отстоящие от фронта УВ. Электроны за счет теплового движения попадают на поверхность зондов Z1 и Z2, что приводит к уменьшению положительного потенциала зонда, а в дальнейшем к переходу потенциала в область отрицательных величин (рис. 2, Z1: $-50 \mu s$ и далее, Z2: $-20 \mu s$ и далее). Поскольку интенсивность проходящего излучения экспоненциально уменьшается с увеличением

толщины слоя, наибольшая концентрация электронов находится вблизи фронта УВ.

В показаниях TD сразу виден вклад фотоионизационных процессов (рис. 2, TD: $-130 \mu\text{s}$ и далее), поскольку здесь явление фотоэффекта отсутствует из-за плоской конструкции датчика и его размещения заподлицо к стенке КНД (рис. 1). Такой подход позволяет более точно определить зону начала фотоионизации перед УВ.

Также проводились измерения характеристик излучения УВ. Уровень излучения, регистрируемый через боковое окно за время более $1 \mu\text{s}$ до прихода УВ в измерительное сечение TD, в диапазоне длин волн $200\text{--}300 \text{ nm}$ (т.е. при энергиях, при которых может наблюдаться фотоэффект с поверхности электронов [5]) на три-четыре порядка меньше максимального, что также свидетельствует об отсутствии фотоэффекта. В работе [8] содержатся данные по измерению излучения фронта УВ и оценки его кривизны, свидетельствующие о том, что для условий, рассматриваемых в статье, фронт УВ можно считать достаточно устойчивым и плоским, а возникновением локальных неустойчивостей перед фронтом УВ можно пренебречь.

Из рис. 2 можно определить момент времени $t = -100 \mu\text{s}$, после которого начинает наблюдаться влияние заряженных частиц на показания TD, свидетельствующее о начале фотоионизации перед фронтом УВ (при скорости 9.86 km/s). В работах [5,9,10] содержится оценка концентрации электронов для аналогичных экспериментальных условий, ее значения за 1000 mm перед фронтом УВ составляют порядка $N_e = 10^{10}\text{--}10^{11} \text{ cm}^{-3}$. Можно предположить, что данная величина концентрации электронов является некоторым пороговым значением, выше которого необходимо учитывать влияние заряженных частиц на показания TD.

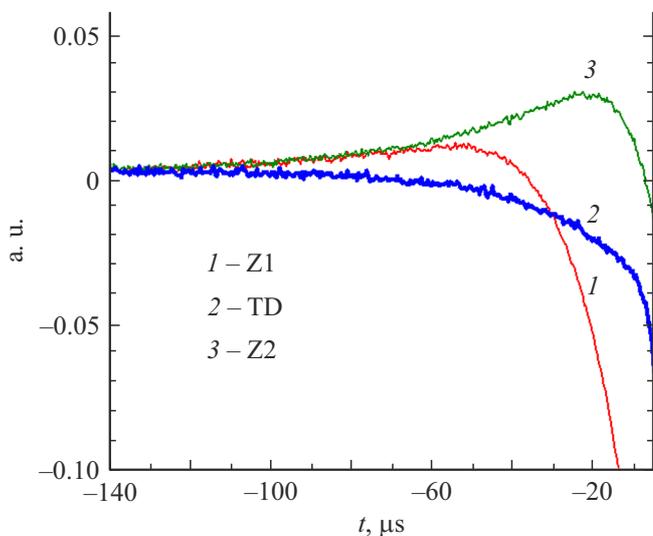


Рис. 2. Сигналы зондов (Z1, Z2) и термоэлектрического детектора (TD), показывающие явления фотоэффекта и фотоионизации перед ударной волной.

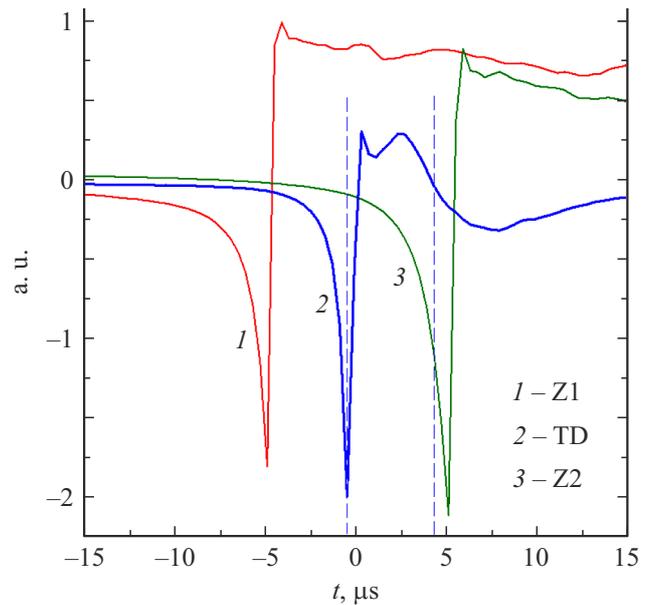


Рис. 3. Сравнение показаний Z1, Z2 и TD во время прохождения фронта ударной волны.

Прохождение фронта УВ в показаниях TD наблюдается более медленное (рис. 3). Это связано с размерами измерительной площадки его чувствительного элемента (5 mm против диаметра 0.4 mm у электродов Z1 и Z2, рис. 1, а), около которой постепенно увеличивается концентрация положительно заряженных частиц. Время прохождения такой площадки фронтом УВ составляет немного меньше $5 \mu\text{s}$ при скорости УВ 9.86 km/s (область между штриховыми линиями на рис. 3). В показаниях TD после резкого подъема наблюдаются колебания. Их характер помимо влияния заряженных частиц обусловлен также и термоэдс, генерируемой TD вследствие конвективного и радиационного нагрева от газа за УВ [11]. Экспериментальное определение ионизационных параметров газа за фронтом УВ является довольно трудной задачей из-за сильной степени неравновесности плазмы и наличия конкурирующих процессов: ионизация и рекомбинация, колебательно-поступательная релаксация, установление локального термодинамического равновесия, переходные газодинамические процессы тепло- и массообмена, обусловленные перемешиванием горячих масс [1,2].

Представленные результаты свидетельствуют о реакции чувствительного элемента используемого термоэлектрического детектора TD на концентрацию заряженных частиц около него. Потенциал датчика может меняться не только за счет возникновения термоэдс в результате приходящего на него теплового потока, но и за счет находящихся рядом электронов. Этот аспект нужно учитывать при использовании термоэлектрического детектора в ионизированных газах. Обращает на себя внимание и возможность использования термоэлектрических детекторов для регистрации ионизационных про-

цессов в ударно-волновых взаимодействиях, например для регистрации зоны начала процесса фотоионизации перед фронтом сильных ударных волн. Применение 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. Получение таких данных позволяет проводить сравнение с показаниями ионизационных датчиков, которые устанавливаются на реальном аппарате и фиксируют значения распределений заряженных частиц в процессе полета и спуска [12,13].

Благодарности

Авторы благодарят П.А. Попова за идею, положенную в основу работы.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова, Министерства науки и высшего образования РФ (номер госрегистрации 124012500440-9) и государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

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, *Компьютерная аэрофизика спускаемых космических аппаратов. Двухмерные модели* (Физматлит, М., 2018).
<https://www.rfbr.ru/library/books/2521/>
- [3] М.А. Котов, Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов, В.Н. Глебов, Г.А. Дуброва, А.М. Малютин, П.А. Попов, С.А. Поняев, Н.А. Монахов, Т.А. Лапушкина, В.А. Сахаров, П.В. Козлов, В.Ю. Левашов, Г.Я. Герасимов, *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, **25**, 3 (2024). DOI: 10.33257/PhChGD.25.3.1114
- [4] M.A. Kotov, 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
- [5] M.A. Kotov, P.V. Kozlov, G.Ya. Gerasimov, V. Yu Levashov, K.Yu. Osipenko, N.G. Bykova, I.E. Zabelinsky, *Acta Astron.*, **217**, 130 (2024). DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.01.035
- [6] R. Wilson, *J. Appl. Phys.*, **37**, 3170 (1966). DOI: 10.1063/1.1703180
- [7] 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
- [8] T. Morioka, N. Sakurai, K. Maeno, H. Honma, *J. Visualization*, **3** (1), 51 (2000). DOI: 10.1007/BF03182440
- [9] M. Omura, L.L. Presley, *AIAA J.*, **7** (12), 2363 (1969). DOI: 10.2514/3.5554
- [10] S. Nomura, T. Kawakami, K. Fujita, *J. Thermophys. Heat Transfer*, **35** (3), 518 (2021). DOI: 10.2514/1.T6057
- [11] Ф.В. Филиппов, М.А. Котов, Н.Г. Соловьев, В.Н. Глебов, Г.А. Дуброва, А.М. Малютин, *Письма в ЖТФ*, **50** (23), 50 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.23.59400.6591k [F.V. Filippov, M.A. Kotov, N.G. Solovyov, V.N. Glebov, G.A. Dubrova, A.M. Malyutin, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (12), 45 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.12.60349.6591k].
- [12] A. Gülhan, T. Thiele, F. Siebe, R. Kronen, T. Schleutker, *J. Spacecraft Rockets*, **56** (1), 68 (2019). DOI: 10.2514/1.A34228
- [13] 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].