

УДК 533.6.011.5

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

© 2024 г. Г. Я. Герасимов¹, В. Ю. Левашов^{1*}, П. В. Козлов¹,
Н. Г. Быкова¹, И. Е. Забелинский¹

¹ Институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: vyl69@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024;

после доработки 17.01.2024;

принята в печать 22.01.2024

Рассмотрено современное состояние исследований по измерению концентрации электронов в низкотемпературной плазме в окрестности сильной ударной волны, моделирующей условия входа спускаемых космических аппаратов в атмосферу Земли. Проанализированы различные физико-химические процессы, приводящие к образованию низкотемпературной плазмы как перед фронтом ударной волны, так и в ударно-нагретом газе. Сделан критический обзор различных методов диагностики плазмы, отмечены их достоинства и недостатки. Проведен анализ многочисленных экспериментальных данных по измерению концентрации электронов в различных ударно-нагретых газах при различных условиях.

Ключевые слова: ударная волна, концентрация электронов, низкотемпературная плазма, методы диагностики, воздух.

DOI: 10.31857/S0207401X24070047

ВВЕДЕНИЕ

Неравновесные физико-химические процессы, протекающие в ударно-нагретом слое воздуха вблизи поверхности спускаемого космического аппарата при его движении в атмосфере Земли, приводят к частичной ионизации газовой среды. При этом электроны оказывают существенное влияние на формирование радиационных тепловых потоков, направленных к поверхности аппарата [1]. В первую очередь это объясняется тем, что возбуждение электронных уровней атомов и молекул электронным ударом при высоких скоростях ударной волны становится преобладающим столкновительным процессом, инициирующим переход поступательной энергии ударно-нагретого газа в радиационную энергию [2]. Наличие высокой степени ионизации воздуха вблизи поверхности космического аппарата влияет также на распространение радиоволн, что может вызвать нарушение радиосвязи с аппаратом [3, 4]. Поэтому правильная оценка концентрации электронов в ударно нагретом газе играет важную роль в обеспечении безопасности полета [5].

Наиболее удобным инструментом для изучения неравновесных процессов, протекающих в низ-

котемпературной плазме, являются ударные трубы. В настоящее время в мировой практике эксплуатируется большое количество ударных труб, отличающихся друг от друга размерами, конструкцией и целью проводимых исследований. Достаточно полное описание действующих ударных установок приведено в обзорах [6–9]. Большой объем информации по радиационным характеристикам ударно-нагретого воздуха получен на установках EAST (Electric Arc Shock Tube) Исследовательского центра NASA (Ames, USA) [10], T6 Stalker (результат совместной работы Оксфордского университета и Центра гиперзвуковых исследований Университета Квинсленда) [11], а также на ударных туннелях X1, X2 и X3 Университета Квинсленда (Австралия) [12]. Среди действующих отечественных установок следует отметить экспериментальный комплекс “Ударная труба” НИИ механики МГУ, с использованием которого ведется исследование различных высокотемпературных процессов [13–16].

Измерение концентрации электронов в ударных волнах проводится с применением различных методов диагностики плазмы, которые фактически являются развитием известных подходов

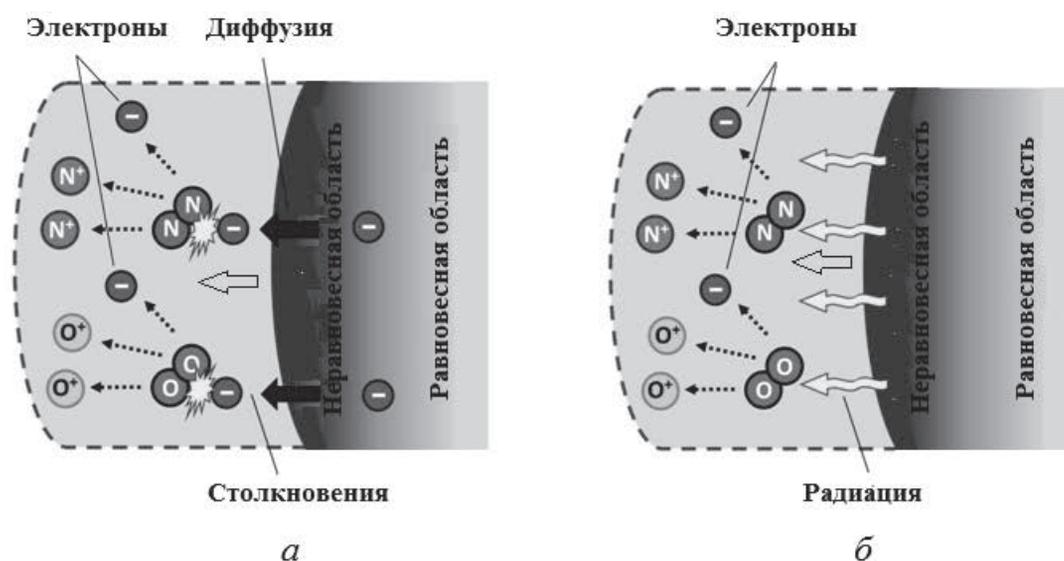


Рис. 1. Схематичное изображение ионизационных процессов перед ударной волной: а – диффузия, б – фотоионизация [20]. Стрелкой показано направление движения ударной волны.

к изучению газоразрядной плазмы [17]. К ним в первую очередь относятся зондовые, спектроскопические, интерферометрические и другие методы [18, 19]. В настоящей работе рассмотрено современное состояние исследований по данному направлению. В связи с тем, что количество публикаций по методам диагностики плазмы достаточно велико, в обзоре приведены наиболее типичные работы по каждому из рассмотренных вопросов.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Физико-химические процессы, приводящие к образованию низкотемпературной плазмы в окрестности сильной ударной волны, протекают как перед ее фронтом, так и в ударно-нагретом газе. Возникновение электронов перед ударной волной объясняется двумя конкурирующими механизмами: диффузией электронов из послударной области и фотоионизацией молекул коротковолновым вакуумно-ультрафиолетовым излучением ударно-нагретого газа [20]. Схематично эти процессы представлены на рис. 1, где показано, что ударная волна движется справа налево. Как показали эксперименты с электростатическими и магнитными зондами по исследованию диффузии электронов перед ударными волнами с числом Маха $M = 8-12$ в аргоне [21], диффузионный процесс способен обеспечить плотность электронов $n_e \approx 10^7 \text{ см}^{-3}$ на расстоянии около 1 м перед фронтом волны. Эти данные подтвержда-

ются результатами моделирования диффузионного процесса с участием электронов [22].

Серия зондовых измерений параметров низкотемпературной плазмы перед фронтом падающей ударной волны, проведенная в работе [23], позволила выделить причины изменения потенциала зонда, связанные с процессами фотоэффекта и фотоионизации, а также определить момент начала образования электронов перед фронтом ударной волны за счет излучения газа из высокотемпературной области за ударной волной. Как показано в работе [24], основным источником фотоэлектронов в воздухе являются молекулы O_2 , которые поглощают излучение, испускаемое молекулами азота в синглетных возбужденных состояниях $b^1 P$, $b^1 \Sigma_u^+$ и $c_4^1 \Sigma_u^+$ в области длин волн от 98 до 102.5 нм. Для расчета скорости фотоионизации разработана математическая модель, которая удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными [25]. Более поздние варианты модели [26, 27] позволили ближе подойти к реальному физическому процессу.

Ионизационные процессы в ударно-нагретых молекулярных газах инициируются химическими реакциями ассоциативной ионизации [28]. В частности, в воздушной среде к ним относятся следующие реакции: $N + O \rightarrow NO^+ + e$, $N + N \rightarrow N_2^+ + e$, $O + O \rightarrow O_2^+ + e$. В приближении, когда прямо за ударным фронтом электроны отсутствуют, эта группа реакций отвечает за формирование первичных электронов. Процесс ассоциативной

ионизации особенно важен в неравновесной зоне ударно-нагретого газа, так как именно он отвечает за формирование радиационного теплового потока, направленного к поверхности спускаемого космического аппарата [29]. В атомарных газах инициирование ионизационного процесса в послударной области осуществляется посредством реакции ионизации атома при его столкновении с другим атомом [30]. При этом рассматривается двухступенчатая модель реакции, когда атом при столкновении возбуждается до первого возбужденного состояния, а потом мгновенно ионизируется в результате другого столкновения.

ЗОНДОВЫЙ МЕТОД

Одним из наиболее ранних методов диагностики плазмы является метод зондов Ленгмюра [17]. Суть метода заключается во введении в плазму электрода-зонда, на который перетекают ионы и электроны из окружающей его газовой среды. При этом возникает ток, который зависит от напряжения между плазмой и поверхностью электрода. Параметры плазмы получаются из анализа вольт-амперной характеристики, полученной путем сканирования напряжения зонда. Основы теории ленгмюровского зонда подробно изложены в ряде работ и монографий (см., например, [31–33]). Основным достоинством метода является локальность измеряемых характеристик плазмы. К другому его преимуществу можно отнести простоту используемой аппаратуры, что позволяет быстро и без высоких затрат получить результат. И, наконец, число измеряемых параметров и диапазоны их измерений столь велики, что не имеют аналогов среди других методов диагностики плазмы.

В традиционной зондовой теории Ленгмюра предполагается, что $l \gg r_p \gg l_D$, где l – длина свободного пробега электронов в плазме, r_p – размер зонда и l_D – дебаевский радиус [31]. При высоких давлениях это соотношение нарушается и необходимо использовать теорию континуума [34]. Второе соотношение указывает на предельный случай бесконечно тонкого призондового слоя, что позволяет существенно упростить интерпретацию результатов зондовых измерений применительно к зондам цилиндрической и сферической формы. В целом область применения зондовой теории Ленгмюра охватывает диапазон давлений от 10^{-5} до 10^3 Торр и диапазон концен-

траций электронов от 10^7 до 10^{15} см^{-3} [35]. Следует отметить, что интерпретация зондовых измерений сама по себе может быть предметом отдельного изучения, так как она существенным образом зависит от параметров плазмы, размеров и формы зонда [36, 37].

Зондовая методика хорошо работает при измерении концентрации электронов в области перед фронтом сильной ударной волны. Как отмечалось в предыдущем разделе, процесс фотоионизации молекул O_2 ведет к образованию электронов-предшественников перед ударной волной. Этот эффект, в свою очередь, увеличивает толщину ударного слоя перед спускаемым космическим аппаратом, а также неравновесную температуру за фронтом ударной волны, что приводит к избыточному радиационному нагреву. Как показывают результаты численного анализа [38, 39], учет этого эффекта в условиях входа аппарата в атмосферу Земли со сверхорбитальной скоростью может привести к увеличению теплового потока, составляющему до 20%.

Серия экспериментов по зондовому измерению температуры и концентрации электронов перед сильной ударной волной в воздухе проведена в двухдиафрагменной поршневой ударной трубе HVST (Hyper Velocity Shock Tube), эксплуатируемой в Японском агентстве аэрокосмических исследований (JAXA) [40]. Начальное давление воздуха перед фронтом ударной волны p_0 во всех экспериментах равнялось 0.23 Торр, скорость ударной волны V_{SW} изменялась от 10.7 до 12.3 км/с. Измерения температуры (T_e) и концентрации (n_e) электронов выполнены с использованием одиночного зонда, сделанного из медного электрода диаметром 2 мм, боковая поверхность которого покрыта защитной керамической оболочкой. Зонд вставлялся вертикально в стенку ударной трубы, во избежание возможного влияния фотоэффекта. Обработка вольт-амперных характеристик зонда проведена с использованием простых аналитических соотношений.

Зависимость концентрации электронов n_e от расстояния x до ударного фронта при различных скоростях ударной волны показана на рис. 2. Видно, что с увеличением x и уменьшением скорости ударной волны величина n_e уменьшается. Концентрация нейтральных частиц газа в рассматриваемой области при $p_0 = 0.23$ Торр и температуре $T_0 = 300$ К составляет порядка

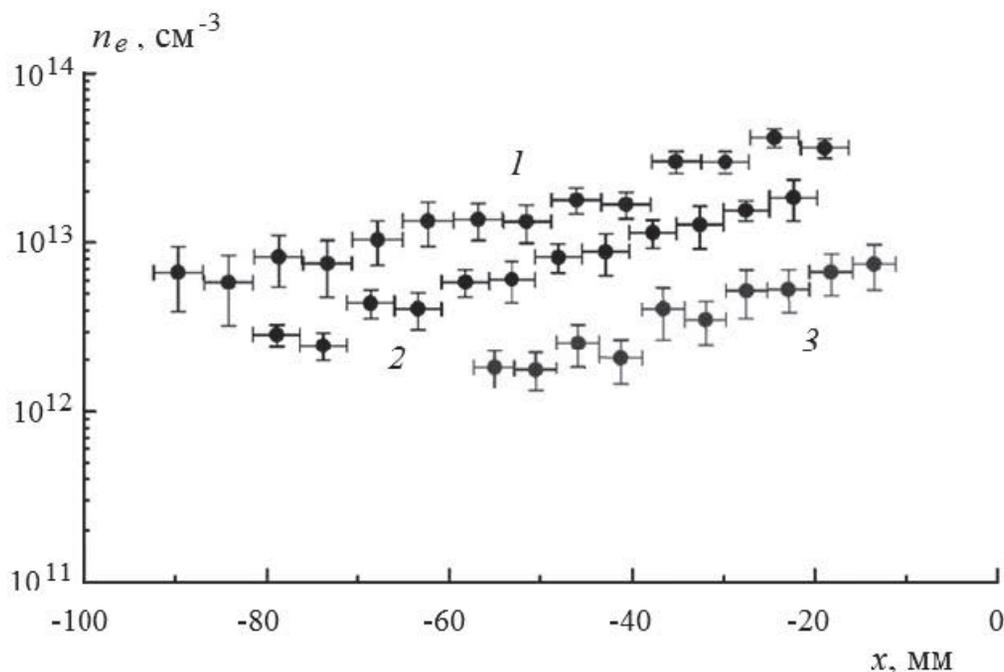


Рис. 2. Зависимость концентрации электронов перед сильной ударной волной в воздухе от расстояния до ударного фронта, измеренная зондовым методом при $V_{SW} = 12.3$ (1), 11.5 (2) и 10.7 км/с (3) [40]. Начальное давление $p_0 = 0.23$ Торр.

$7.3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Соответственно, степень ионизации воздуха при $V_{SW} = 12.3$ км/с на расстоянии $x = -80$ мм равна примерно 0.1%. Электронная температура T_e , необходимая для оценки концентрации n_e , при данных скоростях ударной волны практически постоянна и составляет величину порядка (4000 ± 1000) К.

Эксперименты по измерению электронной концентрации перед ударной волной с помощью зондовой методики проводились также в электропроводной ударной трубе ADST (Arc Driven Shock Tube), длительное время эксплуатируемой в ЦАГИ [41]. Использовались одиночные и двойные зонды с переменным и постоянным напряжением. Область исследованных параметров охватывает более широкий, чем в работе [40], интервал скоростей ударной волны (от 4.6 до 11.3 км/с при $p_0 = 0.2$ Торр) и расстояний от ударного фронта (до 80 см). Полученные результаты по измерению электронной концентрации перед ударной волной примерно в два раза меньше соответствующих данных, приведенных в работе [40]. Аналогичные эксперименты, проведенные в чистом азоте [42], дают примерно такие же значения для электронной концентрации, что и в работе [40].

Измерение электронной концентрации n_e в квазистационарной области течения за сильными ударными волнами в воздухе проводилось

в электропроводной ударной трубе ADST при начальном давлении $p_0 = 0.2$ Торр и значении скорости ударной волны V_{SW} в интервале от 4.3 до 15 км/с [43]. Так как в рассматриваемых условиях число Кнудсена составляет величину порядка единицы, для обработки данных зондовых измерений использовались результаты работы [44], в которой построена приближенная теория работы зондов в переходном режиме.

Результаты зондовых измерений электронной концентрации в ударно-нагретом воздухе, полученных на установке ADST, представлены на рис. 3. Заштрихованная область соответствует значениям n_e , выбранным из большого числа экспериментов, проведенных при различных r_p . Сплошной кривой показаны результаты равновесного расчета. Видно, что при скоростях ударной волны $V_{SW} > 8$ км/с измеренные значения n_e совпадают с равновесной кривой. При скоростях более 9 км/с равновесные значения n_e значительно превышают экспериментальные. Этот факт может быть объяснен тем, что при $V_{SW} > 9$ км/с на смену механизму ассоциативной ионизации приходит процесс ионизации электронным ударом. При этом в зоне за ударной волной, где концентрация электронов выходит на постоянный уровень, может не выполняться условие локального термодинамического равновесия вследствие обеднения

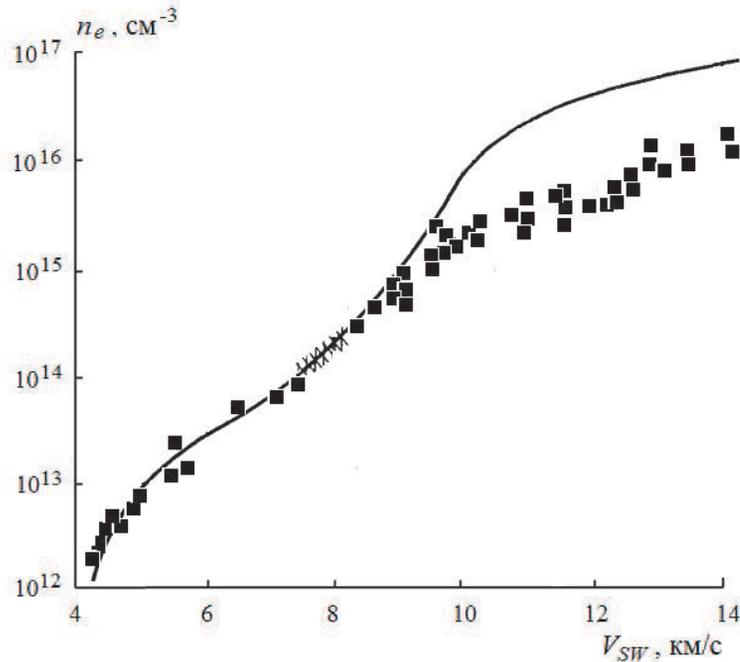


Рис. 3. Зависимость концентрации электронов за сильной ударной волной в воздухе от скорости ударной волны, измеренная зондовым методом [43]. Линия — результаты равновесного расчета.

возбужденных состояний атомов за счет высвечивания [45]. С другой стороны, при больших давлениях газа, которые реализуются за сильной ударной волной, традиционная зондовая теория Ленгмюра теряет силу, а различного рода поправки на большую плотность газа и учет эффекта диффузии вблизи зонда, как правило, недостаточны для измерения абсолютных значений электронной концентрации [17]. Аналогичные измерения величины n_e за сильной ударной волной в воздухе при скоростях V_{SW} от 7 до 9 км/с и давлении $p_0 = 0.02$ Торр проведены в работе [46].

Зондовая методика широко используется также для измерения характеристик плазмы в различных газоразрядных и энергетических установках. В частности, временная эволюция плотности плазмы и температуры электронов в мощных импульсных магнетронных разрядах, где концентрация электронов может достигать значений $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, измерена в работе [47] с помощью ленгмюровского зонда и метода лазерного томсоновского рассеяния. Теоретические и экспериментальные результаты использования электрических зондов для получения информации об эффективной скорости хемоионизации в высокотемпературных химически реагирующих неравновесных газовых смесях за отраженными ударными волнами в ударных трубах рассмотрены в работе [48].

МЕТОДЫ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Спектроскопический метод является в настоящее время наиболее распространенным методом анализа низкотемпературной плазмы за сильной ударной волной [49]. Методология определения концентрации электронов основана на подгонке теоретически рассчитанных спектральных характеристик ударно-нагретого газа к их измеренным значениям. В первую очередь это относится к изучению уширения атомарных линий вследствие эффекта Штарка, т.е. в результате взаимодействия излучающих атомов с микрополями окружающих их электронов и ионов [50]. Другая разновидность спектрального метода — процедура сопоставления измеренных интенсивностей спектральных линий атомов с расчетными данными [51]. При этом используются достаточно сложные столкновительно-радиационные модели, которые затрудняют широкое применение данной разновидности на практике.

При спектроскопическом анализе низкотемпературной плазмы на основе штарковского уширения атомарных линий особый интерес представляет линия атома водорода H_β ($\lambda = 486 \text{ нм}$) серии Бальмера. В молекулярных газах с небольшой примесью паров воды или молекулярного водорода эта линия имеет ярко выраженный мак-

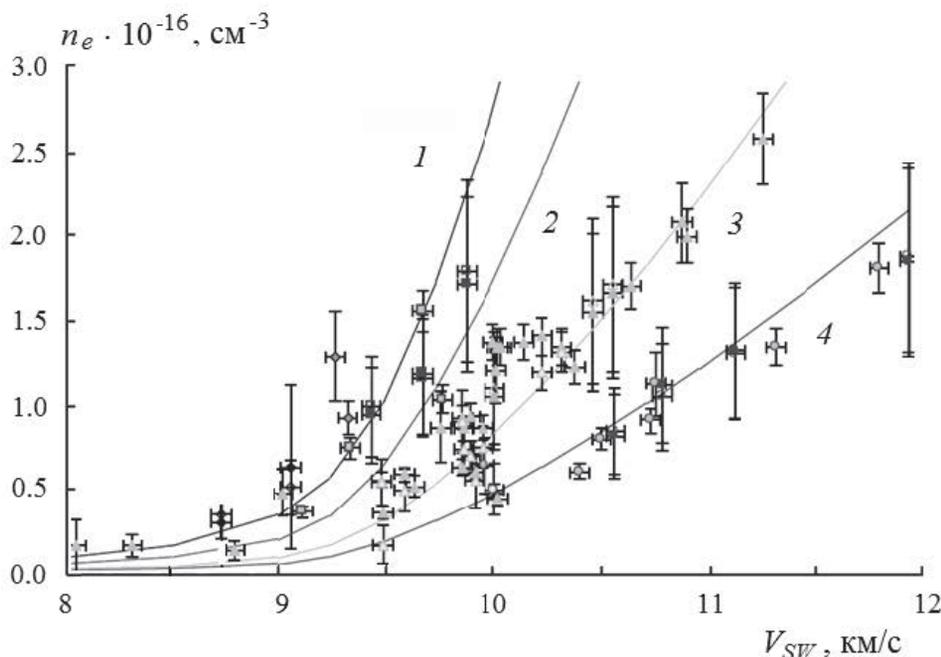


Рис. 4. Электронные концентрации, измеренные за сильной ударной волной в воздухе на основе анализа штарковского уширения линий N (410 и 411 нм) при $p_0 = 0.9$ (1), 0.5 (2), 0.2 (3) и 0.1 Торр (4) [57]. Линии – результат равновесного расчета.

симум на интегральной спектрограмме излучения и не затенена молекулярными полосами [52]. Расчет штарковского уширения линий атома водорода при различных значениях концентрации и температуры электронов представлен в работе [53] в виде табличных данных. В предположении, что электронная температура составляет ≈ 10000 К, а приведенная масса иона равна 1.0, эти табличные данные для линии H_β были параметризованы в работе [54] в виде $n_e = 1.0 \times 10^{16} (\Delta\lambda_{FWHM})^{1.47} \text{ см}^{-3}$. В этом выражении $\Delta\lambda_{FWHM}$ представляет собой полную ширину на половине максимума (FWHM – full width at half maximum) интенсивности линии H_β , измеренную в нанометрах. Данный метод анализа низкотемпературной плазмы, основанный на спектроскопическом измерении тонкой структуры линии H_β , достаточно часто используется при определении концентрации электронов в неравновесной области ударно-нагретого газа (см., например, [55, 56]).

Измерение концентрации электронов в ударно-нагретом газе достаточно часто проводится на основе анализа штарковского уширения других атомарных линий. В частности, большой объем экспериментальной информации применительно к условиям входа космического аппарата в атмосферу Земли со сверхорбитальной скоростью получен на ударной установке EAST, где для опре-

деления величины n_e используются измеренные профили линий H_α при $\lambda = 656$ нм и N при $\lambda = 410$ и 411 нм [57].

На рис. 4 представлена зависимость концентрации электронов n_e от начального давления p_0 в набегающем потоке и скорости ударной волны V_{SW} . Линиями показаны результаты равновесного расчета. Видно, что с ростом p_0 и V_{SW} степень ионизации воздуха быстро увеличивается. Разброс экспериментальных данных достаточно хорошо соответствует равновесным значениям с небольшой тенденцией к превышению при низких скоростях и высоких давлениях. Интересно сравнить данные, приведенные на рис. 4, с результатами измерения n_e зондовым методом, показанными на рис. 3. Анализ представленной информации позволяет сделать вывод о том, что зондовая методика плохо работает при высоких скоростях ударной волны, когда концентрация электронов в ударно-нагретом воздухе превышает 10^{15} см^{-3} .

Исследование характеристик низкотемпературной плазмы, основанное на измерении поглощения лазерного излучения, проведено в работе [58]. В качестве рабочей среды использовалась ударно-нагретая смесь 1% $O_2 + Ar$ за отраженной ударной волной при температуре газа ~ 10000 К и давлении ~ 0.5 атм. Концентрация электронов

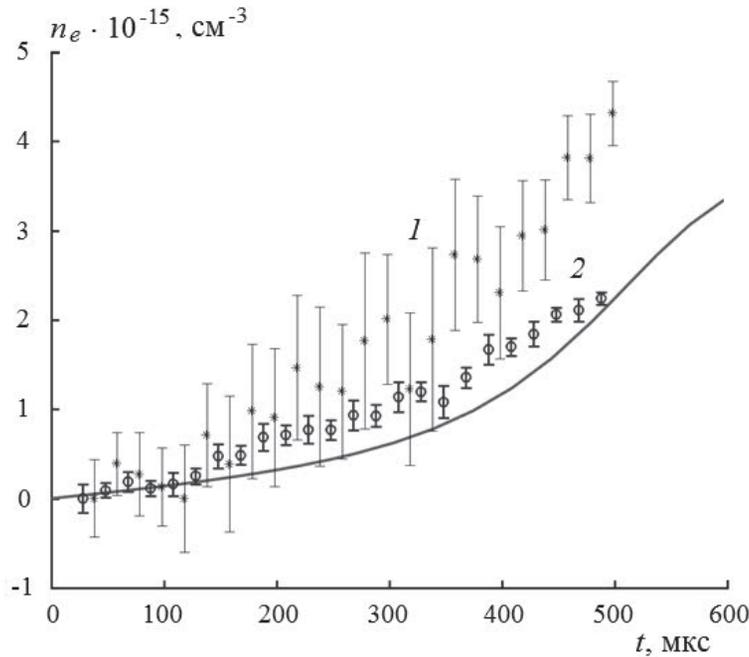


Рис. 5. Временная зависимость концентрации электронов в смеси 1% O₂ + Ag за отраженной ударной волной при $T=11209$ К и $p=0.37$ атм, измеренная методами штарковского уширения (1) и штарковского сдвига (2) [58]. Линия – результаты расчета.

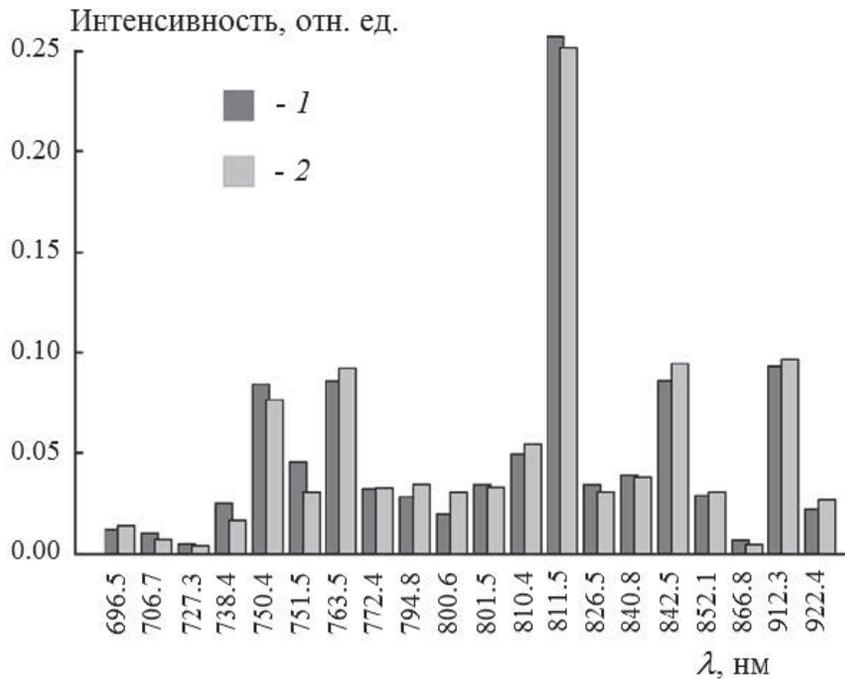


Рис. 6. Интенсивность эмиссионных спектральных линий аргона, измеренная в плазме магнетронного разряда при мощности разряда 1 кВт и давлении 0.06 Па (1) и вычисленная с помощью столкновительно-радиационной модели (2) [62].

определялась по штарковскому сдвигу линии атома кислорода на длине волны $\lambda = 926$ нм, а также по штарковскому уширению линии атома кислорода на длине волны $\lambda = 777$ нм. Связь между n_e и спектроскопическими параметрами

определялась с помощью известных соотношений [59]. Для зондирования атомов кислорода в возбужденном состоянии использовались два лазера с распределенной обратной связью, настроенные на соответствующие переходы. На рис. 5 показана

эволюция электронной концентрации за отраженной ударной волной при $T = 11\,209$ К и $p = 0.37$ атм, измеренная различными методами. Сплошной линией показаны результаты расчета с использованием упрощенной столкновительно-радиационной модели [60]. Видно, что оба спектроскопических метода дают примерно одинаковые результаты, хорошо согласующиеся с расчетными данными. Аналогичное исследование применительно к ударно-нагретому кислороду и смеси $\text{CO} + \text{Ar}$ проведено в недавней работе [61].

Для определения величины n_e в низкотемпературной плазме достаточно широко используется метод OES (Optical Emission Spectroscopy) [49, 51, 62–64]. В основе метода лежит процедура подгонки относительных интенсивностей эмиссионных линий, рассчитанных по столкновительно-радиационной модели при определенных значениях n_e , к экспериментальным данным. В частности, метод применен для исследования параметров плазмы магнетронного разряда на лабораторной установке UVN-200MI (Томский политехнический университет) [62]. В качестве тестового газа был выбран аргон. Наиболее яркие спектральные линии в зарегистрированном спектре эмиссии аргоновой плазмы соответствуют переходам $2p \rightarrow 1s$ и лежат в диапазоне $\lambda = 660\text{--}930$ нм, верхний предел которого определяется чувствительностью спектрометра. Сравнение экспериментальных и теоретических значений интенсивности спектральных линий после минимизации оценочной функции показано на рис. 6. Экспериментальные данные соответствуют спектру излучения аргона, измеренному при мощности разряда 1 кВт и давлении 0.06 Па. Минимуму оценочной функции соответствует значение концентрации электронов $n_e = 3.15 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Для измерения больших значений концентрации электронов в низкотемпературной плазме ($n_e \geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$) используются различные интерферометрические методы [65, 66]. В этих методах диагностика плазмы основывается на ее зондировании пучком электромагнитных волн и определении разности фаз между прошедшей через плазму волной и опорным когерентным сигналом. Измерение фазового сдвига проводится с помощью различного рода интерферометров [67]. Традиционно для интерферометрии плазмы ис-

пользуются интерферометры, построенные по схеме Майкельсона (Michelson) или Маха–Цендера (Mach–Zehnder) [68]. Интерферометрические методы достаточно широко используются как в исследованиях по физике плазмы [69–71], так и при изучении управляемого термоядерного синтеза [72, 73] как надежное средство измерения абсолютных значений электронной плотности.

Методы интерферометрического анализа структуры ударных волн и неравновесных явлений в ударных волнах не столь распространены, как зондовые и спектроскопические методы [74]. Исследование ионизационных процессов за сильной ударной волной в аргоне при числах Маха ударной волны $M \sim 16$, начальном давлении $p_0 = 5$ Торр и конечной концентрации электронов $n_e \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ проведено в работе [75]. Показано, что за фронтом падающей ударной волны развиваются синусоидальные неустойчивости, которые влияют на всю ударную структуру, включая область ионизационной релаксации, область каскадного нарастания электронной концентрации и конечное квазиравновесное состояние. Для экспериментов использовалась ударная труба UTIAS (University of Toronto's Institute of Aerospace Studies), работающая по принципу детонационного горения и оснащенная интерферометром Маха–Цендера для определения параметров низкотемпературной плазмы за падающей ударной волной. Интерферометр имел импульсный рубиновый лазерный источник света и был способен одновременно снимать две интерферограммы на длинах волн 347.2 и 694.3 нм. С помощью этих интерферограмм определялись концентрация электронов и плотность газа в потоке.

На рис. 7 показано сравнение измеренной зависимости концентрации электронов n_e от расстояния x до ударного фронта с имеющимися расчетными данными. Видно, что используемый интерферометрический метод хорошо работает при высоких концентрациях электронов в условиях достаточно протяженной неравновесной зоны. Теоретический расчет профиля концентрации $n_e = n_e(x)$ выполнен в работе [76] с использованием столкновительно-радиационной модели, которая включает в себя 31 возбужденный уровень нейтрального аргона, а также основные состояния однозарядного иона. Наблюдается достаточно хорошее согласие измеренных и вычисленных значений n_e .

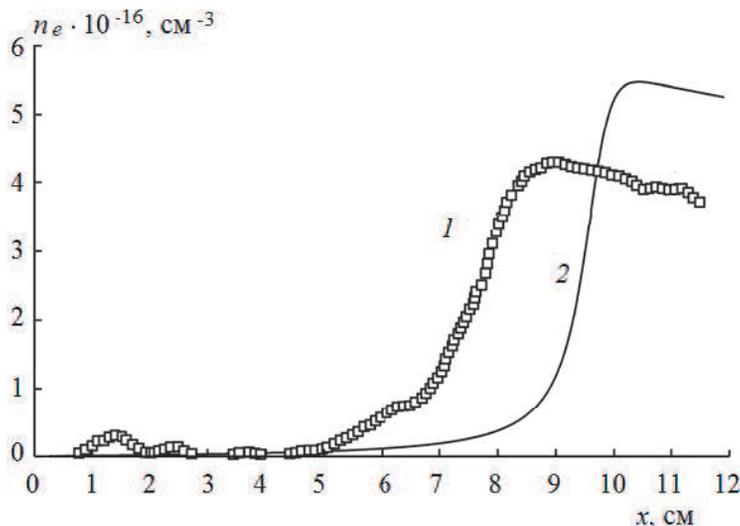


Рис. 7. Сравнение экспериментальной зависимости $n_e = n_e(x)$ за падающей ударной волной в Ag (1) при $p_0 = 5$ Торр и $V_{sw} = 4.2$ км/с [75] с результатами расчета (2) по столкновительно-радиационной модели [76].

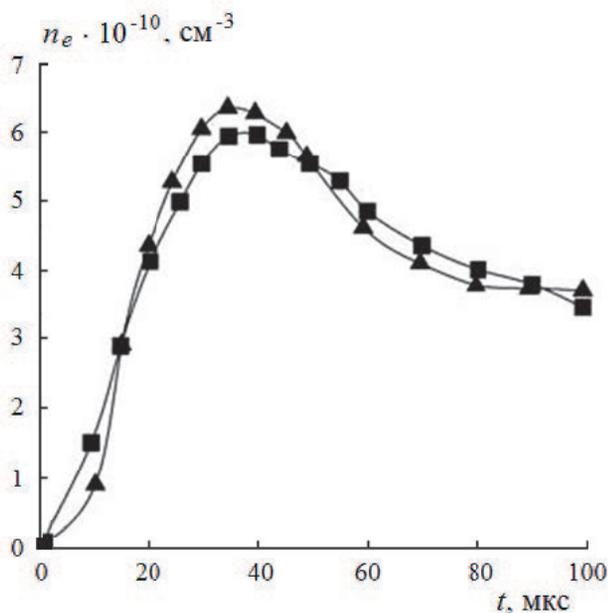


Рис. 8. Сравнение временных зависимостей n_e , измеренных СВЧ-интерферометром с линиями Лехера (треугольники) и рупорно-линзовой фокусировкой (квадраты) при воспламенении смеси 0.5% $\text{CH}_4 + 2\%$ $\text{O}_2 + 97.5\%$ Ag за отраженной ударной волной [77].

Результаты измерения концентрации свободных электронов при окислении смесей ацетилена и метана с кислородом, сильно разбавленных аргонном, за отраженной ударной волной получены в работе [77] методом микроволновой интерферометрии. Использовались два типа СВЧ-интерферометров различной конструкции, различающихся как длиной волны СВЧ-излучения, так

и системами ввода СВЧ-излучения в исследуемую плазму. В первом случае применялась рупорно-линзовая фокусировка ($\lambda = 8$ мм), во втором — фокусировка по линиям Лехера (Lecher) ($\lambda = 16$ мм).

На рис. 8 показано временное изменение концентрации электронов в продуктах сгорания смеси 0.5% $\text{CH}_4 + 2\%$ $\text{O}_2 + 97.5\%$ Ag за отраженной ударной волной при $T = 2750$ К и $p = 1$ атм. Видно, что профили концентрации электронов, измеренные двумя разными интерферометрами, практически идентичны друг другу. Аналогичные измерения концентрации электронов проведены в работе [78].

Интерферометрические методы используются также для измерения концентрации электронов в различных газоразрядных и лазерных устройствах. В частности, простой интерферометрический метод оценки n_e в плазме, образующейся в переходном искровом разряде в аргоне при атмосферном давлении, разработан в работе [79]. Метод основывается на зондировании плазмы пучком He–Ne-лазера с использованием интерферометра Майкельсона. Измеренная плотность электронов составила величину $\sim 10^{16}$ cm^{-3} при напряжении 7.0 кВ. Изучение профиля плотности лазерной плазмы проведено в работе [80] с использованием оптического интерферометра Маха–Цендера. В качестве источника зондирующего света применялся азотный УФ-лазер (длина волны — 337 нм, энергия ~ 150 мкДж, длительность импульса ~ 5 нс). Для генерации лазерной плазмы

использовалась металлическая мишень (Fe, Cu), на которую воздействовал мощный Nd-лазер (длина волны – 1.054 мкм, энергия импульса – до 20 Дж, длительность импульса – 15 нс).

ДРУГИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Экспериментальное исследование ионизационных процессов в ударных волнах проводится и с помощью ряда других методов. В частности, для локальных измерений концентрации низкотемпературной плазмы используется метод резонансных СВЧ-зондов [81–83]. По сравнению с зондами Ленгмюра, которые традиционно применяются при измерении электронной концентрации, результаты измерений с помощью СВЧ-зонда в линейном режиме определяются только плотностью плазмы и не зависят от электронной температуры. Метод успешно применен для определения электронной концентрации за сильной ударной волной в воздухе при начальном давлении $p_0 = 0.2$ Торр и значениях скорости ударной волны V_{SW} в интервале от 5 до 7 км/с [43]. Измерения проводились в электроразрядной ударной трубе ADST с помощью СВЧ-рефлектометра, работающего на частоте 39 ГГц. Результаты измерения величины n_e перед фронтом сильной ударной волны в воздухе при $p_0 = 0.2$ Торр и скоростях ударной волны до 11.3 км/с приведены в работе [84].

Одним из наиболее точных методов измерения электронной плотности в плазме является метод лазерного томсоновского рассеяния [85]. Метод требует использования мощного импульсного лазера и сложной системы регистрации. Поэтому он относится к диагностическим методам, используемым в фундаментальных научных исследованиях, но из-за своей сложности малоприменим для широкого применения. Метод используется при исследовании газоразрядной [86, 87] и лазерно-индуцированной плазмы [88, 89]. Описание теории томсоновского рассеяния применительно к диагностике низкотемпературной лазерно-индуцированной плазмы и обзор результатов экспериментальных исследований с использованием данного метода приведены в работе [90]. В экспериментах обычно используется импульсный лазер, частота повторения импульсов в котором составляет величину ~10 или 100 Гц [91]. Для измерения электронной концентрации перед сильной ударной волной ($V_{SW} \sim 12$ км/с) такой частоты повторения недостаточно [40].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие высокой степени ионизации воздуха вблизи спускаемого космического аппарата, движущегося в атмосфере Земли с орбитальной и суперорбитальной скоростью, приводит к возбуждению электронных уровней атомов и молекул электронным ударом, что инициирует переход поступательной энергии ударно-нагретого газа в радиационную энергию и, соответственно, определяет уровень радиационных тепловых потоков к поверхности аппарата.

Возникновение электронов перед ударной волной объясняется двумя конкурирующими механизмами: диффузией электронов из послеударной области и фотоионизацией молекул коротковолновым вакуумно-ультрафиолетовым излучением ударно-нагретого газа. Ионизационный процесс за ударной волной инициируется химическими реакциями ассоциативной ионизации. Данный процесс особенно важен в неравновесной зоне ударно-нагретого газа, так как именно он отвечает за формирование радиационных тепловых потоков.

Наиболее удобным инструментом для изучения неравновесных процессов, протекающих в низкотемпературной плазме вблизи поверхности спускаемого космического аппарата, являются ударные трубы. Измерение концентрации электронов проводится с использованием различных методов диагностики плазмы, основными из которых являются зондовые, спектроскопические и интерферометрические. Полученная экспериментальная информация имеет важное значение для тестирования моделей физической и химической кинетики возбуждения и дезактивации электронно-возбужденных состояний атомов и молекул, которые позволяют оценить радиационные тепловые потоки, направленные к поверхности аппарата.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А19-119012990112-4) при частичной финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 23-19-00096).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shang J.S., Surzhikov S.T.* // Prog. Aerospace Sci. 2012. V. 53. P. 46.
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.02.003>

2. Суржиков С.Т. // Хим. физика. 2010. Т. 29. № 7. С. 48.
3. Bykova N.G., Gochelashvily K.S., Karfidov D.M. et al. // Appl. Optics. 2017. V. 56. P. 2597. <https://doi.org/10.1364/AO.56.002597>
4. Luís D., Giangaspero V., Viladegut A. et al. // Acta Astronaut. 2023. V. 212. P. 408. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.028>
5. Uyanna O., Najafi H. // Acta Astronaut. 2020. V. 176. P. 341. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.047>
6. Experimental methods of shock wave research / Eds. Igra O., Seiler F. N.Y.: Springer, 2016.
7. Reynier P. // Prog. Aerospace Sci. 2016. V. 85. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.04.002>
8. Gu S., Olivier H. // Prog. Aerospace Sci. 2020. V. 113. № 100607. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100607>
9. Герасимов Г.Я., Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Левашов В.Ю. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 17.
10. Brandis A.M., Johnston C.O., Cruden B.A., Prabhu D., Bose D. // J. Thermophys. Heat Transf. 2015. V. 29. P. 209. <https://doi.org/10.2514/1.T4000>
11. McGilvray M., Doherty L.J., Morgan R.G., Gildfind D.E. // AIAA Paper. 2015. № 3543. <https://doi.org/10.2514/6.2015-3545>
12. Wei H., Morgan R.G., McIntyre T.J. // AIAA Paper. 2017. № 4531. <https://doi.org/10.2514/6.2017-4531>
13. Ibragimova L.B., Sergievskaya A.L., Levashov V.Yu., Shatalov O.P., Tunik Yu.V., Zabelinskii I.E. // J. Chem. Phys. 2013. V. 139. № 034317. <https://doi.org/10.1063/1.4813070>
14. Котов М.А., Козлов П.В., Герасимов Г.Я. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 31.
15. Tereza A.M., Kozlov P.V., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Zabelinsky I.E., Bykova N.G. // Acta Astronaut. 2023. V. 204. P. 705. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001>
16. Быкова Н.Г., Забелинский И.Е., Козлов П.В., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 10. С. 34.
17. Ступоченко Е.В., Лосев С. А., Осипов А.И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965.
18. Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. Л.: Наука, 1970.
19. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008.
20. Lemal A., Nomura S., Fujita K. // Hypersonic Meteoroid Entry Physics. Eds. Colonna G., Capitelli M., Laricchiuta A. Bristol: IOP Publ., 2019. P. 9.
21. Weymann H.D. // Phys. Fluids. 1969. V. 12. P. 1193. <https://doi.org/10.1063/1.1692651>
22. Kim M., Gülhan A., Boyd I.D. // J. Thermophys. Heat Transf. 2012. V. 26. P. 244. <https://doi.org/10.2514/1.T3716>
23. Котов М.А., Козлов П.В., Осипенко К.Ю., Герасимов Г.Я., Левашов В.Ю., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 10. С. 42.
24. Железняк М.Б., Мнацаканян А.Х., Сизых С.В. // Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20. № 3. С. 423.
25. Penney G.W., Hummert G.T. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 572. <https://doi.org/10.1063/1.1658715>
26. Naidis G.V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2006. V. 15. P. 253. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/15/2/010>
27. Jiang M., Li Y., Wang H., Zhong P., Liu C. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. № 012127. <https://doi.org/10.1063/1.5019478>
28. Gorelov V.A., Gladyshev M.K., Kireev A.Y., Yegorov I.V. // J. Thermophys. Heat Transf. 1998. V. 12. P. 172. <https://doi.org/10.2514/2.6342>
29. Дикалюк А.С., Суржиков С.Т. // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 1. С. 143.
30. Katsurayama H., Matsuda A., Abe T. // AIAA Paper. 2007. № 4552. <https://doi.org/10.2514/6.2007-4552>
31. Cherrington B.E. // Plasma Chem. Plasma Process. 1982. V. 2. P. 113. <https://doi.org/10.1007/BF00633129>
32. Алексеев Б.В., Котельников В.А. Зондовый метод диагностики плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1988.
33. Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996.
34. Bryant P.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2009. V. 18. № 014013. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/1/014013>
35. Еришов А.П. Метод электрических зондов Ленгмюра. М.: Изд-во МГУ, 2007.
36. Demidov V.I., Ratynskaia S.V., Rypdal K. // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. P. 3409. <https://doi.org/10.1063/1.1505099>
37. Merlino R.L. // Am. Ter. J. Phys. 2007. V. 75. P. 1078. <https://doi.org/10.1119/1.2772282>
38. Stanley S.A., Carlson L.A. // J. Spacecr. Rockets. 1992. V. 29. P. 190. <https://doi.org/10.2514/3.26334>
39. Johnson C.O., Mazaheri A., Gnotto P. et al. // AIAA Paper. 2011. № 3145. <https://doi.org/10.2514/6.2011-3145>
40. Nomura S., Kawakami T., Fujita K. // J. Thermophys. Heat Transf. 2021. V. 35. P. 518. <https://doi.org/10.2514/1.T6057>

41. Горелов В.А., Кильдюшова Л.А., Чернышев В.М. // Уч. записки ЦАГИ 1977. Т. 8. № 6. С. 49.
42. Fujita K., Sato S., Abe T., Matsuda A. // AIAA Paper. 2001. № 2765. <https://doi.org/10.2514/6.2001-2765>
43. Горелов В.А., Кильдюшова Л.А., Чернышев В.М. // Теплофизика высоких температур. 1983. Т. 21. № 3. С. 449.
44. Kirchhoff R.H., Peterson E.W., Talbot L. // AIAA Journal. 1971. V. 9. P. 1686. <https://doi.org/10.2514/3.49974>
45. Залогин Г.И., Лунев В.В., Пластинин Ю.А. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 1. С. 105.
46. Wang S., Cui J.P., Fan B.C., et al. // Shock waves / Ed. Jiang Z. Berlin: Springer, 2005. P. 269.
47. Ryan P.J., Bradley J.W., Bowden M. D. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 040702. <https://doi.org/10.1063/1.5094602>
48. Власов П.А., Михайлов Д.И., Панкратова И.Л., Полянский В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2020. № 6. С. 17.
49. Anbuselvan K.K.N., Anand V., Krishna Y., Rao M.G. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2021. V. 272. № 107744. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107744>
50. Konjević N., Ivković M., Sakan N. // Spectrochim. Acta, Part B. 2012. V. 76. P. 16. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.06.026>
51. Chai K.-B., Kwon D.-H. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2019. V. 227. P. 136. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.02.015>
52. Kozlov P.V., Zabelinsky I.E., Bykova N.G., Gerasimov G.Ya., Levashov V.Yu., Tunik Yu.V. // Acta Astronaut. 2022. V. 194. P. 461. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.10.032>
53. Gigosos M.A., Cardeñoso V. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1996. V. 29. P. 4795. <https://doi.org/10.1088/0953-4075/29/20/029>
54. Gigosos M.A., Gonzalez M.A., Cardeñoso V. // Spectrochim. Acta, Part B. 2003. V. 58. P. 1489. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(03)00097-1)
55. Fujita K., Sato S., Abe T., and Otsu H. // J. Thermophys. Heat Transf. 2003. V. 17. P. 210. <https://doi.org/10.2514/2.6753>
56. Yamada G. // AIAA J. 2022. V. 60. P. 5645. <https://doi.org/10.2514/1.J061470>
57. Cruden B.A. // J. Thermophys. Heat Transf. 2012. V. 26. P. 222. <https://doi.org/10.2514/1.T3796>
58. Li Y., Wang S., Strand C.L., Hanson R.K. // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. № 025007. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abdd12>
59. Грим Г. Уширение спектральных линий в плазме. М.: Мир, 1978.
60. Li Y., Wang S., Strand C.L., Hanson R.K. // J. Phys. Chem. A. 2020. V. 124. P. 3687. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.0c00466>
61. Minesi N.Q., Nair A.P., Richmond M.O., Kuenning N.M., Jelloian C.C., Spearrin R.M. // Appl. Opt. 2023. V. 62. P. 782. <https://doi.org/10.1364/AO.479155>
62. Evdokimov K.E., Konischev M.E., Pichugin V.F., Sun Z. // Resource-Efficient Technol. 2017. V. 3. P. 187. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2017.04.002>
63. Lin K., Nezu A., Akatsuka H. // Jpn. J. Appl. Phys. 2022. V. 61. № 116001. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac88ac>
64. Wang Y.-F., Zhu X.-M. // Spectrochim. Acta Part B. 2023. V. 208. № 106777. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2023.106777>
65. Хилд М., Уортон С. Микроволновая диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
66. Голант В.Е. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968.
67. Душин Л.А. СВЧ-интерферометры для измерения плотности плазмы в импульсном газовом разряде. М.: Атомиздат, 1973.
68. Seo S.-H. // Fusion Eng. Design. 2023. V. 190. № 113501. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113501>
69. Cappelli M.A., Gascon N., Hargus W.A., Jr. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 4582. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/21/013>
70. Dittmann K., Kullig C., Meichsner J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. V. 21. № 024001. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/2/024001>
71. Tudisco O., Fabris A.L., Falcetta C. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. № 033505. <https://doi.org/10.1063/1.4797470>
72. Seo S.-H., Park J., Wi H.M. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. № 084702. <https://doi.org/10.1063/1.4817305>
73. Сидоров А.В., Круткин О.Л., Алтухов А.Б. и др. // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 4. С. 553.
74. Власов П.А., Карасевич Ю.К., Панкратьева И.Л., Полянский В.А. // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. 2008. Т. 6. № 1.
75. Glass I.I., Liu W.S. // J. Fluid Mech. 1978. V. 84. P. 55. <https://doi.org/10.1017/S002211207800004X>
76. Kapper M.G., Cambier J.-L. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. № 113308. <https://doi.org/10.1063/1.3585688>
77. Agafonov G.L., Mikhailov D.I., Smirnov V.N. et al. // Combust. Sci. Technol. 2016. V. 188. P. 1815. <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1211861>
78. Toujani N., Alquaity A.B.S., Farooq A. // Rev. Sci. Instrum. 2019. V. 90. № 054706. <https://doi.org/10.1063/1.5086854>
79. Lim J.S., Hong Y.J., Ghimire B., Choi J., Mumtaz S., Choi E.H. // Results Phys. 2021. V. 20. № 103693. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103693>
80. Ananin O.B., Bashutin O.A., Bogdanov G.S. et al. // Phys. Procedia. 2015. V. 71. P. 142. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.335>

81. Янин Д.В., Костров А.В., Смирнов А.И., Стриков-ский А.В. // ЖТФ. 2008. Т. 78. № 1. С. 133.
82. Karkari S.K., Ellingboe A.R., and Gaman C. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. № 071501.
<https://doi.org/10.1063/1.2971236>
83. Galka A.G., Malyshev M.S., Kostrov A.V. // Radiophys. Quantum El. 2023. V. 65. P. 555.
<https://doi.org/10.1007/s11141-023-10236-0>
84. Горелов В.А., Куреев А.Ю. // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. 2014. Т. 15. № 1.
85. Palomares J.M., Hübner S., Carbone E.A.D. et al. // Spectrochim. Acta, Part B. 2012. V. 73. P. 39.
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.07.005>
86. Zaidi S.H., Tang Z., Yalin A.P., Barker P., Miles R.B. // AIAA J. 2002. V. 40. P. 1087.
<https://doi.org/10.2514/2.1756>
87. Muraoka K., Kono A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. № 043001.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/4/043001>
88. Fronda D.H., Ross J.S., Divol L., Glenzer S.H. // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. № 10E522.
<https://doi.org/10.1063/1.2336451>
89. Zhang H., Pilgram J.J., Constantin C.G. et al. // Instruments. 2023. V. 7. № 3. P. 25.
<https://doi.org/10.3390/instruments7030025>
90. Dzierżga K., Mendys A., Pokrzywka B. // Spectrochim. Acta, Part B. 2014. V. 98. P. 76.
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2014.03.010>
91. Roettgen A.M., Shkurenkov I., Lempert W.R., Adamovich I.V. // AIAA Paper. 2015. № 1829.
<https://doi.org/10.2514/6.2015-1829>

METHODS FOR MEASURING ELECTRON CONCENTRATION IN SHOCK WAVES

G. Ya. Gerasimov¹, V. Yu. Levashov^{1*}, P. V. Kozlov¹, N. G. Bykova¹, I. E. Zabelinsky¹

¹*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*E-mail: vyl69@mail.ru

The current state of research on measuring the electron concentration in low-temperature plasma in the vicinity of a strong shock wave, which simulates the conditions of the descend spacecraft entry into the Earth's atmosphere is considered. Various physicochemical processes leading to the formation of low-temperature plasma both ahead of the shock wave front and in the shock-heated gas are analyzed. A critical review of various plasma diagnostic methods is made, their advantages and disadvantages are noted. An analysis of numerous experimental data on measuring the electron concentration in various shock-heated gases under various conditions was carried out.

Keywords: shock wave, electron concentration, low-temperature plasma, diagnostic methods, air.

REFERENCES

- J.S. Shang and S.T. Surzhikov, *Prog. Aerospace Sci.* **53**, 46 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.02.003>
- S.T. Surzhikov, *Rus. J. Phys. Chem. B* **4**, 613 (2010).
- N.G. Bykova, K.S. Gochelashvily, D.M. Karfidov et al., *Appl. Optics.* **56**, 2597 (2017).
<https://doi.org/10.1364/AO.56.002597>
- D. Luís, V. Giangaspero, A. Viladegut, A. Lani, A. Camps, and O. Chazot, *Acta Astronaut.* **212**, 408 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.07.028>
- O. Uyanna and H. Najafi, *Acta Astronaut.* **176**, 341 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06.047>
- O. Igra and F. Seiler, *Experimental methods of shock wave research* (Springer, New York, 2016).
- P. Reyner, *Prog. Aerospace Sci.* **85**, 1 (2016).
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.04.002>
- S. Gu and H. Olivier, *Prog. Aerospace Sci.* **113**, 100607 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100607>
- G.Ya. Gerasimov, P.V. Kozlov, I.E. Zabelinsky, N.G. Bykova, and V.Yu. Levashov, *Rus. J. Phys. Chem. B* **16**, 642 (2022).
- A.M. Brandis, C.O. Johnston, B.A. Cruden, D. Prabhu, and D. Bose, *J. Thermophys. Heat Trans.* **29**, 209 (2015).
<https://doi.org/10.2514/1.T4000>
- M. McGilvray, L.J. Doherty, R.G. Morgan, and D.E. Gildfind, *AIAA Paper No. 2015-3543* (2015). DOI: 10.2514/6.2015-3543
- H. Wei, R.G. Morgan, and T.J. McIntyre, *AIAA Paper No. 2017-4531* (2017).
<https://doi.org/10.2514/6.2017-4531>
- L.B. Ibragimova, A.L. Sergievskaya, V.Yu. Levashov, O.P. Shatalov, Yu.V. Tunik, and I.E. Zabelinskii, *J. Chem. Phys.* **139**, 034317 (2013).
<https://doi.org/10.1063/1.4813070>
- M.A. Kotov, P.V. Kozlov, G.Ya. Gerasimov et al., *Rus. J. Phys. Chem. B* **16**, 655 (2022).
- A.M. Tereza, P.V. Kozlov, G.Ya. Gerasimov, V.Yu. Levashov, I.E. Zabelinsky, and N.G. Bykova, *Acta Astronaut.* **204**, 705 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001>
- N.G. Bykova, Zabelinsky I.E., P.V. Kozlov, G.Ya. Gerasimov, and V.Yu. Levashov, *Rus. J. Phys. Chem. B* **17**, 1152 (2023).
- Y.V. Stupochenko, S.A. Losev, and A.I. Osipov, *Relaxation in Shock Waves* (Springer, New York, 1967).
- W. Lochte-Holtgreven, *Plasma Diagnostics* (Wiley, New York, 1968).
- Y. B. Zel'dovich and Y. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena*, 3rd ed. (Dover Publ., New York, 2002).
- A. Lemal, S. Nomura, and K. Fujita K., *Hypersonic Meteoroid Entry Physics*. Ed. by G. Colonna, M. Capitelli, and A. Laricchiuta (IOP Publ., Bristol, 2019). P. 9–1.
- H.D. Weymann, *Phys. Fluids.* **12**, 1193 (1969).
<https://doi.org/10.1063/1.1692651>
- M. Kim, A. Gülhan, and I.D. Boyd, *J. Thermophys. Heat Transf.* **26**, 244 (2012).
<https://doi.org/10.2514/1.T3716>
- M.A. Kotov, P.V. Kozlov, K.Yu. Osipenko et al., *Rus. J. Phys. Chem. B* **17**, 1160 (2023).
- M.B. Zheleznyak, A.Kh. Mnatsakanyan, and S.V. Szykh, *High Temp.* **20**, 357 (1982).
- G.W. Penney and G.T. Hummert, *J. Appl. Phys.* **41**, 572 (1970).
<https://doi.org/10.1063/1.1658715>
- G.V. Naidis, *Plasma Sources Sci. Technol.* **15**, 253 (2006).
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/15/2/010>
- M. Jiang, Y. Li, H. Wang, P. Zhong, and C. Liu, *Phys. Plasmas.* **25**, 012127 (2018).
<https://doi.org/10.1063/1.5019478>
- V.A. Gorelov, M.K. Gladyshev, A.Y. Kireev, and I.V. Yegorov, *J. Thermophys. Heat Transf.* **12**, 172 (1998).
- A.S. Dikalyuk and S.T. Surzhikov, *Fluid Dynam.* **48**, 123 (2013).
<https://doi.org/10.2514/2.6342>

30. H. Katsurayama, A. Matsuda, and T. Abe, AIAA Paper № 2007-4552 (2007).
<https://doi.org/10.2514/6.2007-4552>
31. B.E. Cherrington, Plasma Chem. Plasma Process. **2**, 113 (1982).
<https://doi.org/10.1007/BF00633129>
32. B.V. Alekseev and V.A. Kotelnikov, *Probe method for plasma diagnostics* (Energoatomizdat, Moscow, 1988).
33. V.I. Demidov, N.B. Kolokolov N.B., and A.A. Kudryavtsev, *Probe methods for studying low-temperature plasma* (Energoatomizdat, Moscow, 1996).
34. P.M. Bryant, Plasma Sources Sci. Technol. **18**, 014013 (2009).
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/1/014013>
35. A.P. Ershov, *Langmuir electrical probe method* (MSU Press, Moscow, 2007).
36. V.I. Demidov, S.V. Ratynskaia, and K. Rypdal, Rev. Sci. Instrum. **73**, 3409 (2002).
<https://doi.org/10.1063/1.1505099>
37. R.L. Merlino, Am. J. Phys. **75**, 1078 (2007).
<https://doi.org/10.1119/1.2772282>
38. S.A. Stanley and L.A. Carlson, J. Spacecr. Rockets **29**, 190 (1992). <https://doi.org/10.2514/3.26334>
39. C.O. Johnson, A. Mazaheri, G. Gnotto et al., AIAA Paper № 2011-3145 (2011).
<https://doi.org/10.2514/6.2011-3145>
40. S. Nomura, T. Kawakami, and K. Fujita, J. Thermophys. Heat Transf. **35**, 518 (2021).
<https://doi.org/10.2514/1.T6057>
41. V.A. Gorelov, L.A. Kildiushova, and V.M. Chernyshov, TsAGI Sci. Notes **8** (6), 49 (1977).
42. K. Fujita, S. Sato, T. Abe, and A. Matsuda, AIAA Paper № 2001-2765 (2001).
<https://doi.org/10.2514/6.2001-2765>
43. V.A. Gorelov, L.A. Kildiushova, and V.M. Chernyshov, High Temp. **21**, 449 (1983).
44. R.H. Kirchhoff, E.W. Peterson, and L. Talbot, AIAA J. **9**, 1686 (1971).
<https://doi.org/10.2514/3.49974>
45. G.N. Zalogin, V.V. Lunev, and Y.A. Plastinin, Fluid Dyn. **15**, 85 (1980).
46. S. Wang, J.P. Cui, B.C. Fan, et al., *Shock waves*. Ed. by Z. Jiang (Springer, Berlin, 2005). P. 269.
47. P.J. Ryan, J.W. Bradley, and M. D. Bowden, Phys. Plasmas. **26**, 040702 (2019).
<https://doi.org/10.1063/1.5094602>
48. P.A. Vlasov, D.I. Mikhailov, I.L. Pankrat'eva, and V.A. Polyanskii, Fluid Dyn. **55**, 735 (2020).
49. K.K.N. Anbuselvan, V. Anand, Y. Krishna, and M.G. Rao, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **272**, 107744 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107744>
50. N. Konjević, M. Ivković, and N. Sakan, Spectrochim. Acta Part B. **76**, 16 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.06.026>
51. K.-B. Chai and D.-H. Kwon, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **227**, 135 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.02.015>
52. P.V. Kozlov, I.E. Zabelinsky, N.G. Bykova, G.Ya. Gerasimov, V.Yu. Levashov, Yu.V. Tunik, Acta Astronaut. **194**, 461 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.10.032>
53. M.A. Gigosos and V. Cardeñoso, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **29**, 4795 (1996).
<https://doi.org/10.1088/0953-4075/29/20/029>
54. M.A. Gigosos, M.A. Gonzalez, and V. Cardeñoso, Spectrochim. Acta Part B: Atom. Spectrosc. **58**, 1489 (2003).
[https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(03)00097-1)
55. K. Fujita, S. Sato, T. Abe, and H. Otsu, J. Thermophys. Heat Transf. **17**, 210 (2003).
<https://doi.org/10.2514/2.6753>
56. G. Yamada, AIAA J. **60**, 5645 (2022).
<https://doi.org/10.2514/1.J061470>
57. B.A. Cruden, J. Thermophys. Heat Transf. **26**, 222 (2012).
<https://doi.org/10.2514/1.T3796>
58. Y. Li, S. Wang, C.L. Strand, and R.K. Hanson, Plasma Sources Sci. Technol. **30**, 025007 (2021).
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/abdd12>
59. H. Griem, *Spectral line broadening by plasmas* (Academic Press: New York, 1974).
60. Y. Li, S. Wang, C.L. Strand, and R.K. Hanson, J. Phys. Chem. A. **124**, 3687 (2020).
<https://doi.org/10.1021/acs.jpca.0c00466>
61. N.Q. Minesi, A.P. Nair, M.O. Richmond, N.M. Kuenning, C.C. Jelloian, and R.M. Spearrin, Appl. Opt. **62**, 782 (2023).
<https://doi.org/10.1364/AO.479155>
62. K.E. Evdokimov, M.E. Konischev, V.F. Pichugin, and Z. Sun, Resource-Efficient Technol. **3**, 187 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.refit.2017.04.002>
63. K. Lin, A. Nezu, and H. Akatsuka, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 116001 (2022).
<https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac88ac>
64. Y.-F. Wang and X.-M. Zhu, Spectrochim. Acta Part B. **208**, 106777 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2023.106777>
65. M. A. Heald and C. B. Wharton, *Plasma diagnostics with microwaves* (Wiley: New York, 1965).
66. V.E. Golant, *Microwave methods for plasma research* (Nauka: Moscow, 1968).
67. L.A. Dushin, *Microwave interferometers for measuring plasma density in a pulsed gas discharge* (Atomizdat: Moscow, 1973).
68. S.-H. Seo, Fusion Eng. Design. **190**, 113501 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113501>
69. M.A. Cappelli, N. Gascon, and W.A. Hargus, Jr., J. Phys. D: Appl. Phys. **39**, 4582 (2006).
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/21/013>

70. K. Dittmann, C. Kullig, and J. Meichsner, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 024001 (2012).
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/2/024001>
71. O. Tudisco, A.L. Fabris, C. Falcetta, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 033505 (2013).
<https://doi.org/10.1063/1.4797470>
72. S.-H. Seo, J. Park, H.M. Wi, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **84**, 084702 (2013).
<https://doi.org/10.1063/1.4817305>
73. A.V. Sidorov, O.L. Krutkin, A.B. Altukhov, et al., *Tech. Phys.* **65**, 553 (2022).
74. P.A. Vlasov, Yu.K. Karasevich, I.L. Pankrat'eva, and V.A. Polyansky, *Phys.-Chem. Kinet. Gaz. Dynam.* **6** (1), 1 (2008).
75. I.I. Glass and W.S. Liu, *J. Fluid Mech.* **84**, 55 (1978).
<https://doi.org/10.1017/S002211207800004X>
76. M.G. Kapper and J.-L. Cambier, *J. Appl. Phys.* **109**, 113308 (2011).
<https://doi.org/10.1063/1.3585688>
77. G.L. Agafonov, D.I. Mikhailov, V.N. Smirnov, A.M. Tereza, P.A. Vlasov, and I.V. Zhiltsova, *Combust. Sci. Technol.* **188**, 1815 (2016). <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1211861>
78. N. Toujani, A.B.S. Alqaity, and A. Farooq, *Rev. Sci. Instrum.* **90**, 054706 (2019).
<https://doi.org/10.1063/1.5086854>
79. J.S. Lim, Y.J. Hong, B. Ghimire, J. Choi, S. Mumtaz, and E.H. Choi, *Results Phys.* **20**, 103693 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103693>
80. O.B. Ananin, O.A. Bashutin, G.S. Bogdanov, et al., *Phys. Procedia.* **71**, 142 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.08.335>
81. D.V. Yanin, A.V. Kostrov, A.I. Smirnov, A.V. Strikovskiy, *Tech. Phys.* **53**, 129 (2008).
82. S.K. Karkari, A.R. Ellingboe, C. Gaman, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 071501 (2008).
<https://doi.org/10.1063/1.2971236>
83. A.G. Galka, M.S. Malyshev, and A.V. Kostrov, *Radiophys. Quantum El.* **65**, 555 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s11141-023-10236-0>
84. V.A. Gorelov and A.Yu. Kireev, *Phys.-Chem. Kinet. Gaz. Dynam.* **15** (1), 1 (2014).
85. J.M. Palomares, S. Hübner, E.A.D. Carbone, et al., *Spectrochim. Acta Part B.* **73**, 39 (2012).
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.07.005>
86. S.H. Zaidi, Z. Tang, A.P. Yalin, P. Barker, and R.B. Miles, *AIAA J.* **40**, 1087 (2002).
<https://doi.org/10.2514/2.1756>
87. K. Muraoka and A. Kono, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 043001 (2011).
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/4/043001>
88. D.H. Fronda, J.S. Ross, L. Divol, and S.H. Glenzer, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 10E522 (2006).
<https://doi.org/10.1063/1.2336451>
89. H. Zhang, J.J. Pilgram, C.G. Constantin, et al., *Instruments.* **7**(3), 25 (2023).
<https://doi.org/10.3390/instruments7030025>
90. K. Dzierżga, A. Mendys, and B. Pokrzywka, *Spectrochim. Acta Part B.* **98**, 76 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.sab.2014.03.010>
91. A.M. Roettgen, I. Shkurenkov, W.R. Lempert, and I.V. Adamovich, *AIAA Paper № 2015-1829* (2015).
<https://doi.org/10.2514/6.2015-1829>