

УДК 533.6.011.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕД СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

© 2023 г. М. А. Котов^{1,2*}, П. В. Козлов², К. Ю. Осипенко¹, Г. Я. Герасимов², В. Ю. Левашов², Н. Г. Быкова², И. Е. Забелинский²

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

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

*E-mail: kotov@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 28.03.2023;

после доработки 17.04.2023;

принята в печать 20.04.2023

С помощью двухдиафрагменной ударной трубы DDST-M Института механики МГУ проведена серия зондовых измерений параметров низкотемпературной плазмы перед фронтом падающей ударной волны. В качестве рабочих газов использовали азот, кислород, воздух и аргон. Полученные результаты позволяют описать процессы фотоэффекта и фотоионизации частиц исследуемого газа за счет жесткого излучения от ударно-нагретой среды и оценить влияние этих процессов на изменение потенциала зонда. Зондовые измерения синхронизированы с регистрацией светового потока, которая осуществлялась с использованием лавинного фотодиода и 9-кадровой видеокамеры K011, расположенных в торце ударной трубы. Данные с камеры и пьезоэлектрические датчики регистрируют динамику открытия диафрагмы, а также процесс формирования ударной волны в исследуемом газе.

Ключевые слова: ударная волна, зондовая методика, фотоэффект, фотоионизация, азот, кислород, воздух, аргон.

DOI: 10.31857/S0207401X23100084, EDN: PFXYKU

ВВЕДЕНИЕ

Для корректного описания радиационных процессов за фронтом сильной ударной волны (УВ), образующейся перед головной частью спускаемого космического аппарата, необходима информация о концентрации и температуре электронного газа перед УВ. Присутствующие в газовой среде прекурсорные электроны могут существенно влиять на параметры среды за фронтом УВ [1]. В частности, ионизация атомов за счет их столкновений с электронами является доминирующим механизмом в значительной части ионизационного процесса [2]. Как показывают оценки, погрешность при вычислении радиационной составляющей теплового потока в зависимости от моделирования эффекта прекурсорных электронов может достигать 20% [3, 4].

Известно, что излучение из области длин волн, соответствующих вакуумному ультрафиолетовому (ВУФ) диапазону спектра, составляет значительную часть общего радиационного теплового потока к поверхности спускаемого аппарата [5]. При этом надежная экспериментальная информация и, как следствие, надежные расчетные модели формирования ВУФ-излучения отсутствуют. С другой стороны, как отмечается в работе [6],

экспериментальные данные по измерению концентрации и температуры электронов в воздухе перед фронтом УВ могут быть использованы для верификации модели формирования излучения УВ в диапазоне длин волн $\lambda = 85–105$ нм спектра при скорости ударной волны $V_{SW} = 4.5–9.5$ км/с. Таким образом, для построения корректных моделей излучения и ионизации газов за фронтом УВ необходимо уменьшить неопределенность в данных по концентрации и температуре электронов перед ударным фронтом.

Возникновение электронов перед УВ объясняется двумя конкурирующими процессами: фотоионизацией молекул [7, 8] и диффузией электронов из послееударной области [9, 10]. Вопрос о наличии электронов в исследуемом газе до прихода УВ начал активно обсуждаться в литературе начиная с 60-х годов прошлого столетия [11–13], и это обсуждение не прекращается до настоящего времени [3, 14]. Одной из основных методик регистрации концентрации электронов является зондовая методика [15]. Хорошо известно, что интерпретация зондовых измерений, выполненных в плазме, сама по себе может быть предметом отдельного изучения, поскольку “подходящая” теория существенным образом зависит от парамет-

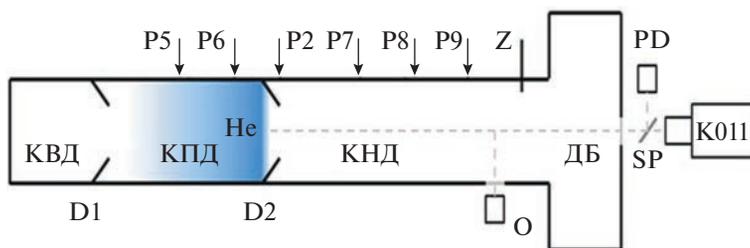


Рис. 1. Схема ударной установки DDST-M (описание см. в тексте).

ров плазмы, размеров и формы зонда [16]. В то же время регистрируемое зондами изменение потенциала не всегда позволяет выделить процесс, связанный с этим изменением. Таким образом, для получения детальной информации о временной эволюции параметров электронного газа (концентрации и температуре) необходимы подробные экспериментальные данные с выделением всех возможных процессов, влияющих на процесс образования электронов.

В настоящей работе зондовые измерения перед фронтом УВ синхронизированы с данными по измерению светового потока, а также с данными с пьезоэлектрических датчиков и оптической системы регистрации излучения. Подобная процедура позволяет выделить причины изменения потенциала зонда, связанные с процессами фотоэффекта и фотоионизации, а также дает возможность определить момент начала образования электронов перед фронтом УВ за счет излучения газа из высокотемпературной области за ударной волной.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились в двухдиафрагменной ударной установке DDST-M (Modified Double-Diaphragm Shock Tube) Института механики МГУ, принцип действия которой подробно описан в работе [17]. Схема измерительной системы установки применительно к исследованию ионизационных процессов перед сильной УВ приведена на рис. 1. Диафрагма D1 на схеме отделяет камеру высокого давления (КВД), заполненную гремучей смесью, от камеры промежуточного давления (КПД), которая заполнена гелием. Детонационное сжигание гремучей смеси в КВД приводит к раскрытию D1 и формированию первичной ударной волны в КПД, которая нагревает гелий и способствует раскрытию диафрагмы D2. Сформировавшаяся при этом вторичная УВ движется по камере низкого давления (КНД), которая заканчивается демпферным баком (ДБ).

В торцевой стенке демпферного бака по оси трубы находится кварцевое окно толщиной 15 мм и диаметром 20 мм, за которым через раздели-

тельную пластину SP помещен лавинный фотодиод PD с диапазоном спектральной чувствительности 200–1100 нм. Фотодиод используется для регистрации излучения в момент раскрытия диафрагмы D2. Для проведения скоростной съемки этапов раскрытия диафрагмы D2 применяется 9-кадровая камера K011. Одновременно с камерой регистрируется сигнал с пьезоэлектрического датчика P2, установленного в КНД в 25 мм от D2 вверх по потоку, по которому определяется момент начала и полного открытия диафрагмы D2. Датчики давления P5 и P6 располагаются за 200 и 100 мм до диафрагмы D2. Для регистрации параметров падающей ударной волны в КНД установлены датчики давления P7–P9, которые находятся соответственно на расстояниях 2500, 2600 и 3000 мм от D2.

В экспериментах всегда присутствовал изолированный электрический зонд Z для контактной регистрации параметров плазмы, который имел одноэлектродную конструкцию и находился на расстоянии 3100 мм от D2. В некоторых экспериментах проводили измерение излучения ударно-нагретого газа, проходящего мимо измерительного сечения трубы, расположенного за 50 мм до зонда Z. Излучение регистрировалось с помощью оптической системы O, которая собрана на базе спектрографа Horiba 1061 (USA), фиксирующего на фотоэлектронном умножителе R446 (Hamamatsu) осциллограммы излучения в специально выделенных с помощью монохроматора узких спектральных диапазонах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью ударной установки DDST-M была проведена серия измерений параметров низкотемпературной плазмы перед фронтом падающей УВ. Одновременно фиксировались световой поток и показания пьезоэлектрических датчиков, что позволяет описать динамику открытия диафрагмы D2, а также процесс формирования УВ в исследуемом газе. На рис. 2 приведен пример записи стадий открытия D2, сделанной с помощью высокоскоростной камеры K011. В рассматриваемом случае ударная волна движется в КНД, за-

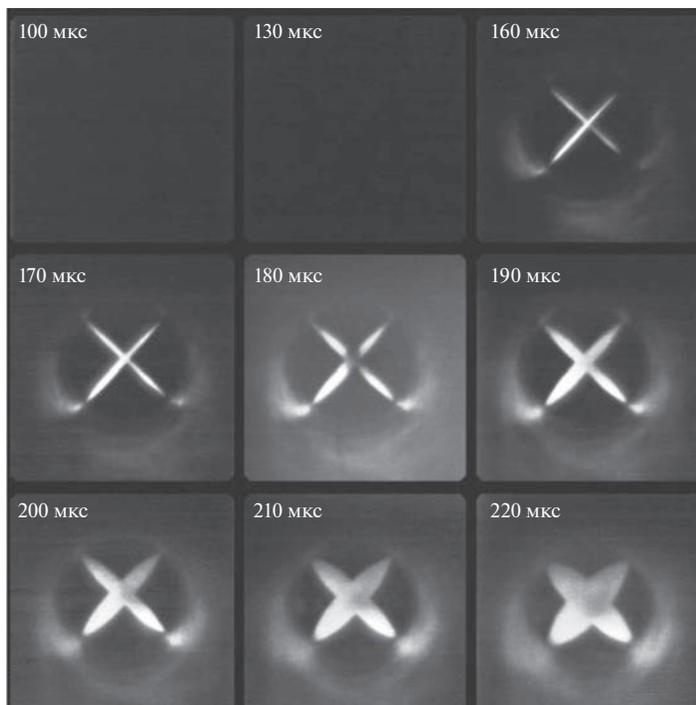


Рис. 2. Серия кадров, иллюстрирующая начало (160 мкс) и последующие стадии раскрытия диафрагмы D2. Выдержка кадра – 0.1 мкс.

полненной чистым азотом, со скоростью $V_{SW} = 7.8$ км/с при начальном давлении перед фронтом УВ $p_0 = 0.25$ Торр. Запуск камеры осуществлялся фотодиодом PD, который регистрировал излучение ударно-нагретого гелия в КПД.

Результаты видеосъемки, показанные на рис. 2 и позволяющие зарегистрировать момент начала и полного раскрытия диафрагмы D2, синхронизированы с записями показаний зонда Z, лавинного фотодиода PD и пьезоэлектрического датчика P2. Динамика открытия диафрагмы приведена на рис. 3. Видно, что до момента открытия D2 датчик P2 фиксирует только колебания стенки установки, которые вызваны УВ, пришедшей на диафрагму D2 со стороны КПД. С момента начала открытия D2 на записи показаний P2 во временном интервале $t = 160\text{--}260$ мкс меняется частота колебаний из-за истечения сверхзвукового потока через образовавшиеся в диафрагме щелевые отверстия. В момент полного раскрытия лепестки диафрагмы ударяются о внутреннюю стенку КНД и датчик P2 показывает резкое увеличение амплитуды колебаний.

Из рис. 3 видно, что в процессе раскрытия диафрагмы D2 наблюдается нарастание сигнала зонда Z. Причиной этого является эмиссия электронов с поверхности зонда (фотоэффект), поскольку интенсивность излучения ударно-нагретого гелия в этот момент достаточно значительна. В рассматриваемом случае скорость первичной УВ в гелии, кото-

рая определяется по показаниям датчиков давления P15 и P16, равна 6.3 км/с. Используя это значение скорости и начальные параметры эксперимента, приведенные выше, можно рассчитать давление и температуру гелия за УВ, отраженной от диафрагмы D2 [18], которые равны 27 атм и 8820 К соответственно. Кривые, снятые при помощи фотодиода PD и пьезоэлектрического датчика P2, также демонстрируют изменения (рис. 3), свидетельствующие о раскрытии диафрагмы (увеличение амплитуды колебаний P2) и излучении гелия (рост показаний PD после $t = 150$ мкс).

Зависимость показаний зонда Z от процессов, протекающих вблизи его поверхности, демонстрируется на рис. 4. В первую очередь – это фотоэффект, возникающий в результате излучения толкающего газа (гелия) сразу после открытия диафрагмы D2. Далее, после формирования вторичной УВ начинает сказываться фотоэффект от излучения ударно-нагретого газа. И наконец, перед самым приходом вторичной ударной волны к зонду он начинает фиксировать фотоионизацию газа перед фронтом ударной волны за счет излучения ударно-нагретого газа. В данном эксперименте вторичная УВ движется по камере низкого давления, заполненной чистым азотом, со скоростью $V_{SW} = 10.0$ км/с при начальном давлении перед фронтом УВ $p_0 = 0.25$ Торр. Скорость первичной УВ, которая распространялась по КПД, за-

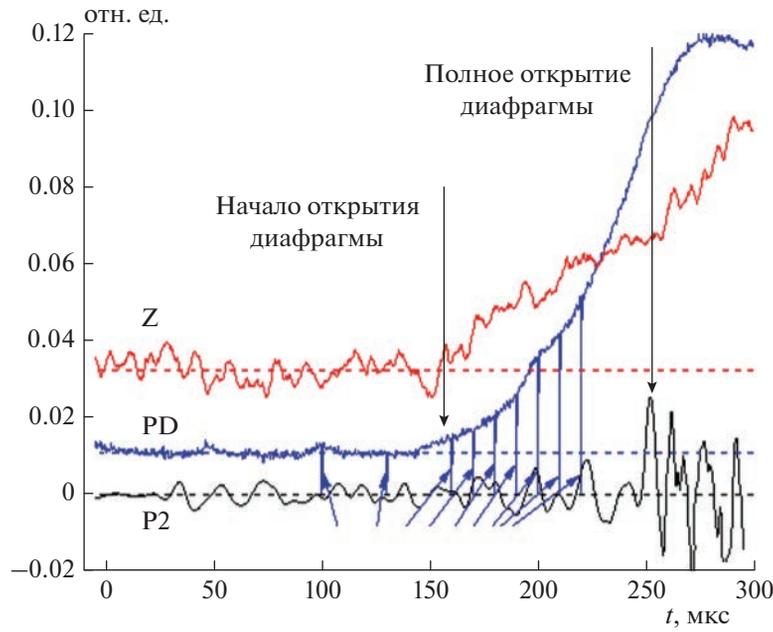


Рис. 3. Динамика открытия диафрагмы D2, зафиксированная зондом Z, лавинным фотодиодом PD и пьезоэлектрическим датчиком P2. Стрелками отмечены моменты кадров, показанных на рис. 2.

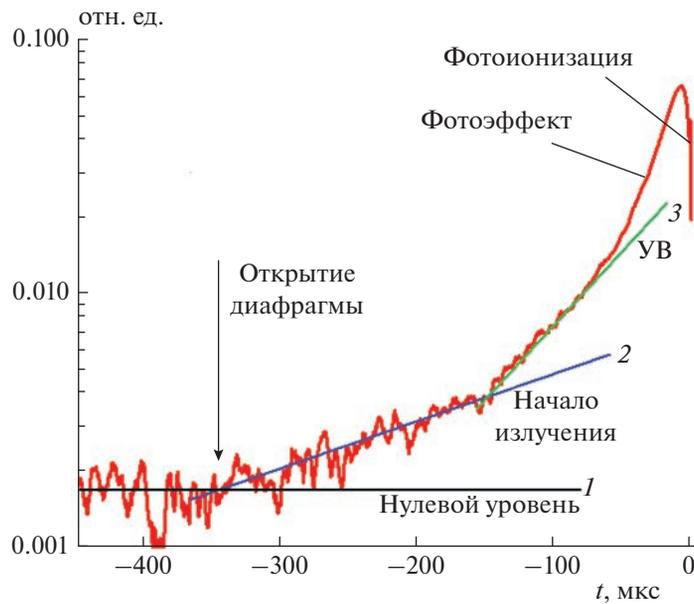


Рис. 4. Сигнал с зонда Z, показывающий явления фотоэффекта и фотоионизации при подходе к нему сформировавшейся вторичной ударной волны в азоте; $V_{SW} = 10.0$ км/с, $p_0 = 0.25$ Торр.

полненной гелием, и затем отразилась от диафрагмы D2, составляла 6.25 км/с.

Анализ рис. 4 показывает, что по сигналу с зонда Z и росту значения его потенциала можно вычислить момент открытия диафрагмы. Он определяется как пересечение нулевой (1) и наклонной (2) линий спектра излучающего гелия. Значения ра-

боты выхода электрона с поверхности нержавеющей стали, из которой изготовлен зонд, оцениваются в диапазоне от 3.5 эВ и выше [19–22], что эквивалентно энергии фотонов на длине волны $\lambda = 354$ нм и ниже. Спектр излучения атомарного гелия имеет несколько типичных полос в ВУФ-области [23]. С ростом температуры плазма также

дает дополнительный вклад в интенсивность излучения, как излучение континуума, определяемое по закону Планка. Таким образом, в условиях эксперимента ударно-нагретый гелий хорошо излучает в ВУФ-области, а излучение, приходящее через раскрывающуюся диафрагму, обладает достаточной мощностью для совершения работы выхода электронов с поверхности зонда и увеличения его потенциала. Об этом свидетельствует начало фотоэффекта, которое хорошо наблюдается по росту потенциала зонда Z в интервале времен t от -350 до -140 мкс перед приходом ударной волны к зонду Z .

На расстоянии нескольких калибров от диафрагмы D2 вниз по потоку начинает формироваться УВ, которая также начинает излучать и способствовать дополнительной эмиссии электронов с зонда. Линия 3 на рис. 4 демонстрирует крутой рост потенциала зонда вследствие фотоэффекта от излучения сформированной УВ. За ее фронтом находится наиболее нагретая область неравновесной плазмы. Излучение нагретой плазмы с энергией, превосходящей энергию ионизации частиц исследуемого газа, частично поглощается ближайшим к фронту УВ слоем газа, что приводит к его ионизации, а частично распространяется далее и ионизует области газа, все более отстоящие от фронта УВ. Электроны за счет теплового движения попадают на поверхность зонда, что приводит к уменьшению положительного потенциала зонда, а в дальнейшем — к переходу потенциала в область отрицательных величин. Это хорошо видно из рис. 5, который представляет собой более детальное изображение рис. 4 перед приходом УВ. Поскольку интенсивность проходящего излучения экспоненциально уменьшается с увеличением толщины слоя, наибольшая концентрация электронов находится вблизи фронта УВ.

Анализ рис. 5 показывает, что при скорости УВ в азоте $V_{SW} = 10$ км/с толщина плазменного слоя составляет порядка 5–10 см, что подтверждается результатами измерения концентрации электронов перед фронтом УВ [14]. Последующий рост потенциала и переход его в положительную область обусловлены прохождением УВ мимо зонда с последующей локализацией зонда в зоне ударно-нагретого газа, где степень ионизации последнего резко возрастает и основную роль при формировании потенциала зонда начинают играть положительно заряженные ионы [24]. На рис. 5 показаны также моменты прихода ударной волны к датчику давления P9 и к оптической системе O, которая в рассматриваемом случае регистрирует излучение на длине волны $\lambda = 381$ нм.

Для оценки влияния химического состава исследуемой газовой смеси на протекание ионизационных процессов и их взаимного влияния друг на друга были проведены эксперименты с различ-

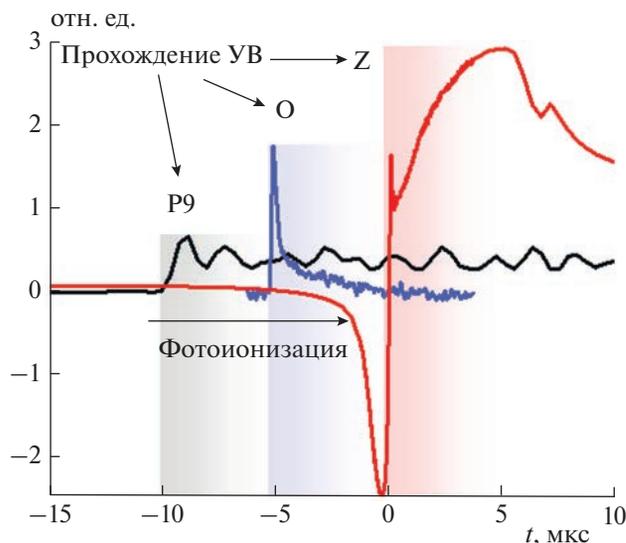


Рис. 5. Область вблизи ударного фронта с показаниями зонда Z , датчика давления P9 и оптической системы O на длине волны $\lambda = 381$ нм, которые демонстрируют прохождение ударной волны в азоте со скоростью $V_{SW} = 10$ км/с.

ными газовыми средами в КНД. На рис. 6 представлены результаты, полученные в воздухе комнатного состава и в синтетическом воздухе норматива ПНГ (поверочный нулевой газ) при одинаковых начальных экспериментальных условиях: скорость ударной волны в воздухе $V_{SW} = 10.7$ км/с, начальное давление в КНД $p_0 = 0.2$ Торр, температура гелия в момент раскрытия диафрагмы равна 12600 К при давлении 48 атм.

Как видно из рис. 6, в эксперименте с комнатным воздухом в показаниях зонда не наблюдается фотоэффект при открытии диафрагмы. По-видимому, это связано с поглощением излучения гелия углекислым газом и парами воды. Углекислый газ в комнатном воздухе имеет объемную долю около 0.03%. Относительная влажность воздуха в момент наполнения КНД составляла не менее 50%, что соответствует примерному содержанию воды в 8.8 г/м³ при комнатной температуре или объемной доле, составляющей 0.00088%. Учитывая, что начальное давление воздуха в КНД равно 0.2 Торр, в ее цилиндрическом объеме между сечением размещения зонда и диафрагмой D2, равном примерно 6084 см³, содержится более $1.3 \cdot 10^{-2}$ мм³ воды. В работах [25–28] приведены данные по поглощению ВУФ-излучения водяным паром, которое может быть достаточно значительным, особенно в области электронных переходов, соответствующих длинам волн излучения $\lambda = 106$ –198 нм. Это непосредственным образом влияет на поглощение излучения гелия за раскрывающейся диафрагмой, вследствие чего фотоэффект в экспериментах с воздухом комнатного состава не наблюдается. Следует

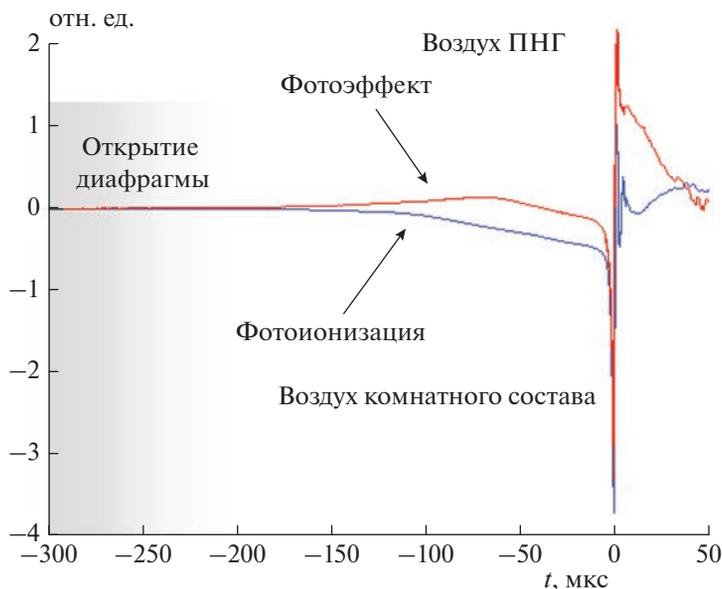


Рис. 6. Сигналы с зонда Z в экспериментах с воздухом различного состава.

отметить, что наиболее значительный вклад в поглощение при длинах волн ниже 200 нм вносит содержащийся в воздухе кислород [29–32].

В воздухе ПНГ, в отличие от комнатного воздуха, процессы фотоэффекта и фотоионизации конкурируют друг с другом, из-за чего спад в показаниях зонда Z начинается намного позже, как это видно из рис. 6. Нормативы по компонентному составу синтетического воздуха ПНГ, следующие: O_2 – 20%, CO_2 – менее 0.0005%, CH_4 – менее 0.0005% и CO – менее 0.0005%. Объемная доля водяного пара практически равна нулю. Отсутствие в синтетическом воздухе значительной доли поглотителей жесткого излучения гелия ведет к доминирующей роли фотоэффекта на начальном этапе формирования ударной волны в КНД. На завершающем этапе ведущую роль начинают играть ионизационные процессы за счет излучения ударно-нагретого газа, которые в итоге ведут к образованию плазменного слоя перед фронтом УВ.

На рис. 7 представлены типичные данные, полученные при прохождении ударной волны по КНД, заполненной кислородом. Скорость УВ в рассматриваемом случае равна $V_{SW} = 9$ км/с, начальное давление $p_0 = 0.25$ Торр, температура гелия в момент раскрытия диафрагмы составляла 7130 К при давлении 21 атм. В отличие от предыдущих экспериментов здесь не наблюдается эмиссии электронов с зонда Z при раскрытии диафрагмы D2. В начальный момент времени фотодиод PD также не фиксирует никакого излучения. По-видимому, это связано с тем, что нагретый гелий сначала излучает в коротковолновом ВУФ-диапазоне с длиной волны ниже 200 нм. Это

излучение поглощается кислородом в КНД на временном интервале t от -460 до -365 мкс. Далее гелий начинает остывать и максимум интенсивности смещается в область длин волн $\lambda > 200$ нм – в сторону видимого спектрального диапазона, и показания PD начинают резко расти, что наблюдается при временах процесса начиная от $t = -365$ мкс. Затем, спустя 230 мкс после начала раскрытия диафрагмы, в КНД формируется УВ, которая начинает излучать и способствовать фотоионизации кислорода. При этом показания зонда Z снижаются вследствие прихода электронов на зонд. Следует отметить, что при проведении экспериментов в других газах (в азоте, аргоне, воздухе особой частоты) в отличие от сред, в которых происходит поглощение коротковолнового ВУФ-излучения, эмиссия электронов с зонда Z будет проявляться, что позволяет достоверно определить момент начала раскрытия диафрагмы.

На рис. 8 представлены данные, полученные при заполнении КНД аргоном. Здесь скорость ударной волны $V_{SW} = 6.25$ км/с при $p_0 = 1$ Торр. Как и при распространении ударной волны в азоте (см. рис. 4), здесь также наблюдаются рост потенциала зонда Z при приближении к нему ударного фронта за счет фотоэффекта и излом перед лавинной фотоионизацией.

Интересным результатом является синхронность в поведении излучения аргона на длине волны $\lambda = 763$ нм (линия 1 на рис. 8) и потенциала зонда (линия 2). Излучение на этой длине волны соответствует переходу с возбужденного уровня $3s^23p^5(^2P_{3/2}^o)4p$ на уровень $3s^23p^5(^2P_{3/2}^o)4s$. Видно, что излучение на начальном этапе, т.е. сразу по-

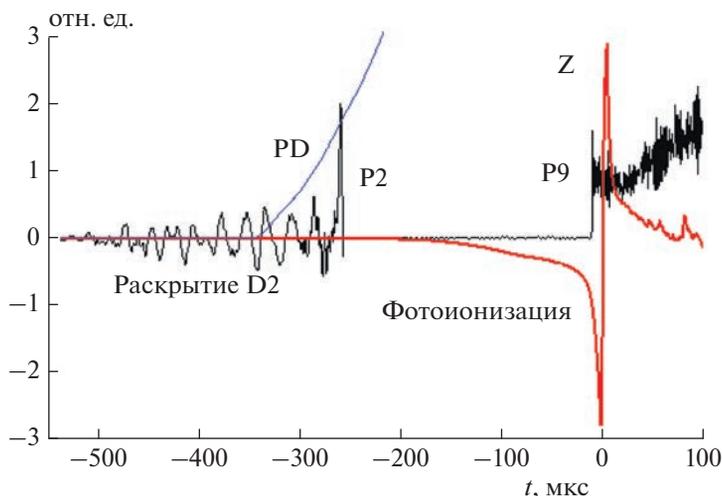


Рис. 7. Показания датчиков давления P2 и P9, лавинного фотодиода PD и зонда Z, демонстрирующие раскрытие диафрагмы D2 и прохождение ударной волны в кислороде со скоростью $V_{SW} = 9$ км/с.

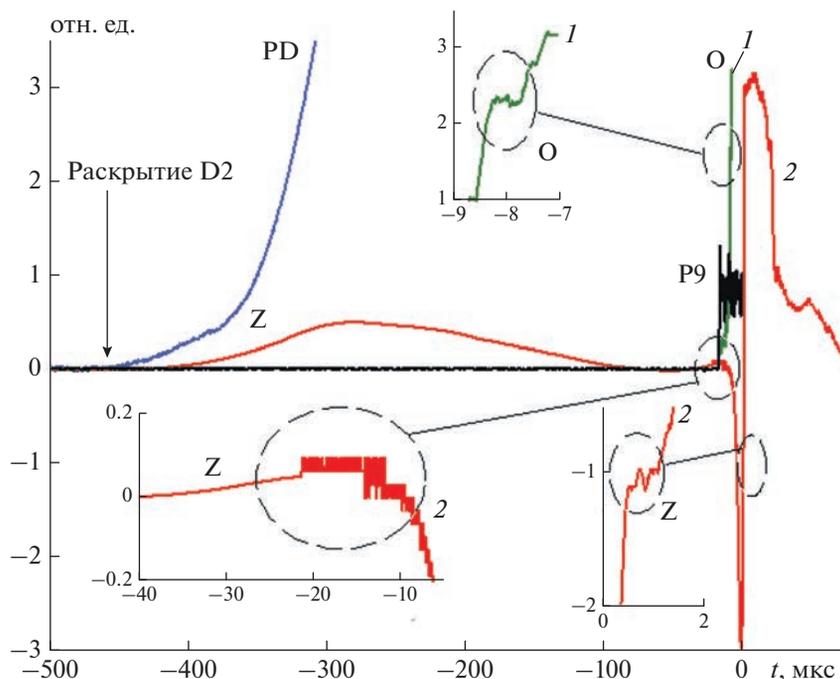


Рис. 8. Показания датчика давления P9, лавинного фотодиода PD, зонда Z и оптической системы O на длине волны $\lambda = 763$ нм, демонстрирующие раскрытие диафрагмы D2 и прохождение ударной волны в аргоне со скоростью $V_{SW} = 6.25$ км/с.

сле прихода фронта УВ в измерительное сечение, ведет себя следующим образом. Интенсивность излучения сначала незначительно возрастает, затем наблюдается плавный спад, а далее происходит резкое лавинообразное нарастание сигнала, что связано с образованием достаточного количества электронов. Потенциал зонда Z после прихода к нему фронта УВ ведет себя аналогичным образом.

Как показано в работе [33], именно присутствие электронов позволяет объяснить такой немонотонный характер поведения излучения. Характер изменения потенциала зонда Z позволяет сделать вывод, подтверждающий образование электронов. Действительно, из графиков для потенциала видно, что сразу после прихода ударной волны потенциал зонда начинает увеличиваться. Данный факт, очевидно, связан с “поступлени-

ем” на поверхность зонда положительных ионов в результате движения УВ. В то же время образующиеся в результате ударной ионизации свободные электроны начинают поступать на зонд в результате теплового движения, что приводит к изменению характера нарастания потенциала.

Следует отметить, что по данным измерения потенциала зонда Z при наличии соответствующей данных по току можно рассчитать концентрацию и температуру электронов в различные моменты времени перед приходом УВ к зоне локализации зонда [34–36]. Эта задача является предметом дальнейших исследований коллектива авторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что раскрытие диафрагмы между КПД и КНД, зафиксированное высокоскоростной видеокамерой, сопровождается жестким ВУФ-излучением гелия, ударно-нагретого в КПД. В отсутствие поглотителей этого излучения в исследуемом газе (молекулярный кислород, пары воды, углекислый газ) наблюдается эмиссия электронов с электрического зонда за счет фотоэффекта. Формирование и дальнейшее распространение ударной волны в КНД сопровождается быстрым нагревом исследуемого газа и ростом интенсивности его излучения в широком спектральном диапазоне. Это, в свою очередь, приводит к фотоионизации газа перед ударным фронтом. Этот процесс фиксируется резким падением потенциала зонда в область отрицательных величин, что объясняется приходом электронов на поверхность зонда из окружающего газа. В качестве исследуемых газов рассмотрены азот, кислород, воздух различной степени чистоты и аргон.

Работа выполнена в рамках госзаданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы № АААА-А19-119012990112-4 и № 123021700057-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kapper M.G., Cambier J.-L.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. № 113308.
2. *Суржиков С.Т.* // Хим. физика. 2010. Т. 29. № 7. С. 48.
3. *Notura S., Lemal A., Kawakami T., Fujita K.* // AIAA Paper. № 2018-0741.
4. *Johnston C.O., Mazaheri A., Gnoffo P. et al.* // AIAA Paper. № 2011-3145.
5. *Brandis A., Johnston C., Cruden B., Prabhu D., Bose D.* // J. Thermophys. Heat Transf. 2015. V. 29. P. 209.
6. *Горелов В.А., Куреев А.Ю.* // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. 2014. Т. 15. № 1. С. 1.
7. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008.
8. *Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. №. 6. С. 35.
9. *Weymann H.D.* // Phys. Fluids. 1969. V. 12. P. 1193.
10. *Kim M., Gülhan A., Boyd I.D.* // J. Thermophys. Heat Transf. 2012. V. 26. P. 244.
11. *Weymann H.D.* // Phys. Fluids. 1960. V. 3. P. 545.
12. *Holmes L.V., Weymann H.D.* // Phys. Fluids. 1969. V. 12. P. 1200.
13. *Горелов В.А., Кильдюшова Л.А., Чернышев В.М.* // Уч. записки ЦАГИ. 1977. Т. 8. № 6. С. 49.
14. *Notura S., Kawakami T., Fujita K.* // J. Thermophys. Heat Transf. 2021. V. 35. P. 518.
15. *Ступоченко Е.В., Лосев С.А., Осипов А.И.* Релаксационные процессы в ударных волнах. М.: Наука, 1965.
16. *Demidov V.I., Ratynskaia S.V., Rypdal K.* // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73. P. 3409.
17. *Забелинский И.Е., Козлов П.В., Акимов Ю.В. и др.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 11. С. 22.
18. *Campbell M.F., Parise T., Tulgestke A.M., Spearrin R.M., Davidson D.F., Hanson R.K.* // Shock Waves. 2015. V. 25 P. 651.
19. *Wilson R.* // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. P. 2261.
20. *Wilson R.* // J. Appl. Phys. 1966. V. 37. P. 3161.
21. *Prutton M.* Introduction to surface physics. Oxford: University Press, 1994.
22. *Рухляда Н.Я., Вишератин Р.К.* // Вопр. ат. науки и техники. Сер.: “Ядерно-реакторные константы”. 2014. № 2. С. 95.
23. *Lemmon E., Huber M.L., McLinden M.O.* NIST standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP. Ver. 8.0. Gaithersburg: NIST, 2007.
24. *Colonna G., Capitelli M., Laricchiuta A.* Hypersonic meteoroid entry physics. IOP Publishing, 2019.
25. *Watabene K., Zelikoff M.* // J. Opt. Soc. Amer. 1953. V. 43. P. 753.
26. *Thompson B.A., Harchek P., Reeves R.R., Jr.* // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. P. 6431.
27. *Макогон М.М.* // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 9. С. 764.
28. *Patterson E.M., Gillespie J.B.* // Appl. Optics. 1989. V. 28. P. 425.
29. *Generalov N.A., Losev S.A.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 1966. V. 6. P. 101.
30. *Душин В.К., Забелинский И.Е., Шаталов О.П.* // ЖПС. 1983. Т. 39. № 3. С. 440.
31. *Зуев А.П., Стариковский А.Ю.* // ЖПС. 1990. Т. 52. № 3. С. 455.
32. *Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Ибрагимова Л.Б., Кузнецова Л.А., Шаталов О.П.* // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. 2004. Т. 2. № 1. С. 1.
33. *Левашов В.Ю., Козлов П.В., Быкова Н.Г., Забелинский И.Е.* // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 1. С. 16.
34. *Fujita K., Matsuda A., Sato S., Abe T.* // Rarefied Gas Dynamics: 22nd Intern. Sympos. IOP Publ., 2001. P. 780.
35. *Fujita K., Sato S., Abe T., Matsuda A.* // AIAA Paper. № 2001-2765.
36. *Yamada G., Ago S., Kawazoe H., Obayashi S.* // J. Fluid Sci. Technol. 2014. V. 9. № 5. P. 70.