

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ  
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

*Л. И. Гречихин, Л. Я. Минько, Н. И. Нагорная*

(Минск)

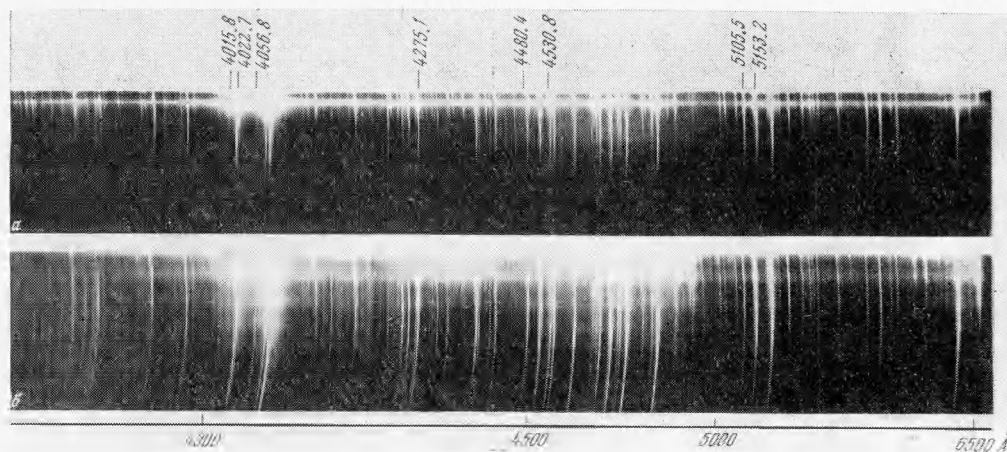
Проведена диагностика плазменной струи спектроскопическими методами. Измерен ход температуры и концентрации заряженных частиц вдоль струи в зависимости от полярности для струи с ударной волной и струи с периодической структурой. Дано объяснение наблюдаемым явлениям.

Физические процессы, протекающие в сверхзвуковой плазменной струе, весьма своеобразны [1]. Необходимо было провести спектроскопические исследования, так как они позволяют получить более детальную информацию о физическом состоянии плазмы. Представляет также интерес изучение волновых процессов, имеющих в струе, с точки зрения получения дополнительного нагрева плазмы.

**1. Анализ спектра испускания струи и выбор линий для диагностики.**

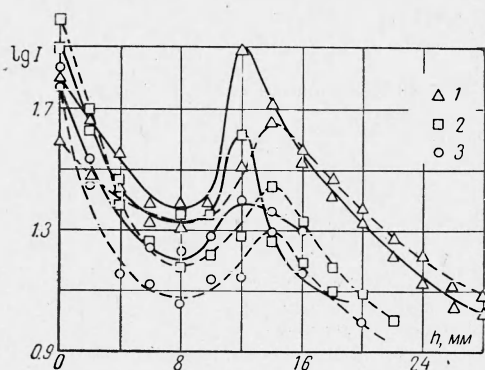
Спектр испускания плазменной струи в исследуемой области длин волн от 3800 до 5500 Å состоит в основном из линий элементов, принадлежащих материалу электродов (Cu I, Zn I, Cu II) (фиг. 1). Наряду с линиями наблюдаются молекулярные полосы циана (CN), особенно отчетливо выраженные в струе с периодической структурой. Одной из особенностей спектра является появление запрещенных линий меди 4015.8 и 4056.8 Å. Некоторые линии сильно уширены. Как правило, это линии с большими постоянными Штарка. Качественное изучение спектра испускания струи с ударной волной и с периодической структурой показывает, что по спектральному составу они не отличаются друг от друга.

В спектре струи с ударной волной наблюдается сплошной спектр у основания струи, интенсивность которого вдоль струи заметно умень-



Фиг. 1. Спектр испускания плазменной струи: *а* — струя с ударной волной, *б* — струя с периодической структурой

шается и вновь возрастает скачкообразно в ударной волне, а затем резко спадает (фиг. 1, а). Был измерен ход интенсивности спектральных линий с различными потенциалами возбуждения вдоль струи (фиг. 2). Величина интенсивности для линий с разными потенциалами возбуждения различна. В ударной волне интенсивность линий как нейтральных атомов, так и линий ионов резко возрастает. Для линий ионов в ударной волне достигается наибольшая интенсивность, в то время как для линий атомов



Фиг. 2. Распределение интенсивности линий меди вдоль струи с ударной волной: сплошные кривые соответствуют отрицательной полярности кольцевого электрода, штриховые — положительной полярности кольцевого электрода; точки соответствуют: 1—CuII 4231.4 Å, 2 — CuI 5153.2 Å, 3 — CuI 5105.5 Å

наибольшая интенсивность остается у основания струи. Изменение полярности кольцевого электрода оказывает влияние на ход и величину интенсивности спектральных линий (фиг. 2). При положительной полярности кольцевого электрода наблюдается более пологий спад интенсивности после ударной волны, несколько ниже интенсивность линий в ударной волне и в целом вдоль струи. У основания струи интенсивность линий атомов выше, а интенсивность линий ионов ниже по сравнению с отрицательной полярностью кольцевого электрода.

В спектре струи с периодической структурой имеет место чередование максимумов и минимумов

интенсивности сплошного спектра, а также интенсивности спектральных линий соответственно местам сжатия и разрежения с постепенным ослаблением к концу струи (фиг. 1, б). Наибольшая интенсивность как для линий нейтральных атомов, так и для линий ионов находится у основания струи. Заметных изменений в спектральном составе и ходе интенсивности сплошного излучения и спектральных линий в зависимости от полярности кольцевого электрода не наблюдается.

Из полученного спектра испускания необходимо было выбрать в диагностических целях линии, по которым можно было бы определить основные параметры плазмы (температуру, концентрацию заряженных частиц и т. д.). Для этих линий прежде всего должны быть известны основные постоянные, т. е. вероятности перехода, постоянные Штарка, Ван-дер-Ваальса и др. Выбранные нами линии и их основные постоянные приведены в таблице. Вероятности перехода взяты из работы [2]. Постоянные Штарка и Ван-дер-Ваальса рассчитаны с применением матричных элементов по Бейтсу и Дамгаард [3].

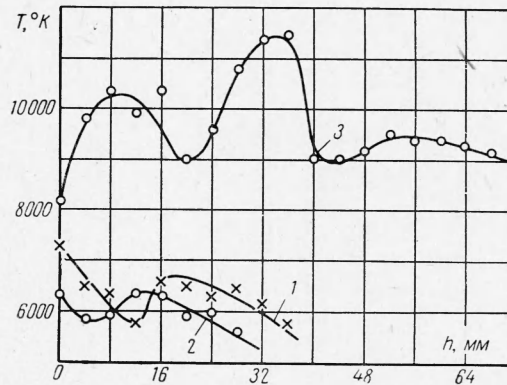
Длина волны, Å	Сериальный переход	Разность энергии, см <sup>-1</sup>	$gA$ , 10 <sup>6</sup> сек <sup>-1</sup>	$gf$	Постоянная Штарка, см <sup>2</sup> сек <sup>-1</sup>	Постоянная Ван-дер-Ваальса, см <sup>2</sup> сек <sup>-1</sup>
4022.7	$4^2P_{1/2} - 5D_{3/2}$	30535—55388	0.77	0.19	$1.64 \cdot 10^{-12}$	$3.86 \cdot 10^{-31}$
4275.1	$Z^4P_{5/2} - e^4D_{5/2}$	39019—62403	2.6	0.72		
4480.4	$4^2P_{1/2} - 6^2S_{1/2}$	30535—52849			$1.80 \cdot 10^{-13}$	$4.16 \cdot 10^{-31}$
4530.8	$4^2P_{3/2} - 6^2S_{1/2}$	30784—52849	0.65	0.20	$1.08 \cdot 10^{-13}$	$4.16 \cdot 10^{-31}$
5105.5	$m^2D_{3/2} - 4^2P_{3/2}$	11203—30784	0.051	0.020		
5153.2	$4^2P_{1/2} - 4^2D_{3/2}$	30535—49935	4.7	1.9		

**2. Определение температуры в плазменной струе.** Измерение температуры производилось по методу относительных интенсивностей с использованием двух пар линий меди: 5105.5, 5153.2 и 5105.5, 4530.8 Å. Самопоглощение для этих пар линий различное и приводит при измерении температуры к завышению или занижению ее. Другими словами, измеряя температуру по двум парам линий, получаем пределы, в которых находится измеряемая температура возбуждения. Взяв среднее, получаем результирующую температуру с учетом влияния самопоглощения в ошибку измерения. Измерение температуры по этим двум парам рассмотрено в работе [4].

Прежде чем измерять температуру, необходимо было проверить выполнимость Больцмановского распределения атомов по возбужденным уровням. Такая проверка проводилась по методу, предложенному Н. Н. Соболевым [5]. При этом использовались линии меди 5153.2, 5105.5, 4530.8, 4275.1, 4022.7 Å. Интервал энергии верхних уровней, охватываемый этими линиями, составляет  $32000 \text{ см}^{-1}$ . Проверка производилась на разных высотах струи. А именно, в струе с ударной волной — у основания, перед ударной волной и за волной; в струе с периодической структурой — у основания и в зонах разрежения и сжатия. Результаты измерений достаточно хорошо ложатся на прямую, что и доказывает выполнимость Больцмановского распределения атомов по возбужденным уровням.

Температура была измерена вдоль струи как для струи с ударной волной, так и для струи с периодической структурой для положительной и отрицательной полярности кольцевого электрода. Ход температуры вдоль струи приведен на фиг. 3. Ошибка определения результирующей температуры по двум парам указанных линий при этом составляет 25—30%. Эта ошибка выше ошибки, даваемой при определении температуры по относительной интенсивности каждой пары линий в отдельности (7—10%). Следует отметить, что, измеряя температуру по всей толще струи на определенном ее удалении от основания по той или иной паре линий, измеряем температуру тех участков (слоев) плазмы, в которых условия возбуждения этой пары наиболее благоприятны.

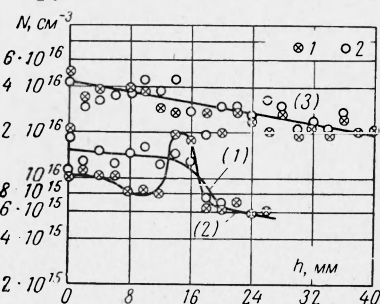
Из фиг. 3 видно, что ход температуры вдоль струи повторяет собой ход интенсивности линий (см. фиг. 2). В струе с ударной волной наблюдается возрастание температуры в зоне, соответствующей ударной волне. Полярность электродов оказывает заметное влияние на температуру струи. При отрицательной полярности кольцевого электрода температура в начале струи и в ударной волне примерно одинакова в пределах ошибки измерения. При положительной полярности кольцевого электрода температура в начале струи выше, чем в ударной волне. В целом она при отрицательной полярности кольцевого электрода несколько ниже по сравнению с положительной полярностью.



Фиг. 3. Ход температуры вдоль плазменной струи: × — положительная полярность кольцевого электрода, ⊙ — отрицательная полярность кольцевого электрода, 1, 2 — струя с ударной волной, 3 — струя с периодической структурой

В струе с периодической структурой в местах сжатия температура возрастает, а в местах разрежения — падает. Наблюдается максимум температуры в зоне, соответствующей второму сжатию. Заметных изменений в температуре при изменении полярности кольцевого электрода не наблюдается. Температура в целом для струи с периодической структурой выше, чем для струи с ударной волной, несмотря на то, что мощность разряда в первом случае меньше, чем во втором.

**3. Определение концентрации заряженных частиц.** В спектре струи обнаруживается ряд сильно уширенных линий меди. Это линии диффузной серии 4022.7, 4062 Å и линии резкой серии 4530.8, 4480.4 Å. Используя эти линии по их уширению, можно определить концентрацию заряженных частиц в плазме. С этой целью были взяты линии меди 4022.7 и 4480.4 Å. Произведенные оценки влияния различных типов взаимодействия на уширение выбранных линий (температура плазмы 10 000° К, концентрация заряженных частиц  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>) показывают, что уширение этих линий в наших условиях в основном обусловлено квадратичным эффектом Штарка. Другие типы взаимодействий составляют от уширения за счет квадратичного эффекта Штарка для линии 4022.7 Å — 3%, а для линии 4480.4 Å — 16%. Экспериментально для таких линий наблюдается асимметрия



Фиг. 4. Распределение концентрации вдоль плазменной струи: точки соответствуют: 1 — положительной полярности кольцевого электрода, 2 — отрицательной полярности кольцевого электрода; кривые: (1), (2) — струя с ударной волной; (3) — струя с периодической структурой

уширения в длинноволновую область спектра. Это связано с существенным влиянием статистического квадратичного эффекта Штарка. Учитывая все это, можно использовать указанные линии меди с известными постоянными Штарка для измерения концентрации заряженных частиц. С этой целью был произведен расчет зависимости ширины линий от концентрации заряженных частиц. В расчетах предполагалось, что плазма квазинейтральна, температура электронов 10 000° К и общая полуширина аддитивно складывается из полуширин, обусловленных ударным взаимодействием электронов и статистическим воздействием ионов. Подробно методика измерения концентрации заряженных частиц по спектру испускания меди изложена в работе [6].

В плазменной струе с ударной волной концентрация измерялась по линии 4022.7 Å, а в плазменной струе с периодической структурой — по линии 4480.4 Å. В случае струи с периодической структурой линия 4022.7 Å находится в области перехода от квадратичного к линейному эффекту Штарка. На это указывает наличие запрещенной линии 4015.8 Å вблизи линии 4022.7 Å. Поэтому использовать линию 4022.7 Å для измерения концентрации заряженных частиц в плазменной струе с периодической структурой нельзя. Результаты измерения концентрации заряженных частиц вдоль струи приведены на фиг. 4. Ошибка определяется в основном неточностью измерения ширины линии и равна ~ 30%. На фиг. 4 видно, что в струе с ударной волной в случае положительной полярности кольцевого электрода ход концентрации вдоль струи повторяет собой ход температуры и интенсивности линий. В случае же отрицательной полярности концентрация вдоль струи от ее основания до зоны, соответствующей ударной волне, почти не изменяется, а затем падает, как и в случае положительной полярности.

В струе с периодической структурой концентрация вдоль струи постепенно падает. Наблюдается незначительное возрастание и падение концентрации соответственно местам сжатия и разрежения, которые находятя в пределах ошибки измерения. В зависимости от изменения полярности кольцевого электрода заметных изменений в концентрации заряженных частиц не наблюдается. Концентрация в целом для струи с периодической структурой несколько выше, чем для струи с ударной волной.

**4. Обсуждение результатов.** Проведенные оптические [1] и спектроскопические исследования позволили выяснить ряд физических особенностей, имеющих место в сверхзвуковой плазменной струе. В работе [1] было указано, что структура плазменной струи в случае отрицательной полярности кольцевого электрода более сложна, чем при положительной полярности. Это связано с поверхностным выбросом вещества из кольцевого электрода. Есть основание полагать, что плазменная струя в наших условиях обладает собственными токами [7], и поверхностный выброс обусловлен, вероятно, разрядом между токонесущей струей и кольцевым электродом. Известно, что процессы на электродах в обычном импульсном разряде различны для катода и анода [8]. Для катода характерен более бурный характер испарения, связанный со своеобразным распределением тока на электроде. Видимо, в нашем случае при отрицательной полярности кольцевого электрода по тем же причинам происходит более интенсивный поверхностный разряд, обуславливающий появление боковых плазменных сгустков.

Становится понятным уменьшение скорости истечения плазменной струи в случае отрицательной полярности кольцевого электрода (см. табл. 1, [1]). Вследствие поверхностного разрушения кольцевого электрода плазменная струя в этом случае содержит большее количество частиц. Увеличение содержания частиц в струе приводит к уменьшению скорости истечения и, следовательно, — к приближению скачка уплотнения к поверхности среза кольцевого электрода [9]. Измеренные температуры обнаруживают своеобразный ход вдоль струи, соотносясь с характером волновых процессов, протекающих в струе. В ударной волне и в местах сжатия она возрастает, а в местах разрежения — падает. Таким образом, волновые процессы, протекающие в сверхзвуковой струе, приводят к дополнительному увеличению температуры и плотности плазмы. Такой ход температуры в плазменной струе импульсного колебательного разряда наблюдался ранее в работе [10]. Проведенные спектральные исследования плазменной струи однополярного импульсного генератора, не требующие временного разрешения, позволили проследить изменение температуры непрерывно вдоль струи, а также выяснить влияние полярности.

Различия в поведении интенсивности спектральных линий и температуры в зависимости от полярности связаны с упомянутыми особенностями разряда при отрицательной полярности кольцевого электрода. В этом случае температура в начале струи измеряется в основном в выбрасываемых с поверхности сгустках плазмы, которые экранируют ядро струи. При положительной полярности поверхностные сгустки почти отсутствуют и температура измеряется в более глубоких зонах. То, что при отрицательной полярности температура в целом несколько ниже, связано с большим влиянием самопоглощения вследствие наличия поверхностных выбросов вещества из катода. Так как ударная волна в случае положительной полярности более сильная, чем в случае отрицательной полярности (видно из отношения скоростей, см. табл. 1, [1]), то и температура в ней несколько выше.



Значительное увеличение температуры струи с периодической структурой по сравнению со струей с ударной волной, несмотря на меньшую мощность разряда, связано с тем, что подводимая в разряд электрическая энергия отводится в основном путем лучистого теплообмена. При понижении мощности разряда происходит резкое уменьшение излучательной способности газа и повышается температура плазмы.

*Замечание.* Такое объяснение дают И. В. Подмошенский и Н. Н. Огурцова аналогичному явлению, наблюдаемому в источнике ЭВ-39 (частное сообщение).

Различие в ходе концентрации заряженных частиц в струе с ударной волной в зависимости от полярности обусловлено наличием поверхностных плазменных сгустков из кольцевого электрода, которые создают вокруг основной струи дополнительный слой паров вещества более низкой температуры. При отрицательной полярности выброс вещества с поверхности кольцевого электрода весьма интенсивен, и поэтому измеренные концентрации заряженных частиц соответствуют в основном поверхностным плазменным сгусткам. При положительной полярности кольцевого электрода поверхностный выброс менее интенсивен и ход концентрации заряженных частиц лучше соотносится с волновыми процессами, протекающими в струе.

Концентрация заряженных частиц в струе с периодической структурой выше, чем в струе с ударной волной. Это связано с большим значением температуры и давления в струе.

Температура, полученная в [1] по скорости истечения, значительно ниже температуры, измеренной спектроскопически. Проводить сравнение этих температур нельзя, так как спектроскопические измерения в нашем случае дают температуру возбуждения линий меди, обусловленную разрядом, а по скорости истечения получаем температуру газа, истекающего из сопла, без учета состава образующейся плазмы.

Пользуемся случаем искренне поблагодарить М. А. Ельяшевича за обсуждение результатов работы.

Поступила 26 IV 1965

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я. Изучение структуры сверхзвуковой плазменной струи и механизма ее образования. ПМТФ, 1965, № 3.
2. C o r l i s s С. Н., V o z m a n W. R. Experimental Transition Probabilities for Spectral Lines of Seventy Elements. Nat. Bur. Standards. Monograph., 1962.
3. V o t e s D. R., D a m g a r d A. The Calculation of the Absolute Strengths of Spectral Lines. Philos. Trans. A, 1949, vol. 242, No. 842.
4. Б а к а н о в и ч Г. И., Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я. Возбуждение спектров испускания с помощью оптического квантового генератора. Докл. на XVI Всесоюзн. совещании по прикл. спектроскопии, М., 1965.
5. С о б о л е в Н. Н. Исследование возбуждения спектра атомов в конденсированной искре. 1943, т. 13, вып. 5.
6. Б а к а н о в и ч Г. И., Г р е ч и х и н Л. И. Использование спектра испускания атома меди для диагностики плазмы. ТВТ, 1965, № 4.
7. С к в о р ц о в Ю. В., К о м е л ь к о в В. С., Ц е р е в и т и н о в С. С. Структура магнитных полей в плазменной струе с собственными токами. Ж. техн. физ., 1964, т. 34, № 6.
8. М а н д е л ь ш т а м м С. А. и др. О процессах на электродах искрового разряда. Материалы X Всесоюзн. совещания по спектроскопии, 1958, т. 2, стр. 148.
9. Л ь ю и с К. и К а р л с о н Д. Положение центрального скачка уплотнения в недорасширенной газовой струе и в струе газа с твердыми частицами. Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 4, стр. 239.
10. Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я. Применение высокоскоростной спектральной киносъемки для исследования быстропротекающих самосветящихся процессов. Ж. научн. и прикл. фотогр. и кинематогр., 1964, т. 9, № 2.