

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХЗВУКОВОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ И МЕХАНИЗМА ЕЕ ОБРАЗОВАНИЯ

Л. И. Гречихин, Л. Я. Минько

(Минск)

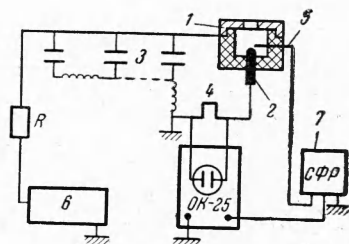
Известно, что на участке струи плазмы, прилегающем к соплу, возникает система волн расширения и сжатия, скачков уплотнения, вследствие которых происходит постепенное уравнивание давления в струе с давлением, существующим в окружающей среде. Работы [1-4] посвящены изучению плазменных струй, образующихся при импульсном разряде, носящем колебательный характер. Из-за колебательного характера разряда эти струи изменяют структуру во времени.

В настоящей работе за объект исследования взята сверхзвуковая плазменная струя однополярного импульсного генератора, истекающая в воздух при атмосферном давлении. Такого рода струя характеризуется процессами, почти не изменяющимися во времени. Это позволило проводить спектроскопические исследования без временного разрешения. Изучать физические свойства струи в зависимости от полярности.

1. Описание однополярного импульсного генератора плазмы и техника эксперимента. Плазменная струя получалась при разряде прямоугольной линии между кольцевым электродом 1 (фиг. 1) и стержневым 2, расположенным по оси отверстия кольцевого электрода. Электроды были изготовлены из латуни. Электрическая цепь разряда состояла из прямоугольной линии 3, измерительного безындукционного сопротивления 4 и соединительных шин. Прямоугольная линия была собрана на конденсаторах типа ИМ-3-100 и состояла из шести ячеек. Она позволяла формировать однополярный импульс тока (фиг. 2), регистрируемый осциллографом ОК-25, запускаемым от пульта управления СФР при частоте $n = 50$ кГц. Разряд производился при подаче высоковольтного импульса от пульта управления СФР на поджигающий электрод 5. Напряжение строго контролировалось киловольтметром.

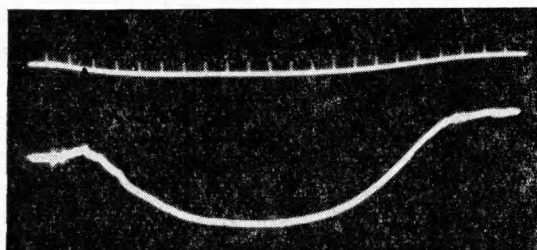
Исследование плазменной струи проводилось одновременно методом скоростной фотографии (покадровая и фоторегистрация) и спектроскопически. Скоростная съемка осуществлялась приборами СФР-Л и ЖФР-1. В случае непрерывной фотосъемки щель фоторегистратора располагалась параллельно оси струи, что позволяло фотографировать струю непрерывно в направлении, перпендикулярном ее движению. Покадровая съемка производилась киносъемочной камерой СФР-Л с частотой съемки до 125 тыс. кадр / сек. Спектр испускания плазменной струи регистрировался спектрографом ИСП-51 с камерой $F = 270$ мм. Струя фокусировалась на щель спектрографа конденсором $F = 90$ мм по ее длине с 10-кратным уменьшением. Спектр по сечению струи при разном удалении от кольцевого электрода фотографировался спектральной приставкой СП-78, соединенной с камерой $F = 270$ мм от ИСП-51. Интенсивность излучения плазменной струи за одну вспышку была достаточна для получения нормальных почернений на пластинках «панхром» 45 ед. ГОСТа. В некоторых случаях она даже ослаблялась двукратным нейтральным фильтром. Обработка спектрограмм производилась на микрофотометре МФ-2, в котором фотоэлемент был заменен на фотоумножитель. При фотометрировании линий необходимо было учитывать сплошной фон. Величина фона измерялась с фиолетовой стороны линии, так как все линии спектра асимметрично уширены в красную область спектра, поэтому измерять фон в этой области линии нецелесообразно. В тех случаях, когда используемые линии были широки, строился контур линии в интенсивностях, который затем графически интегрировался, и только тогда эти интегральные интенсивности брались для расчетов.

2. Механизм образования сверхзвуковой плазменной струи. При импульсном разряде с указанной выше конфигурацией электродов происходит сильное сжатие плазмы магнитным полем, созданным током разряда. Энергия электродинамических сил переходит в кинетическую энергию движения плазмы. Помимо этого, вклад в ускорение плазмы вносит ускорение за счет чистого теплового расширения плазмы, нагретой разрядным током. Этот вклад изменяется в зависимости от ограничения объема, в котором происходит разряд. Был проведен следующий опыт. При одних и тех же параметрах разряда при соблюдении одинакового расположения электродов производился разряд в ограниченном объеме, как на фиг. 1 и в открытом объеме, т. е. разряд происходил между плоским электродом с отверстием и стержневым электродом. В последнем случае получалась плазменная струя, которая не обладала сложной волновой структурой. Скорость ее истечения была значительно ниже. Таким образом, вклад в ускорение струи от омического нагрева плазмы в ограниченном объеме довольно значительный.



Фиг. 1

Итак, при импульсном разряде в ограниченном объеме в силу указанных причин происходит сильное возрастание давления в «разрядном» объеме по сравнению с давлением в окружающей среде. В результате имеем случай истечения плазменной струи из сопла с избыточным давлением, который в гидродинамике иногда еще называют истечением с неполным расширением [5].



Фиг. 2

Истекающая плазменная струя является сверхзвуковой вследствие расширения по выходе из сопла. По аналогии с описанным в [5], если разность давлений в струе (p) и окружающей среде (p_1) мала, то при истечении плазменной струи из сопла на его выходной кромке образуется пучок волн разрежения. Эти волны взаимно пересекаются и отражаются от противоположных границ струи в виде волн сжатия (фиг. 3, а — для $U = 2.25$ кэ; $C = 600$ мкф; $r = 5$ мм). Волны сжатия, в свою очередь, также пересекаются одна с другой и отражаются от противоположных границ струи в виде волн разрежения и т. д. Струя имеет почти периодическую структуру, т. е. состоит из чередующихся участков расширения и сжатия (капельвидная конфигурация). Длина волны L этой почти периодической структуры, как экспериментально установлено Эмденом [6] для осесимметричной сверхзвуковой струи, распространяющейся в неподвижной окружающей среде, определяется формулой

$$L = 0.89 d \sqrt{(p_2 - 1.9 p_1) / p_1} \quad (2.1)$$

Здесь d — диаметр сопла, p_2 — давление в ресивере («разрядном» объеме) и p_1 — давление в окружающей среде.

Так как давление в окружающей среде в наших экспериментах остается неизменным и равным 1 атм, то, получив L из эксперимента, можно определить p_2 .

С другой стороны, значение длины волны L выражается через число Маха следующим образом [5]:

$$L = 2.613 r \sqrt{M^2 - 1} \quad (2.2)$$

Здесь r — радиус отверстия кольцевого электрода, M — число Маха. Зная длину L и скорость истечения струи, можно определить газокинетическую температуру струи из выражения

$$M = v / v_1$$

Здесь v — скорость истечения струи, v_1 — скорость звука при данной температуре.

Если же разность давлений в струе и окружающей среде велика, то в струе может возникнуть ударная волна, даже если в этом случае на кромке сопла образуются сначала волны разрежения (фиг. 3, б — для $U = 3$ кэ; $C = 600$ мкф; $r = 2.5$ мм). Причина этого явления заключается в том, что при истечении струи из сопла ее давление падает в результате расширения и образования волн разрежения. Благодаря этому давление в струе после прохождения волн разрежения может стать меньше, чем в окружающей среде. Таким образом, чтобы удовлетворилось граничное условие, должна возникнуть ударная волна, в которой давление повысилось бы до величины давления в окружающей среде.

При промежуточной разности давлений плазменная струя обладает смещенной структурой, т. е. в плазменной струе образуются ударная волна и периодическая структура. Это хорошо видно на фоторазвертке, которая приведена на фиг. 4, а — для значений параметров $U = 2.5$ кэ; $C = 600$ мкф; $r = 2.5$ мм.

Во всех рассматриваемых случаях давление в окружающей среде оставалось неизменным и равным 1 атм. Изменение соотношения давления в плазменной струе и окружающей среде достигалось за счет изменения давления в «разрядном» объеме. Изменения последнего производились благодаря изменению условий и параметров разряда (величина «разрядного» объема, диаметр отверстия кольцевого электрода и энергия разряда).

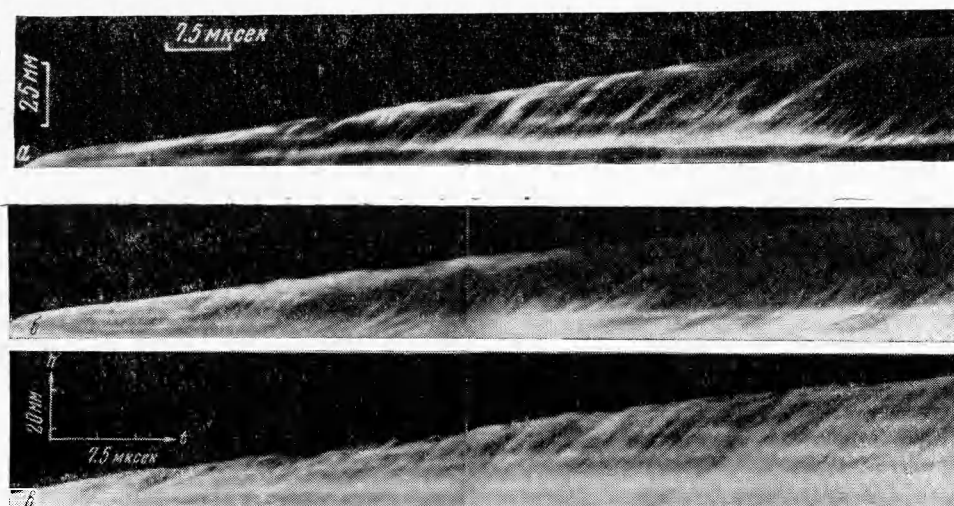
Истекающая плазменная струя является сверхзвуковой вследствие расширения по выходе из сопла.

По аналогии с описанным в [5], если разность давлений в струе (p) и окружающей среде (p_1) мала, то при истечении плазменной струи из сопла на его выходной кромке образуется пучок волн разрежения. Эти волны взаимно пересекаются и отражаются от противоположных границ струи в виде волн сжатия (фиг. 3, а — для $U = 2.25$ кэ; $C = 600$ мкф; $r = 5$ мм). Волны сжатия, в свою очередь, также пересекаются одна с другой и отражаются от противоположных границ струи в виде волн разрежения и т. д. Струя имеет почти периодическую структуру, т. е. состоит из чередующихся участков расширения и сжатия (капельвидная конфигурация). Длина волны L этой почти периодической структуры, как экспериментально установлено Эмденом [6] для осесимметричной сверхзвуковой струи, распространяющейся в неподвижной окружающей среде, определяется формулой



Фиг. 3

В связи с рассмотрением процессов, протекающих в плазменных струях, образующихся при импульсном разряде, нельзя не остановиться на физической несостоятельности объяснения наблюдаемых явлений в работе [7], посвященной исследованию локализованного импульсного разряда. Локализация разряда, осуществляемая при помощи изоляционной шайбы, приклеиваемой к электроду, приводит к сильному возрастанию давления в ограниченном шайбой объеме. В результате происходит истечение плазмы из шайбы аналогично истечению из сопла с избыточным давлением. Это позволяет объяснить образование темного пространства (как области расширения), а также выясняется физическая несостоятельность выводов автора [7], что «образование темного пространства связано с попаданием жидких капель и отдельных частиц в облако разряда, где они распадаются на более мелкие частицы и атомы, вызывая наиболее интенсивные свечения паров металла». В действительности область наиболее интенсивного свечения паров металла наблюдается в скачке уплотнения, в котором возрастает плотность и температура паров.



Фиг. 4 а, б, в

Следует также остановиться на предположении, высказанном в работе [1], относительно подобия явлений, протекающих в обычном импульсном разряде, с явлениями, рассматриваемыми в этой статье. Достоверно установлено, что поступление вещества электродов в искровом разряде происходит в виде факелов, представляющих собой выбросы паров материала электродов со сверхзвуковыми скоростями [8]. Факелы, в свою очередь, имеют тонкую структуру, т. е. состоят из отдельных струек паров материала электродов, каждой из которых соответствует след-лунка на катоде. Характер поступления паров материала электродов и наличие темного пространства у поверхности электродов [8] наводят на аналогию с выше рассмотренными явлениями. Действительно, след-лунка на катоде представляет собой своего рода локализованный разряд. При разряде в каждой лунке резко возрастает давление по сравнению с давлением в окружающей среде. Происходит выброс струйки как и в случае истечения из сопла с избыточным давлением. Говоря другими словами, каждая струйка представляет в миниатюре струю, истекающую из сопла с избыточным давлением.

3. Изменение структуры плазменной струи в зависимости от полярности. На фиг. 4, б, в, приведены типичные фоторазвертки плазменной струи с ударной волной (для $U = 3$ кВ; $C = 600$ мкФ; $r = 2.5$ мм) и с периодической структурой (для $U = 2.25$ кВ; $C = 600$ мкФ; $r = 5$ мм; $M = 1.6$) в зависимости от полярности. Из многочисленных фоторазверток установлено, что структура плазменной струи в случае отрицательной полярности кольцевого электрода более сложна, чем структура струи при положительной полярности. Наряду со струйками, которые составляют струю в целом, на фоторазвертках видны отдельные сгустки, перекрывающие струйки под меньшими углами наклона к временной оси развертки и не претерпевающие излом в ударной волне (фиг. 4, б). Эти сгустки выбрасываются в стороны и распространяются вне основной струи. Наблюдаются также отдельные сгустки, которые постепенно с удалением от кольцевого электрода увеличивают угол наклона к временной оси, т. е. скорость выброса. В этом случае выбрасываемые сгустки поступают непосредственно в основную струю и увлекаются ею. Как те, так и другие свидетельствуют, что при отрицательной полярности кольцевого электрода из него происходит выброс вещества. На это указывают также заметные поражения кольцевого электрода.

По струйкам, составляющим струю в целом, была измерена скорость истечения плазменной струи. Ошибка измерения составляет 5—10%. Скорость истечения плазменной струи в случае отрицательной полярности кольцевого электрода v_- меньше скорости при положительной полярности v_+ как перед ударной волной ($v_- = 6.9$ и $v_+ = 9.2$), так и в ударной волне ($v_- = 2.5$ и $v_+ = 3.2$). Уменьшение скорости истечения струи вызывается наблюдаемой нестабильностью разряда при отрицательной полярности кольцевого электрода. Эта нестабильность, по всей вероятности, связана с особенностями распределения тока на электроде. Для струи с периодической структурой заметных различий в скорости истечения в зависимости от полярности не наблюдается. Ее скорость истечения в среднем равна 6 км/сек ($U = 2.25 \text{ кВ}$; $C = 600 \text{ мкФ}$; $r = 5 \text{ мм}$). Длина волны почти периодической структуры такой струи равна 16 мм . Число Маха и газокинетическая температура, полученные по формулам (2.2) и (2.3), исходя из экспериментальных данных, равны соответственно 1.6 и 3600° К . Давление в «разрядном» объеме на основании (2.1) составляет 14.6 атм .

Авторы благодарят М. А. Ельяшевича за внимание к работе, обсуждение результатов и ценные замечания.

Поступила 26 VIII 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я., П л ю т а В. Е. Исследование плазменной струи импульсного разряда. Оптика и спектроскопия, 1962, т. 12, № 1.
2. Г р е ч и х и н Л. И., М и н ь к о Л. Я. О структуре плазменной струи импульсного разряда. Ж. техн. физ., 1962, т. 32, № 9.
3. 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.
4. С е м е н о в В. К., С п е к т о р о в Л. А. Изучение струи плазмы импульсного разряда. Ж. техн. физ., 1964, т. 34, № 5.
5. Б а й Ш и - и. Теория струй. Физматгиз, 1960.
6. E m d e n R. Ueber die Ausstromemungerscheinungen permanenter Gase. Ann. Phys. und Chem., 1899, B. 6, S. 264.
7. В о р о н ц о в Е. И. Исследование некоторых физических процессов, протекающих в разряде мощной импульсной искры низкого напряжения. Материалы X Всесоюз. совещ. по спектроскопии, 1958, т. 2, стр. 154.
8. М а н д е л ь ш т а м С. Л. и др. О процессах на электродах искрового разряда. Материалы X Всесоюз. совещ. по спектроскопии, 1958, т. 2, стр. 148.

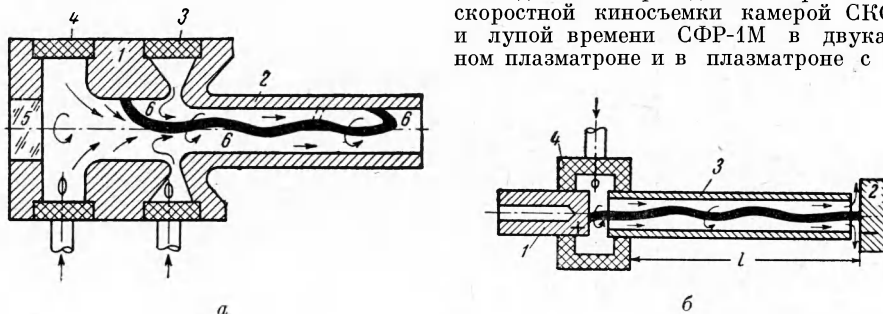
ВРАЩАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ УЧАСТКОВ И ОСОБЕННОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТОЛБА ДУГИ В ПЛАЗМАТРОНЕ С ВИХРЕВОЙ ГАЗОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

Л. И. Колонина, В. Я. Смоляков

(Новосибирск)

В работе приводятся результаты исследования движения приэлектродных участков дуги по внутренней поверхности электрода под действием окружной составляющей скорости завихренного газового потока в плазматроне постоянного тока с вихревой стабилизацией, а также особенностей пространственного расположения столба дуги.

Исследования проводились при помощи скоростной киносъемки камерой СКС-1М и лупой времени СФР-1М в двукамерном плазматроне и в плазматроне с фик-



Фиг. 1

сированной длиной дуги (с промежуточной прозрачной вставкой) в диапазоне токов $I = 50 - 150 \text{ а}$. Найдена окружная скорость движения газа и радиальных участков ду-