

# ВЕСЦІ

АКАДЭМІІ НАВУК БССР

---

СЕРЫЯ

ФІЗІКА-МАТЭМАТЫЧНЫХ

НАВУК

№ 6

Асобны адбітак



---

Мінск 1982

В. А. БОНДАРЬ, Ч. М. ФЕДОРКОВ

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗОНЕ КОНТАКТА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Действие набегающего на твердую стенку высокоскоростного потока плазмы носит более сложный характер по сравнению с действием потока газа. Известно, что процесс образования пограничного слоя зависит как от свойств плазмы, так и от состояния поверхности [1—3]. В [4] показано, что роль механического импульса в механизме передачи энергии сверхзвуковых плазменных струй твердым преградам не сводится только к вытеснению жидкой фазы из зоны расплава, а приводит к ускорению процессов передачи энергии металлическим преградам при взаимодействии с последними набегающих плазменных потоков.

При взаимодействии плазмы с поверхностью могут играть важную роль и спонтанные электродинамические процессы. Например, контакт неоднородной плазмы с поверхностью может приводить к ее касательному ускорению с образованием нескомпенсированных токов, создающих магнитное поле [5].

В настоящей работе рассмотрено влияние электродинамических процессов на условия формирования и распада уплотненной плазмы вблизи преграды при столкновении плазменного потока с ней. Исследования проводились при атмосферном давлении. В качестве стенки использовались различные твердые тела: металлы и диэлектрики. Плазменные потоки создавались с помощью импульсного плазматрона ( $C=300$  мкФ,  $U=0,5-2,0$  кВ). Плотность частиц в плазменном потоке в большинстве экспериментов составляла  $\sim 10^{17}$  см $^{-3}$ , скорость движения потока 200—300 м/с. В отдельных зонах значение плотности оказывалось несколько выше.

На рис. 1, а приведена фотография набегающего плазменного потока на металлическую преграду. Диаметр плазменной струи при использованных размерах сопла составлял 5—7 мм. При набегаении на стенку имело место растекание плазмы по радиальным направлениям, что привело к образованию ярко светящегося пограничного слоя диаметром 4—5 см. Плазменные струи, набегаая на неподвижную преграду, создают перед ней уплотненную область плазмы.

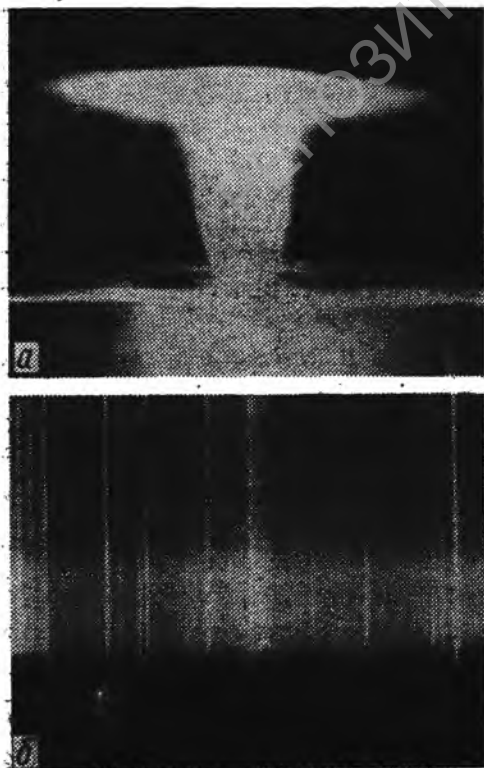


Рис. 1. Фотография набегающего плазменного потока на преграду (а) и участок спектра уплотненной плазмы в области длин волн 380,0—450,0 нм (б)

Фотографические и спектроскопические наблюдения показывают, что структура образующихся уплотненных областей является пространственно неоднородной. Перед преградой возникает область повышенной плотности плазмы размером 2—3 мм, характеризующаяся более интенсивным непрерывным излучением и уширенными линиями. Эта область видна на фотографии (рис. 1, б), где показан участок спектра в области длин волн 380,0—450,0 нм. В нижней и верхней частях этой области имеет место незначительное увеличение интенсивности излучения. Размеры ее зависят от условной разрядки. С увеличением начального разрядного напряжения от 1 до 3 кВ (при этом возрастает скорость струи) поперечные размеры уплотненной зоны уменьшаются примерно в два раза. Непосредственно у поверхности стенки наблюдается очень узкая область яркого свечения, сосредоточенного в слое размером 0,3—0,5 мм. Этот пристеночный слой характеризуется сравнительно высокими параметрами плазмы (концентрация электронов, температура). Между пристеночным слоем и остальной уплотненной обла-

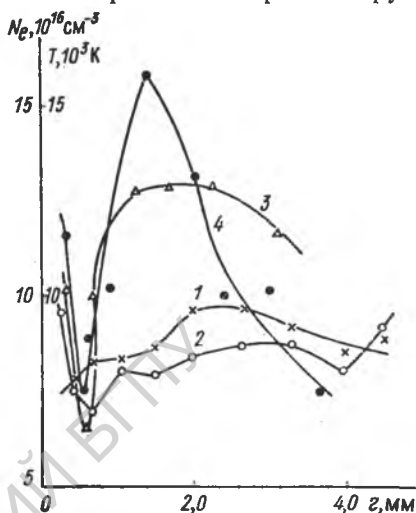
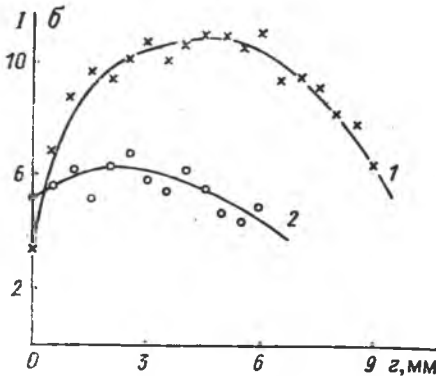
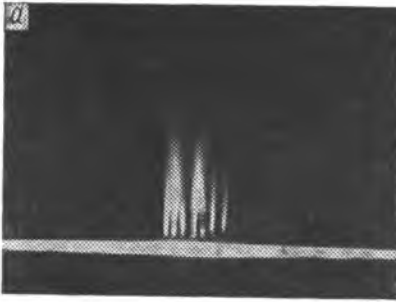


Рис. 2. Распределение температуры  $T$  при  $U = 2$  кВ вблизи диэлектрической (1), металлической (2) преград и концентрации электронов  $N_e$  вблизи металлической преграды (3 —  $U = 1$  кВ; 4 —  $U = 2$  кВ)

стью наблюдается зона ( $\sim 0,3$  мм) пониженных параметров плазмы. Интенсивность спектральных линий и непрерывного излучения в этой зоне резко уменьшается по сравнению с соседними областями уплотнения плазмы. Аналогичная структура пристеночной зоны наблюдалась также при использовании диэлектрической стенки. Образование темной зоны на некотором расстоянии от поверхности является непонятным с точки зрения обычных газодинамических представлений, так как в этой области наблюдается провал температуры и плотности, что делает всю картину газодинамически неустойчивой.

Температура плазмы в пристеночных областях была измерена по методу относительных интенсивностей спектральных линий. Были использованы линии  $\text{CuI } 513,3$  и  $\text{CuI } 510,5$ , для которых поглощение было незначительным. Наблюдения проводились по направлению, совпадающему с осью плазменной струи. Распределение концентрации электронов  $N_e$  по оси плазменного потока было измерено при использовании данных работ [6, 7]. Данные измерений  $T$  и  $N_e$  приведены на рис. 2. Температура плазмы в случае диэлектрической стенки несколько выше. Концентрация электронов  $N_e$  в пристеночном слое металлической стенки примерно в 1,5 раза больше, чем в случае диэлектрической. В обоих случаях  $N_e$  в темной зоне между пристеночным слоем и широкой уплотненной областью меньше, чем в соседних уплотненных областях, в то время как плотность нейтральных атомов практически не изменилась. Ширина поглощенного профиля резонансной линии меди  $\text{CuI } 324,7$  остается примерно такой же, как и в пристеночном слое. Температура плазмы понижается вблизи стенки.

Провал плотности и температуры электронов в темной области требует привлечения дополнительных представлений (дополнительных сил) для объяснения наличия неустойчивого распределения электронов по оси. Наиболее вероятной является возможность появления осевой составляющей магнитного давления, компенсирующего в темной обла-



сти падение газодинамического и электрического давления. Магнитное поле может генерироваться в области контакта плазмы с поверхностью, где не совпадают градиенты электронной плотности и температуры. Известно [8—10], что если градиенты плотности и температуры не равны, то генерируются спонтанные магнитные поля. В зоне контакта плазмы с поверхностью имеет место различие градиентов плотности и температуры. Следовательно, распад плазмы в области контакта должен отличаться от газодинамического распада, диссипация магнитного поля в основном проявляется на ускорении заряженных частиц. В частности, можно ожидать, что диссипация поля при-

Рис. 3. Фотография вторичных струй плазмы (а) и распределение интенсивности линий вдоль струи (б). 1 — Al I 394,4; 2 — Ca II 393,4

ведет к ускорению ионов вдоль оси разряда. Для наблюдения такого ускорения в пластинке делались отверстия ( $d \approx 0,3—0,4$  мм;  $l \approx 1,0—1,5$  мм). При набегании плазменного потока на преграду через отверстие имеет место выброс тонкой плазменной струи (рис. 3, а). Высота струи при режиме разряда  $U = 2$  кВ и  $C = 300$  мкФ, когда преграда находилась на высоте  $h = 1,5$  см от среза сопла, составляла  $1,0—1,5$  см. Струя была достаточно узкой и направленной вертикально вверх. При наличии в преграде нескольких отверстий наблюдается выброс плазменных струек из каждого отверстия. Длина струек с удалением от оси разряда уменьшается. Характерным является тот факт, что выброс вторичных струек наблюдается также из отверстий, расположенных на значительном расстоянии  $r$  от оси первичной набегающей струи. На рис. 3, а крайняя вторичная струйка выбрасывается из отверстия на расстоянии  $r = 10$  мм при радиусе первичной струи  $R = 4$  мм.

Выбрасываемые струйки из нескольких отверстий могут взаимодей-

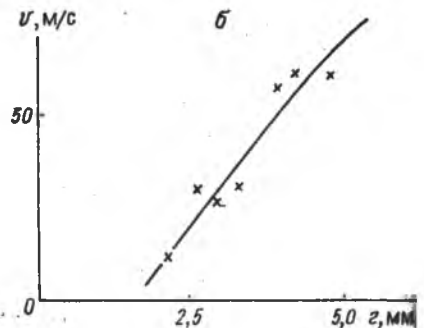
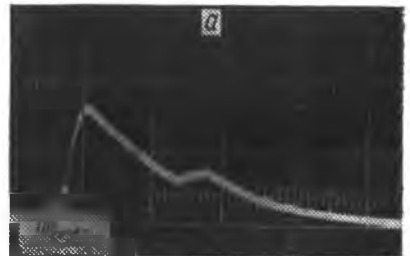


Рис. 4. Осциллограмма свечения линии (а) и зависимость скорости распространения обратного импульса от расстояния от преграды (б)

ствовать друг с другом, притягиваются и сливаются в одну на некотором расстоянии от преграды, т. е. действуют как токи одного направления. В результате диссипации магнитного поля ионы плазмы ускоряются в том направлении, в котором они тормозились в тот момент, когда поле создавалось. Согласно газодинамике, плазменная струя должна охлаждаться, интенсивность свечения падать. В нашем случае спектроскопические исследования показали, что интенсивность спектральных линий во вторичных струйках увеличивается при удалении от преграды, достигая максимума на некотором расстоянии, а затем спадает (рис. 3, б).

Диссипация магнитного поля должна вызвать распространение плазменного потока также и в обратном направлении. Исследования показали, что в поздние фазы разряда, когда наступает распад, наблюдается распространение импульса в сторону среза сопла плазматрона, т. е. в направлении, обратном направлению истечения набегающего плазменного потока. На осциллограммах свечения отдельных спектральных линий, полученных на различных расстояниях от преграды, имеет место вторичный максимум интенсивности (рис. 4, а), который и свидетельствует о наличии обратного импульса. При удалении от преграды в сторону среза сопла плазматрона скорость распространения обратного импульса возрастает (рис. 4, б). Возрастание скорости обратного импульса свидетельствует о наличии действующей силы, возникновение которой возможно при диссипации магнитного поля в зоне контакта плазмы с преградой.

### Summary

A difference of the density and temperature gradients in the contact zone of plasma with a surface leads to generation of spontaneous magnetic fields. In later discharge phases dissipation of these fields is observed. These processes affect the formation and decomposition of the dense plasma layers near the surface.

### Литература

1. Демченко П. А., Крупник Л. И. Взаимодействие плазмы с поверхностью твердого тела. I. Налетание сверхзвукового потока на тела разного профиля.— ЖТФ, 1976, т. 46, вып. 11, с. 2333—2338.
2. Демченко П. А., Крупник Л. И., Лянгнер Е. С. Взаимодействие плазмы с поверхностью твердого тела. II. Структура пограничного слоя.— ЖТФ, 1976, т. 46, вып. 11, с. 2339—2348.
3. Демченко П. А., Крупник Л. И. Взаимодействие плазмы с поверхностью твердого тела. III. Анализ свечения, возникающего у поверхности тел в плазменном потоке.— ЖТФ, 1976, т. 46, вып. 11, с. 2349—2354.
4. Агеев В. А., Широков А. Д., Янковский А. А. О роли механического импульса в разрушении металлов высокоскоростными импульсными струями.— ЖПС, 1978, т. 29, вып. 1, с. 13—16.
5. Киселевский Л. И., Антонов Г. С. Пристеночное ускорение плазмы в поле интенсивного ультрафиолетового излучения.— ЖПС, 1976, т. 25, вып. 6, с. 1125—1127.
6. Катаева В. Ф., Обухов-Денисов В. В., Соболев Н. Н. Концентрация заряженных частиц в плазме дуги, горящей в атмосфере аргона и гелия.— Опт. и спектр., 1962, т. 12, с. 178—185.
7. Киселевский Л. И., Снопко В. Н. Зависимость относительной заселенности смещенных уровней атома меди от концентрации электронов в плазме дугового разряда.— ЖПС, 1965, т. 2, вып. 3, с. 207—211.
8. Гуревич А. В. Возникновение магнитного поля при гидродинамическом движении плазмы.— ЖЭТФ, 1978, т. 74, вып. 2, с. 539—551.
9. Альтеркоп Б. А. Нелинейные эффекты при возбуждении магнитного поля в сильно ионизованной плазме.— ЖЭТФ, 1979, т. 76, вып. 3, с. 971—975.
10. Андреев Н. Е., Захаренков Ю. А., Зорев Н. Н., Тихончук В. Т., Шиканов А. С. Быстрые ионы в лазерной плазме.— ЖЭТФ, 1979, т. 76, вып. 3, с. 976—990.