

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ РАЗРЯДА МЕЖДУ ХОЛОДНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ В СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕ ПЛАЗМЫ С ПРИСАДКАМИ

В. И. АЛФЕРОВ, Ю. С. УСТИНОВ

(Москва)

Наличие в канале МГД-устройства потока газа с высокой статической температурой (2000—3500° К) вызывает необходимость охлаждения элементов конструкции и, в частности, электродов. Охлаждение электродов приводит к тому, что вблизи поверхности электродов температура газа с присадками оказывается значительно меньше температуры в ядре потока. Проводимость газа с присадками резко падает при уменьшении температуры, и области пограничного слоя, непосредственно прилегающие к электродам, оказываются практически неэлектропроводными. В работе экспериментально исследовался механизм протекания тока через пограничный слой на электродах, помещенных в сверхзвуковой поток плазмы с присадками.

1. Структура пограничного слоя на электродах. При обтекании холодного электрода сверхзвуковым потоком на электроде возникает пограничный слой, в котором температура газа резко меняется от температуры в ядре потока T_∞ до температуры электрода T_w . В качестве типичного примера рассмотрим поток воздуха с легкоионизируемой добавкой — калием, имеющий следующие параметры: температура торможения $T_0 = 5000^\circ \text{К}$, давление торможения $p_0 = 10 \text{ ага}$, статическое давление $p_\infty = 0.2 \text{ ага}$, число $M = 3$, статическая температура $T_\infty = 3000^\circ \text{К}$, концентрация присадки $K \sim 1\text{--}2\%$.

В отсутствие электрического и магнитного полей, принимая пограничный слой на электродах ламинарным, для оценок можно воспользоваться известным теоретическим решением о пограничном слое на плоской стенке из работы [1]. Назовем подслоем толщиной δ , где $T \leq T_\infty$, «холодным» подслоем пограничного слоя. Подсчет физической величины этого подслоя на расстоянии $\sim 100 \text{ мм}$ от передней кромки при температуре стенки $T_w = 1/4 T_\infty$ дает значение $\delta \sim 0.5 \text{ мм}$.

При достаточно холодном электроде будет выполняться условие $R_\delta \gg R_\infty$, где R_δ — электрическое сопротивление «холодного» подслоя на электроде, R_∞ — сопротивление горячего ядра потока. В самом деле,

$$R_\delta \approx \frac{1}{S} \int_0^\delta \frac{dy}{\sigma} = \frac{1}{S} \int_{T_w}^{T_\infty} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^{-1} \frac{dT}{\sigma}, \quad R_\infty \approx \frac{d}{\sigma_\infty S}; \quad \frac{R_\delta}{R_\infty} \approx \frac{\sigma_\infty}{d} \int_{T_w}^{T_\infty} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^{-1} \frac{dT}{\sigma} \quad (1.1)$$

Здесь $\sigma = \sigma(T)$ — удельная проводимость газа, $\sigma_\infty \approx \text{const}$ — удельная проводимость газа в ядре потока, S — площадь электродов, d — расстояние между электродами.

Производная $\partial T / \partial y$ в выражении (1.1) ограничена, а $\sigma(T)$ — сильно меняющаяся функция температуры ($\sigma(T) \rightarrow 0$, при $T \rightarrow 0$). Поэтому $R_\delta \rightarrow \infty$ при $T_w \rightarrow 0$, и при достаточно холодном электроде $R_\delta / R_\infty \gg 1$. Оценка величин R_∞ и R_δ для $S = 1 \text{ см}^2$, $d = 2 \text{ см}$, $T_w = 750^\circ \text{К}$ дает значения $R_\infty \sim 1 \text{ ом}$, $R_\delta > 10^6 \text{ ом}$.

При подаче напряжения на электроды распределение потенциала поперек потока имеет резко выраженный неоднородный характер. Практически все падение потенциала распределяется между холодным подслоем пограничного слоя на аноде и холодным подслоем на катоде (по $\sim 1/2 U_0$, где U_0 — разность потенциалов между электродами). Необходимо отметить, что в рассуждениях не учитывается изменение потенциала в приэлектродных слоях.

Протекание тока через холодный подслой пограничного слоя может обуславливаться тремя механизмами:

1) электрической дугой в пограничном слое, в результате возникновения которой на поверхности электрода образуется раскаленное пятно, обеспечивающее термоэлектронную эмиссию;

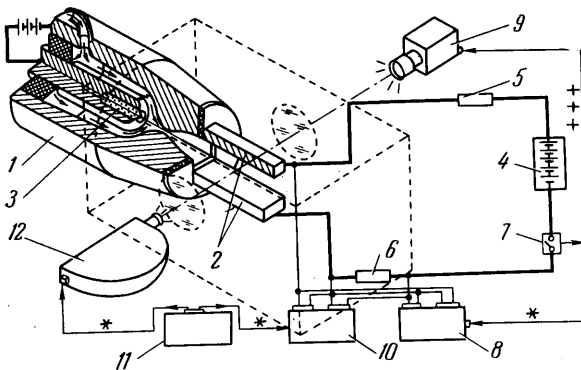
2) возникновением электрических полей высокой напряженности в очень тонком слое плазмы, находящемся в контакте с поверхностью электрода; в этом случае протекание тока обеспечивается автоэлектронной эмиссией;

3) проводимостью, обусловленной положительно заряженными ионами в пограничном слое.

От того, какой из этих трех механизмов превалирует в обеспечении протекания тока через холодный подслой пограничного слоя, зависит инженерное решение МГД-канала. Если преобладает автоэлектронная эмиссия или проводимость за счет положительных ионов, то, по-видимому, электроды необходимо изготавливать с покрытиями из материалов, обеспечивающих малую работу выхода электронов. Если определяющим механизмом будет дуга, то специальных покрытий для электродов не требуется.

Для обычной концентрации присадки 1—2% по объему парциальное давление присадки К, приведенное к нормальным условиям ($n T = 300^\circ \text{K}$) по плотности, составляет в рассматриваемом случае $p \sim 0.3 \text{ мм рт. ст.}$ При подаче на электроды напряжения $U_0 = 30 \text{ в}$ средняя напряженность электрического поля в холодном подслое на электроде $E_0 \approx 3 \cdot 10^4 \text{ в/м}$. По данным работы [2], в атмосфере паров Cs для давлений $p = 0.15\text{--}0.5 \text{ мм рт. ст.}$ напряжение пробоя $U_* = 4 \text{ в}$ при расстоянии между электродами $d = 1 \text{ мм}$. Пробойная напряженность электрического поля составляет $E_* = 4 \cdot 10^3 \text{ в/м} < E_0$. Можно ожидать, что во всех практически интересных случаях ($U_0 \geq 50 \text{ в}$) должен происходить пробой холодного подслоя на электроде, переходящий в дугу.

2. Эксперимент. Схема эксперимента приведена на фиг. 1. Исследования проводились в аэродинамической трубе с электродуговым подогревателем 1.



Фиг. 1

Параметры воздуха в рабочей части установки: температура торможения $T_0 = 4000\text{--}5000^\circ \text{K}$, давление торможения $p_0 = 6\text{--}8 \text{ ата}$, статическое давление $p_\infty = 0.05\text{--}0.3 \text{ ата}$, статическая температура $T_\infty = 1900\text{--}3000^\circ \text{K}$, число $M = 2.5\text{--}3.5$.

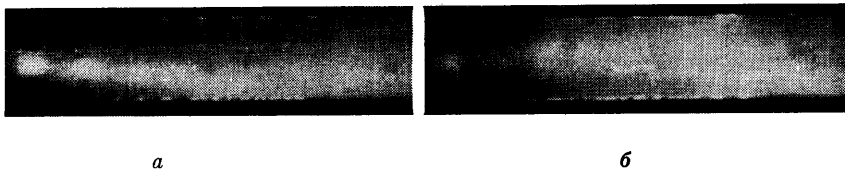
Для обеспечения необходимой электропроводности газа в центральном электроде подогревателя высверливалось отверстие, которое заполнялось солью КВг. По мере выгорания соль Z попадала в поток (средняя концентрация калия в потоке $\sim 1\text{--}2\%$ по объему, средняя проводимость газа $\sigma_\infty \sim 1 \text{ мо/см}$). В рабочей части вплотную к соплу устанавливались плоские электроды 2 до-

статочно большой массы, так что за время работы установки $\tau \approx 15 \text{ сек}$ их температура существенно не изменялась. Расстояние между электродами в экспериментах было равно 18 мм , ширина электродов 20 мм , длина 100 мм . Чтобы исключить появление скачков уплотнения на электродах, поверхность электродов выполнялась полированной.

В экспериментах на электроды через реле — включатель 7 подавалось напряжение от батареи аккумуляторов 4.

Для проверки возможного влияния материала электродов на характер протекания тока в пограничном слое электроды выполнялись из трех различных материалов: меди, графита, стали.

Характер вольт-амперной характеристики разрядного промежутка между электродами зависит от механизма протекания тока через холодный подслоя погранич-



Фиг. 2

ного слоя на электродах. Если протекание тока имеет характер искрового пробоя, переходящего в дугу, то прежде всего должно существовать пороговое пробойное напряжение U_* ; тогда при напряжении на электродах $U_0 < U_*$ ток между электродами должен практически отсутствовать.

Статическая вольт-амперная характеристика разрядного промежутка должна иметь в случае возникновения дуги круто падающий участок. Существование круто падающего участка можно выявить, если в цепь питания электродов поставить сравнительно большое нагрузочное сопротивление R . Тогда при подаче на электроды напряжения $U_0 \geq U_*$ стабилизированный режим протекания тока будет осуществляться при напряжении на электродах, существенно меньшем U_* .

В экспериментах в цепь питания электродов было поставлено нагрузочное сопротивление $R = 4\text{--}8 \text{ ом}$ (5).

Кроме того, области высокой проводимости в «холодном» подслое должны иметь локальный характер и обладать большой яркостью (вследствие высокой температуры в дуге), что должно отчетливо проявиться при киносъемке. В экспериментах разрядный промежуток между электродами фотографировался кинокамерой 9 со скоростью 50 кадр/сек или аппаратом СФР 12 со скоростью ≈ 15000 кадр/сек, а напряжение на электродах U и ток между ними I записывались на осциллографы Н-102 8 или ОК-17М 10. Запись тока производилась с шунта 6.

Эксперимент проводился в два этапа.

Цель первого этапа исследований заключалась в обнаружении порогового напряжения U_* , построении вольт-амперных характеристик разрядного промежутка и установлении связи между картиной явлений, происходящих на электродах, и характером осциллограмм записи тока I и напряжения U . Ток и напряжение записывались на первом этапе при помощи шлейфового осциллографа Н-102 (чувствительность записи: по току — от 0.5 до 2 мм/а, по напряжению — от 0.5 до 1 мм/в, собственная частота шлейфов 5000 гц), а промежуток между электродами фотографировался кинокамерой со скоростью 50 кадр/сек.

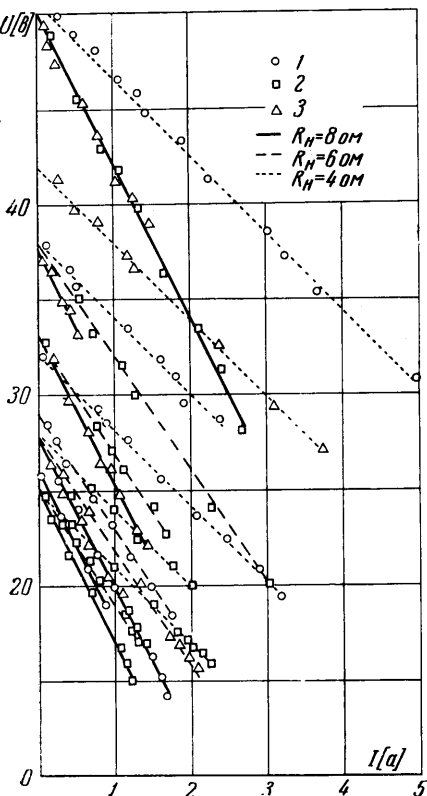
На втором этапе запись I и U осуществлялась на двухлучевой электронный осциллограф ОК-17М, а разрядный промежуток фотографировался при помощи аппарата СФР со скоростью ≈ 15000 кадр/сек. Цель второго этапа эксперимента заключалась в определении связи между высокочастотными пульсациями тока I и напряжения U в цепи электродов и физической картиной явлений, происходящих на электродах.

Особое внимание было обращено на синхронизацию киносъемки разрядного промежутка и осциллографической записи тока и напряжения на электродах. С этой целью на первом этапе эксперимента в момент включения осциллографа Н-102 в кинокамеру подавалась импульсная световая отметка, а на втором этапе электронный осциллограф ОК-17М и затвор аппарата СФР срабатывали от электрического импульса, выдаваемого генератором импульсных сигналов ГИС-2 II (см. фиг. 1). Это позволило с удовлетворительной степенью точности синхронизировать запись I и U и киносъемку.

Для расчета аэродинамических параметров потока на обоих этапах производилась запись давления перед расходомерным соплом, давления в подогревателе и статического давления в рабочей части трубы.

Измерение температуры электродов в экспериментах не производилось, но периодическое обследование электродов сразу после пуска трубы показало, что температура электродов за время пуска $\tau = 15-20$ сек существенно не изменялась.

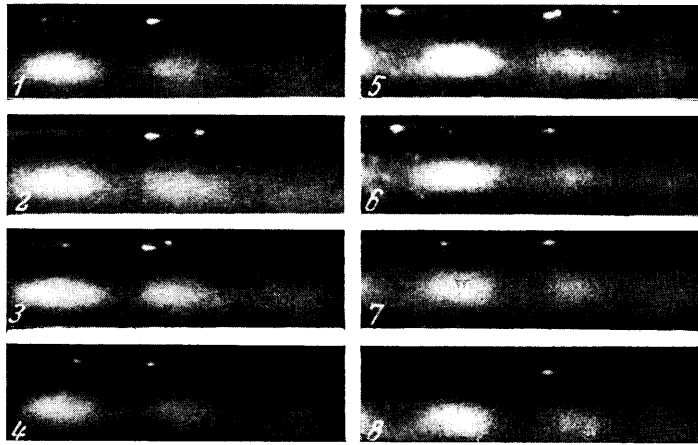
По записи I и U на электродах на первом этапе строились вольт-амперные характеристики разрядного промежутка. На втором этапе по данным записи I и U и киносъемки разрядного промежутка аппаратом СФР определялась характерная частота высокочастотных пульсаций I и U и связь этих пульсаций с исчезновением и возникновением дуг на электродах.



Фиг. 4

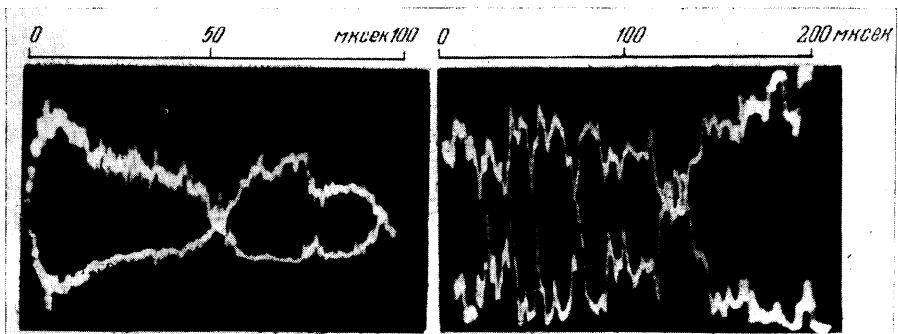
3. Результаты эксперимента. Эксперименты показали, что в тех пусках, где напряжение, подаваемое на электроды, $U_0 < 24$ в, ток между электродами был практически равен 0. Кадры киносъемки свидетельствуют об отсутствии в этих пусках локальных каналов проводимости в «холодном» подслое пограничного слоя на электродах.

При повышении напряжения, подаваемого на электроды, до $U_0 = 24-28$ в отдельные моменты времени между электродами протекал ток величиной до 2 а. Следовательно, пробойное напряжение разрядного промежутка $U_* \sim 25-28$ в. Протекание



Фиг. 5

тока при $U_0 \approx 24-28$ в имело прерывистый характер. При повышении напряжения на электродах до 50—55 в протекание тока также имело прерывистый характер. Прерывистость протекания тока между электродами, возможно, связана с неравномерностью выгорания соли, плохим перемешиванием ее с потоком, что приводит к неустойчивости концентрации присадки. Кадры киносъемки разрядного промежутка со скоростью 50 кадр/сек при $U_0 \sim 50$ в для медных *a* и графитовых *б* электродов,



Фиг. 6

в моменты протекания тока, приведены на фиг. 2. На фотографии сверхзвуковой поток движется слева направо. Видно, что при протекании тока в пограничном слое на холодном электроде возникают локальные, резко контрагированные каналы проводимости. Типичная осциллограмма записи тока *I* и напряжения *U* на осциллограф Н-102 приведена на фиг. 3 (графитовые электроды, $U_0 = 25$ в, *a* — ток; *б* — напряжение; *в* — отметка 500 гц).

На фиг. 4 приведены вольт-амперные характеристики разрядного промежутка для различных электродов (1 — медных, 2 — графитовых, 3 — стальных). Различный наклон характеристик соответствует различным значениям величины нагрузочного сопротивления R в цепи питания электродов. Видно, что при подаче на электроды напряжения существуют режимы протекания тока при $U \sim 0.5 U_*$. Следовательно, у статической вольт-амперной характеристики разрядного промежутка есть падающий участок, т. е. протекание тока через пограничный слой имеет дуговой характер.

На фиг. 5 приведены типичные кадры киносъемки разрядного промежутка аппаратом СФР со скоростью 15000 кадр/сек. Видно, что время жизни каналов проводимости на электроде различно. На фиг. 6 приведена запись высокочастотных колебаний I и U в цепи электродов.

Анализ данных киносъемки разрядного промежутка показал, что время жизни локального канала проводимости на электроде колеблется в широких пределах: от $5 \cdot 10^{-5}$ до 10^{-2} сек. Исчезновение элементарных каналов проводимости, возможно, связано с задуванием их потоком. Типичное время жизни каналов проводимости, определенное в каком-либо пуске по кадрам СФР-съемки, и характерная частота высокочастотных пульсаций I и U , определенная по осциллографической записи, совпадают в пределах точности измерений. По-видимому, высокочастотные пульсации I и U в цепи электродов определяются возникновением и «затуханием» отдельных каналов проводимости.

Отмечено, что в некоторые моменты времени локальные контрагированные каналы проводимости возникают лишь на одном электроде. Кроме того, на графитовых электродах элементарные каналы проводимости чаще, чем на медных и стальных, имеют более развитую форму (большие размеры).

Обследование металлических электродов после проведения эксперимента показало, что на полированной поверхности появились следы слабой эрозии.

Поступило 23 VI 1967

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л. Г. Ламинарный пограничный слой. Физматгиз, 1962.
2. Лебедев М. А., Гуськов Ю. К. Электрический прибор в атмосфере паров цезия. Ж. техн. физ., 1963, т. 33, № 12, стр. 1462.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУИ ГАЗА, ВЫТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ОТВЕРСТИЯ В ПЛАСТИНЕ, СО СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

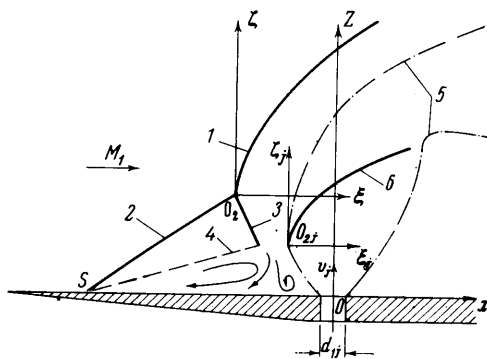
А. И. ГЛАГОЛЕВ, А. И. ЗУБКОВ, Ю. А. ПАНОВ

(Москва)

Истечение струи газа из отверстия на поверхности тела в сверхзвуковой поток рассматривалось в ряде работ (см., например, [1-3]). Большинство этих и других работ в основном были посвящены изучению силы тяги, возникающей при истечении струи, с учетом дополнительной силы, возникающей из-за перестройки характера течения около струи при взаимодействии ее с основным потоком. Газодинамическая схема и характер течения около вдуваемой струи рассмотрены в работе [4]. Однако изменение структуры течения в самой вдуваемой струе при взаимодействии ее с внешним сверхзвуковым потоком, по сравнению со случаем истечения в покоящийся газ, до настоящего времени изучено недостаточно подробно.

В данной статье приводятся результаты исследования геометрических параметров струи газа, истекающей из дозвукового сопла, расположенного в пластине, в сверхзвуковой поток с числом $M_1 = 3$. Диаметр среза сопла $D_{1j} = 14$ мм. Пограничный слой на пластине перед областью взаимодействия был турбулентный.

Схема взаимодействия вдуваемой струи с внешним сверхзвуковым потоком (в плоскости симметрии) представлена на фиг. 1. Перед струей возникает основной скачок уплотнения 1, от которого вверх по потоку отходит пространственный косой скачок 2, вызывающий отрыв пограничного слоя. Поскольку поток за косым



Фиг. 1