

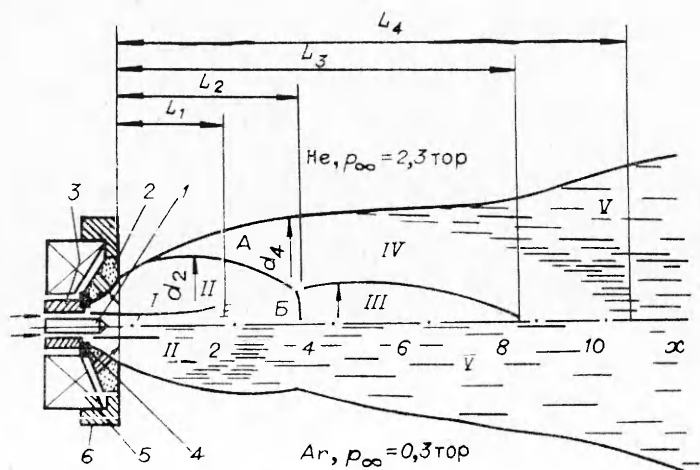
ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ ПЛАЗМЫ МАГНИТОПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

Г. А. Лукьянов, В. В. Сахин
(Ленинград)

Проведено экспериментальное исследование газодинамической структуры начального участка сверхзвуковых струй плазмы аргона и гелия при истечении в разреженную среду из источника магнитоплазгодинамического типа. Изучена зависимость газодинамической структуры от рода газа, давления в окружающей среде, индукции внешнего магнитного поля, энтальпии торможения, расхода и способа подачи газа.

Газодинамическая структура сверхзвуковых струй плазмы существенно зависит от типа источника плазмы. В работах [1,2] экспериментально исследовалась структура плазменных струй электротермических источников. Особенности ускорения плазмы в магнитоплазгодинамических источниках (МПДИ) с внешним магнитным полем определяют специфику формирования начального участка струй этого типа. Отдельные вопросы газодинамики струй МПДИ рассматривались в работах [3,4]. В данной работе делается попытка на основе экспериментальных данных дать качественную картину течения плазмы на начальном участке при истечении в затопленное пространство низкого давления и выявить связь газодинамической структуры с параметрами источника. Экспериментальные данные получены в процессе газодинамических, электрозондовых и оптических измерений.

1. Источник плазмы и условия экспериментов. Конструкция МПДИ (фиг. 1) включает вольфрамовый катод 1 и коаксиальное пирографитовое анод-сопло 2, разделенные нейтральной вставкой 3 с кольцом 4 из нитрида бора. С помощью магнитной катушки 5 и магнитопровода 6 создается магнитное поле с напряженностью у торца катода $B = 30I_m$ Гс/А, где I_m — ток в катушке. Диаметр катода равен 5 мм, минимальный внут-



Ф и г. 1

ренный диаметр анода $d=40$ мм. Межэлектродный промежуток расположен в расходящемся магнитном поле. Конструкция источника обеспечивает осевую подачу газа вдоль катода и радиальную подачу через отверстия в аноде.

МПДИ устанавливается внутри вакуумной камеры на координатном устройстве с двумя степенями свободы в горизонтальной плоскости. Измерительные устройства были неподвижными относительно вакуумной камеры. Откачка газа производилась блоком вакуумных насосов, состоящим из двух механических насосов ВН-6 и бустерного насоса БН-15000. Для описываемых экспериментов типичны следующие условия: ток дуги $I=250-500$ А, $B=250-900$ Гс, расход газа $G=0,015-0,3$ г/с. При стационарном режиме истечения давление в вакуумной камере p_∞ пропорционально массовому расходу газа и составляет при $G=0,1$ г/с примерно 0,2 тора для аргона и 2 тора для гелия. Согласно данным теплового баланса источника, при $G=0,1$ г/с и токе 500 А среднemasсовая энтальпия торможения составляет около $1,5 \cdot 10^5$ Дж/г для гелия и $5 \cdot 10^4$ Дж/г для аргона. При этом имеет место полная однократная и существенная вторичная ионизация аргона и значительная однократная ионизация гелия. Спектры плазмы на начальном участке струи являются соответственно в основном спектрами иона аргона и атома гелия [5,6]. Давление в камере МПДИ составляло 0,3—3 тора при концентрации частиц $10^{14}-10^{15}$ см⁻³ и электронной температуре 5—10 эВ.

2. Методы диагностики. Для получения количественной информации о газодинамической структуре и параметрах плазмы использовались газодинамические, электроразондовые и оптические методы. Газодинамические измерения включали измерения полных напоров во всем поле течения и статического давления на оси струи. В качестве датчика полного напора использовались цилиндрические водоохлаждаемые насадки с плоским торцом и диаметром приемного отверстия от 2 до 10 мм. Насадки малого диаметра применялись для измерений вблизи среза сопла источника. В качестве датчика статического давления использовался цилиндрический насадок диаметром 6 мм с головным конусом 20° и боковыми отверстиями на расстоянии 50 мм от вершины конуса. Регистрация давления осуществлялась вакуумметрами типа ВР-3 и ВТ-3 с преобразователями БВ-3 и ЛТ-2 соответственно. Непрерывная запись профилей полного напора и статического давления производилась с помощью двухкоординатного самописца ПДП-4-002. Погрешность измерения давления составляла 30—50%.

Электроразондовые измерения использовались для получения данных о потенциале и скорости плазмы, концентрации и температуре электронов. Применялись цилиндрические и плоские одиночные зонды. Электронные параметры и потенциал плазмы находились в предположении максвелловского распределения электронов по скоростям и свободномолекулярного режима обтекания зонда [7,8]. Измерение скорости плазмы производилось по методике двух плоских зондов с собирающими поверхностями, расположенными параллельно и перпендикулярно к вектору скорости [9]. Погрешность электроразондовых измерений около 30%.

Оптическая диагностика включала фотографирование струй и спектральные измерения. Последние производились с помощью прибора ИСП-51 с фотографической и фотоэлектрической регистрацией. Оптические методы обеспечивали получение информации о размерах газодинамической структуры струй, спектре излучения, составе плазмы и электронных параметрах [5,6].

3. Газодинамическая структура. В условиях эксперимента на начальном участке в основном реализовался переходный режим течения. При

одинаковых массовых расходах струи плазмы аргона значительно более разрежены, чем струи плазмы гелия. На фиг. 1 приведена схематически газодинамическая структура начального участка струй плазмы аргона и гелия, построенная на основании фотографий и визуальных наблюдений и соответствующая расходу газа порядка 0,1 г/с. От катода вдоль оси симметрии распространяется высокоэнтальпийный и интенсивно излучающий поток плазмы *I*, обычно называемый катодной струей (см., например, [10]). За срезом источника располагается область свободного расширения *II*, ограниченная висячим скачком *A* и маховским диском *B*. При равных массовых расходах и энтальпиях торможения размеры области свободного расширения в струе гелия значительно больше, чем в струе аргона. Висячий скачок и маховский диск в аргоновой струе вследствие размытости ударных волн визуально почти не различимы. В струе гелия висячий и центральный скачки видны достаточно отчетливо. Отраженный скачок *B* (см. фиг. 2) выражен слабо. За диском Маха в гелиевой струе располагается область *III*, имеющая розовую окраску. Центральные области *II* и *III* окружены областью *IV* голубого цвета, переходящей постепенно в зону смешения *V*. Визуально наблюдаемая граница между областями *III* и *IV* является, по-видимому, границей пограничного слоя, развивающегося вдоль тангенциального разрыва, который отделяет плазму, прошедшую через центральный скачок, от плазмы, прошедшей через висячий и отраженный скачки уплотнения. В струе аргона вследствие ее большей разреженности область смешения слилась со сжатым слоем и волновая структура имеет диффузный характер. На фиг. 1 и ниже линейные размеры отнесены к внутреннему диаметру анода *d*.

Изложим кратко данные о влиянии различных параметров на газодинамическую структуру. При уменьшении давления в вакуумной камере (для аргона от 0,2 до $5 \cdot 10^{-3}$ тора) наблюдается увеличение продольных и поперечных размеров начального участка примерно пропорционально $p_{\infty}^{-1/2}$. Одновременно происходит размытие границ характерных областей.

Увеличение мощности МПДИ приводит к увеличению линейных размеров струи, катодная струя становится более четко выраженной. С увеличением внешнего магнитного поля наблюдается поперечное сжатие струи за срезом источника и удлинение катодной струи. Более сильно влияние магнитного поля выражено при небольших расходах ($G < 0,1$ г/с) и больших токах разряда ($I > 300$ А). При наибольших значениях магнитной индукции $B=900$ Гс, малых G и больших I наблюдался режим работы источника с очень длинной катодной струей, пронизывавшей весь начальный участок. Этому режиму соответствовало значительное повышение напряжения на дуге и резкое падение напряжения между катодом и вакуумной камерой. Конец катодной струи довольно неустойчив, наблюдается стремление к образованию рюмкообразной конфигурации (раздвоению конца в меридианальной плоскости).

При $G \leq 0,1$ г/с способ подачи газа не оказывает существенного влияния на газодинамическую структуру струй. Наиболее стабильная работа источника достигается при смешанной подаче газа, когда 0,6—0,8 расхода подается через отверстия в аноде, а остальная доля — вдоль катода.

В таблице представлены некоторые данные о продольных и поперечных характерных размерах (см. фиг. 1) начального участка струй плазмы аргона и гелия при подаче 0,7 расхода через отверстия в аноде. В случае аргона результаты приведены для наибольшего значения расхода $G=0,3$ г/с, когда в струе плазмы аргона становятся визуально различимы характерные области, типичные для гелиевой струи при $G \geq 0,05$ г/с. Наряду

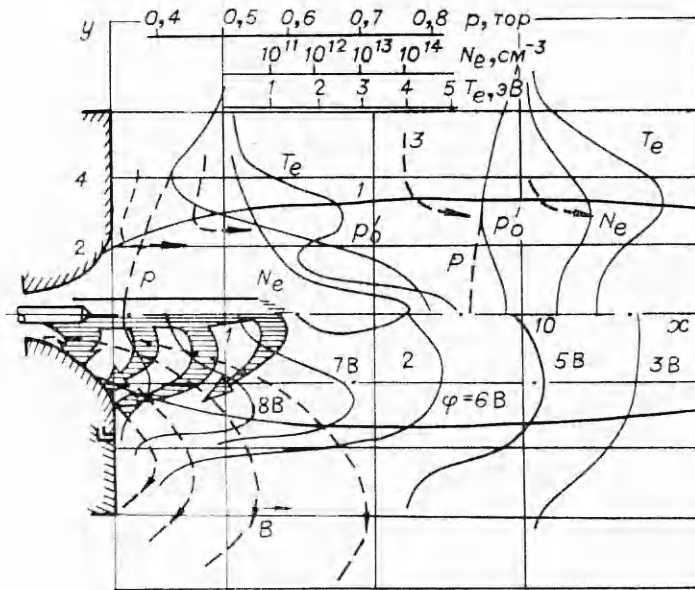
Газ	G , г/с	I , А	B , Гс	p_{∞} , тор	p_s , тор	Размеры						
						L_1	L_2	L_3	L_4	d_0	d_3	d_4
Ar	0,3	250	250	0,5	2,0	—	0,35	2,2	7,0	1,25	0,75	1,5
		500	250		3,2	0,5	0,65	5,0	10,0	1,5	0,75	1,75
		500	500		2,3	1,0	1,0	10,0	12,5	1,75	0,75	1,75
He	0,1	250	250	2,3	2,3	1,25	2,5	10,0	14,0	1,85	0,75	4,0
		500	250		2,5	2,0	2,75	12,5	21,5	1,85	0,75	4,5

со значениями G , I , B и p_{∞} в таблице приведены данные о давлении на стенке анода p_s в сечении, где расположены отверстия подачи. Следует отметить уменьшение p_s с увеличением B , что свидетельствует о значительной роли электромагнитных сил в формировании струи.

Важной особенностью исследуемых струй является малая плотность ядра струи по сравнению с плотностью окружающей среды. Это обстоятельство в условиях переходного режима обуславливает сильную диффузию атомов окружающей среды внутрь струи. Для характеристики условий проникновения атомов окружающей среды в струю можно использовать число $K_{\Pi} = l/d$, где l — длина свободного пробега атома окружающей среды при его движении поперек струи в плоскости среза источника. В режиме $G=0,1$ г/с, $I=500$ А, $B=250$ Гс для аргона и гелия $K_{\Pi} \sim 0,1$ и $0,01$ соответственно. При оценке чисел K_{Π} предполагалось, что для атома аргона определяющими являются столкновения с ионами аргона, а для атома гелия — с атомами. Различие на порядок в числах K_{Π} объясняет наблюдаемое различие в характерных размерах начального участка струй плазмы аргона и гелия при равных массовых расходах.

В условиях экспериментов распространение струи плазмы аргона уже со среза происходит в переходном режиме. Вследствие рассеяния на диффундирующих внутрь струи атомах окружающей среды электронов и ионов плазмы формируется слой с большим градиентом плотности, ограничивающий область свободного расширения. Для струй гелия в отличие от аргоновых струй в основном реализовался режим течения, близкий к сплошному. Переход к диффузному режиму происходил при $G < 0,05$ г/с.

4. Картина течения. Совокупность проведенных измерений позволяет дать приближенное описание картины течения плазмы на начальном участке. На фиг. 2 (1 — видимая граница струи, 2 — токи выноса, 3 — линии тока в зоне эжекции) для струи плазмы аргона при $G=0,1$ г/с, $I=500$ А, $B=250$ Гс и $p_{\infty}=0,3$ тора приведены данные о профилях полных напоров при осевой ориентации насадка p_0 , статического давления p , концентрации N_e и температуры T_e электронов и потенциале плазмы относительно анода ϕ в двух поперечных сечениях $x=1; 10$. Первое сечение соответствует примерно середине, второе — концу начального участка. Профили N_e , T_e и p_0 в первом сечении имеют отчетливо выраженные максимумы, соответствующие катодной струе. Монотонное уменьшение N_e в радиальном направлении при удалении от оси струи свидетельствует о соответствующем уменьшении степени ионизации. Профили T_e и ϕ имеют максимум вблизи визуально наблюдаемой границы струи. Повышение T_e в зоне смешения может быть объяснено нагревом плазмы при ее торможении. Профиль p зависит от режима источника. При больших токах и малых расходах газа вследствие сжатия наблюдается осевой максимум.



Фиг. 2

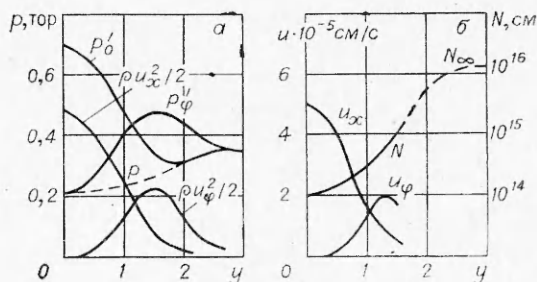
В зоне эжекции окружающей среды $p < p_\infty$ и равно в пределах точности измерений p_0 .

В сечении $x=10$ картина течения носит заметно другой характер. Произошло выравнивание профилей в приосевой области. На периферии струи пропал максимум N_e и появился максимум ϕ . Полный напор и статическое давление на оси меньше давления в окружающей среде. Основной причиной перестройки профилей газодинамических параметров является закрутка плазмы электромагнитными силами, возникающими при взаимодействии радиальной составляющей тока дуги с осевой составляющей магнитного поля.

На нижней половине фиг. 2 даны эквипотенциали электрического поля, силовые линии невозмущенного магнитного поля источника и качественная картина распространения токов выноса. Выносимая за срез источника часть тока разряда распространяется преимущественно вдоль оси симметрии внутри потенциальной ямы.

С целью получения данных о закрутке плазмы были проведены измерения полных напоров насадком поворотной конструкции. Измерения позволили также приближенно определить направление линий тока. В качестве последнего принималось направление насадка, соответствующее максимуму p_0 . Измерения полного напора насадком, ориентированным перпендикулярно оси струи в азимутальном направлении, дали профили p_ϕ , создаваемые в результате закрутки плазмы. На фиг. 3, а приведены результаты измерений p_0 и p_ϕ в поперечном сечении струи аргоновой плазмы $x=2, 5$ при $G=0,1$ г/с, $I=250$ А, $B=250$ Гс и $p_\infty=0,35$ тора. При $y=1$ вблизи видимой границы струи достигаются максимум p_ϕ и равенство p_ϕ и p_0 . Используя результаты измерений продольной скорости u_x электроразондовым методом и интеграл Бернулли, получим профили концентрации N и азимутальной скорости u_ϕ (фиг. 3, б). В приосевой области струи закрутка практически отсутствует, $u_\phi \ll u_x$,

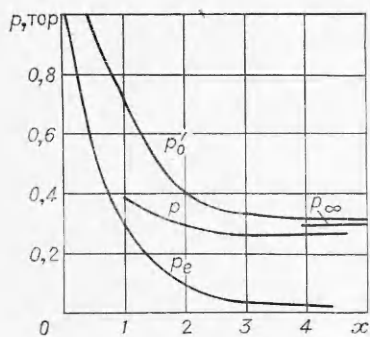
вблизи границы $u_\phi \approx u_x$. Внешняя часть струи совершает в основном вращательное движение. В зоне эжекции газ вначале движется перпендикулярно к оси струи (здесь $p'_0 \sim p \sim p'_\phi$), затем линии тока разворачиваются преимущественно в азимутальном направлении ($p'_\phi > p'_0 \sim p$) и входят в пограничный слой с резким увеличением продольной составляющей скорости.



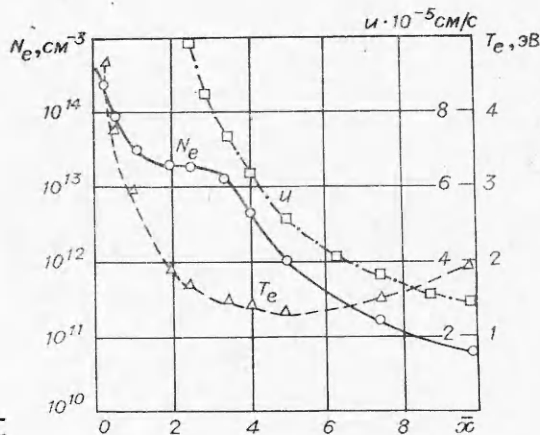
Фиг. 3

Закономерности изменения параметров в продольном направлении рассмотрим на примере струй плазмы аргона при $I=500$ А, $G=0,05$ г/с, $B=250$ Гс и $p_\infty=0,3$ тора (фиг. 4, 5). Сравнение электронного p_e и суммарного статических давлений показывает, что $p_e/p \approx 1$ вблизи среза источника и монотонно убывает вниз по струе. В камере источника и области свободного расширения струи электроны дают основной вклад в давление плазмы, поскольку ионизация полная, а температура электронов в подобных условиях существенно выше температуры ионов [10]. Уменьшение отношения p_e/p вниз по струе подтверждает вышеизложенные соображения о сильной диффузии атомов окружающей среды в ядро струи, в результате чего уже при $x \geq 1$ статическое давление на оси определяется атомной компонентой. Быстрое разрушение области свободного расширения подтверждается также величиной и ходом изменения вдоль оси отношения p'_0/p . В предположении изэнтропического течения значение p'_0/p при $x=1$ для одноатомного газа дает число Маха, равное 1,2, экспериментальная оценка которого по углу наклона присоединенного скачка уплотнения на клине с углом при вершине 20° [11] дала величину 1,5.

Связь осевых распределений N_e и T_e с газодинамической структурой струи видна на фиг. 5. Вблизи среза источника в области II (см. фиг. 1) наблюдается быстрое уменьшение N_e и T_e , соответствующее расширению плазмы. При $x \geq 2$ происходит резкое замедление падения N_e и T_e , связанное с торможением плазмы. Ниже по течению в зоне сме-



Фиг. 4



Фиг. 5

шения N_e падает до величины порядка 10^9 см^{-3} , соответствующей концентрации электронов в вакуумной камере. В конце начального участка наблюдается тенденция к росту T_e . Аналогичные результаты были получены при исследовании струй электротермических источников [2].

По данным измерений скорости u_x энергия направленного движения ионов аргона вблизи среза источника достигает 20—30 эВ и имеет порядок напряжения на источнике. Поскольку температура электронов в камере МПДИ не превышает 10 эВ, наблюдаемые скорости плазмы не могут быть объяснены электронно-термическим механизмом и свидетельствуют наряду с приведенными выше факторами в пользу существенности электромагнитных эффектов в формировании начального участка струй плазмы МПДИ.

Поступила 4 XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдфарб В. М., Ильина Е. В., Костыгова И. Е., Лукьянов Г. А., Силантьев В. А. Исследование сверхзвуковой струи разреженной аргоновой плазмы.— ПМТФ, 1967, № 1.
2. Лукьянов Г. А., Петухов Г. В. Зондовые измерения в разреженной струе плазмы.— ТВТ, 1969, № 5.
3. Patrick R. M., Schneiderman A. M. Performance characteristics of a magnetic annular arc.— «AIAA J.», 1966, vol. 4, N 2. Рус. пер. Некоторые характеристики ускорителя с магнитной кольцевой дугой.— «Ракетн. техника и космонавтика», 1966, т. 4, № 2.
4. Krause S. Investigation of an MPD plasma jet by gasdynamic experimental methods.— «AIAA J.», 1969, vol. 7, N 3. Рус. пер. Исследование МПД струи методами экспериментальной газодинамики.— «Ракетн. техника и космонавтика», 1969, т. 7, № 3.
5. Гольдфарб В. М., Ильина Е. В., Лукьянов Г. А., Сахин В. В. Закономерности заселения уровней гелия и водорода в струе МПД источника. XXVI Герценовские чтения. Научные доклады ЛГПИ им. А. И. Герцена. Физическая и полупроводниковая электроника, ч. I, 1973.
6. Гольдфарб В. М., Ильина Е. В., Лукьянов Г. А., Сахин В. В. Спектроскопические исследования струи плазмы аргона МПД источника. XXVII Герценовские чтения. Научные доклады ЛГПИ им. А. И. Герцена. Физическая электроника, ч. II, 1974.
7. Чен Ф. Диагностика плазмы. М., «Мир», 1967.
8. Soini A. A. Free-molecule Langmuir probe and its use in flowfield studies.— «AIAA J.», 1966, vol. 4, N 9. Рус. пер. Свободномолекулярный зонд Ленгмюра и его применение для исследования поля течения.— «Ракетн. техника и космонавтика», 1966, т. 4, № 9.
9. Burlock J., Brockman P., Hess R., Brooks D. Measurement of velocities and acceleration mechanism for coaxial hall accelerators.— «AIAA J.», 1967, vol. 5, N 3. Рус. пер. Измерение скорости и механизм ускорения в коаксиальных ускорителях на токах Холла.— «Ракетн. техника и космонавтика», 1967, т. 5, № 3.
10. Плазменные ускорители. Под. ред. акад. Л. А. Арцимовича. М., «Машиностроение», 1973.
11. Козлов Н. П., Лесков Л. В., Протасов Ю. С., Хвезюк В. И., Яминский В. В. Измерение числа Маха в плазменных струях.— ТВТ, 1974, т. 12, вып. 4.