

В практике используются также конические струи, вытекающие из радиальной щели, характеризуемой полярным углом  $\beta < 2\pi$ , так называемые "неполные" радиально-щелевые струи. Для расчёта характеристик таких струй в меридиональных сечениях, не слишком близких к краям струи, можно воспользоваться выражениями (22)-(25), если заменить в них  $2\pi$  на  $\beta$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л. Г. Радиально-щелевая струя в пространстве, заполненном той же жидкостью. Труды ЛПИ, № 5, 1953.
  2. Гиневский А. С. Радиально-щелевая струя, истекающая из кольцевого источника конечного диаметра. "Промышленная аэродинамика", вып. 23, 1962.
  3. Гиневский А. С. Метод интегральных соотношений в теории турбулентных струйных течений. "Промышленная аэродинамика", вып. 27, 1966.
  4. Шахов В. Г. Слабозакрученная радиально-щелевая струя, истекающая из кольцевого источника конечного диаметра. ИФЖ, 16, № 3, 1969.
  5. Поляков Е. И. Экспериментальное исследование симметричных турбулентных струй. ЖТФ, 30, № 10, 1960.
- В. Ф. Сивиркин, Ю. В. Мосеев, Н. М. Рогачев, А. Е. Жуковский,  
А. П. Аleshин, С. А. Паялка

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ, СОВМЕЩЕННОЙ СО СТОЛБВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Плазменные струи, совмещенные со столбом электрической дуги, широко используются при плазменной резке, плавке, сварке металлов и других технологических процессах, работы [1, 2, 3]. Интерес к ним обусловлен еще и тем, что процессы взаимодействия дуги со свободной струей во многих чертах напоминают процессы, протекающие в каналах многих типов плазмотронов.

В настоящее время имеется мало работ, посвященных исследова-

нию струи с дугой, а между тем, отсутствие стенок существенно упрощает многие измерения.

Различными авторами экспериментально определялось распределение потенциала и напряженности электрического поля вдоль столба дуги, работ приведены в [8]. Лофиле температур [6,7], профили динамических напоров и скоростей [7]. Результаты теневых исследований приведены в [8].

В теоретическом плане эта задача не имеет сколько-нибудь удовлетворительного решения.

В данной работе экспериментально определялась теневая структура струи и осевые распределения потенциалов и динамических напоров. Произведено также критериальное обобщение опытных данных.

Экспериментальная установка, описанная в работе [9], состояла из плазмотрона с вольфрамовым катодом и медным соплом диаметром 6 мм и кольцевого анода. Анод устанавливался на координатнике с электроприводом, что позволяло изменять расстояние  $l$  между анодом и срезом сопла плазмотрона. Схематически экспериментальная установка представлена на рис. 1. В качестве рабочего тела использовался аргон. Все эксперименты проведены при  $l = 80$  мм.

Расход газа  $G$  изменялся в пределах  $2,0 \pm 4,3$  г/с, ток дуги  $I$  -  $300 \pm 450$  А. В указанном диапазоне изменения параметров установка могла устойчиво работать в течение длительного времени.

Теневая структура струи с дугой исследовалась с помощью прибора ИАБ-451. Регистрация теневой картины осуществлялась с помощью фотоаппарата "Зенит-Е" и сверхскоростного фоторегистратора СФР-1М. Анализ снимков показал, что струя имеет ярко выраженный турбулентный характер и угол раскрытия

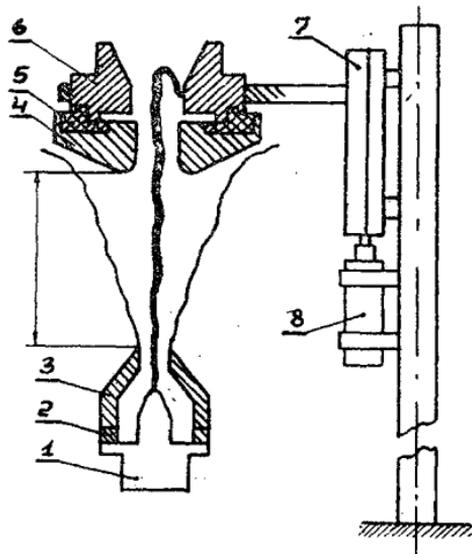


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1-катод; 2-изолятор; 3-сопло; 4-нейтральный насадок; 5-изолятор; 6-анод; 7-координатник; 8-электромотор

существенно превышает угол раскрытия холодных струй. В среднем полный угол раскрытия теневой границы струи составлял  $\sim 40^\circ$ . С ростом тока и уменьшением расхода газа наблюдалось некоторое увеличение этого угла (так как оба фактора приводят к увеличению температуры струи).

Распределение потенциала вдоль столба электрической дуги определялось с помощью гребенки потенциальных зондов, быстро проносимой через столб дуги. Регистрация сигнала осуществлялась с помощью шлейфового осциллографа К-20-21. Результаты обработки осциллограммы представлены на рис. 2. Там же показана кривая

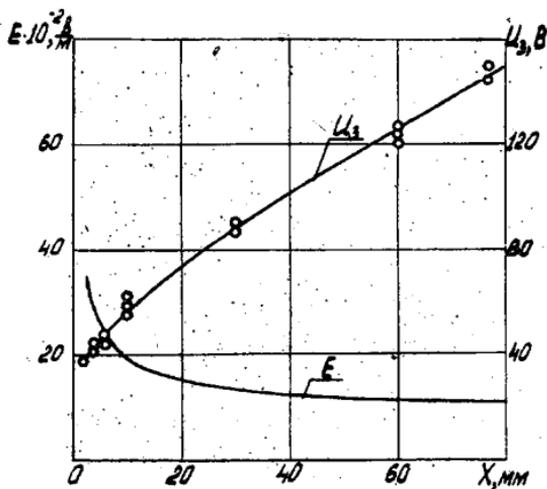


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля и потенциала по длине дуги.  $J = 350$  А,  $G = 2$  г/с.

изменения напряженности электрического поля вдоль столба дуги, полученная методом графического дифференцирования кривой потенциала. Уменьшение напряженности при удалении от среза сопла объясняется затуханием струи, обусловленным турбулентным перемешиванием с окружающей средой и связанным с этим уменьшением ее стабилизирующего влияния на дуговой разряд.

Исследование распределения динамических напоров в осевом и радиальном сечениях струи

осуществлялось методом "проноса" системы, включающей высокочастотный датчик давления типа ЛХ-419 с регистрацией показаний через усилитель ЛХ-5515 на электронный осциллограф. Скорость проноса системы выбиралась из условия отсутствия динамических искажений в тракте подвода давления к чувствительному элементу первичного преобразователя. Выбор параметров тракта подвода давления и расчет его динамичности проведен по методике, изложенной

в работе [10], а экспериментальная проверка динамической точности осуществлялась при холодных продувках исследуемой системы. На рис.3 показано осевое распределение динамических напоров в плазменной струе, совмещенной со столбом электрической дуги.

Экспериментальные результаты, полученные в данной работе, обобщались с помощью критериального уравнения. Наиболее важными критериями, используемыми для описания электрических дуг, стабилизированных потоком газа, являются критерий напряженности электрического поля  $\pi'_1 = \frac{\sigma E d^2}{J}$ , полученный из закона Ома, и энергетический критерий  $\pi'_2 = \frac{J^2}{\sigma l G d}$ ,

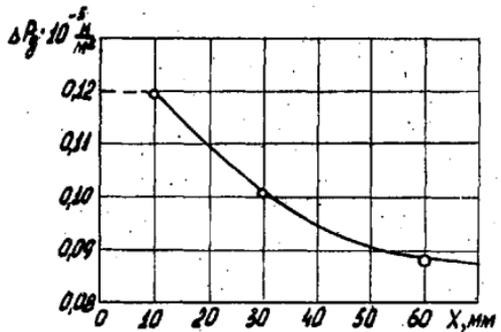


Рис.3. Распределение динамических напоров по оси струи  $J = 350 \text{ А}$ ,  $G = 2 \text{ г/с}$

вытекающий из уравнения энергии, записанного с учетом Джоулева тепловыделения. Многократно было показано, что применение этих критериев для дуг, горящих в каналах и обдуваемых продольным или закрученным потоком газа, дает хорошие результаты, работы [11, 12]. Входящие в  $\pi'_1$  и  $\pi'_2$  величины имеют следующий смысл:  $E$  - напряженность электрического поля дуги;  $J$  - ток дуги;  $G$  - массовый расход газа;  $\sigma$  и  $l$  - характерные для каждого газа значения удельной электропроводности и удельной энтальпии;  $d$  - характерный линейный размер.

Для дуг, горящих в каналах, под характерным линейным размером обычно понимают диаметр канала. Расход газа при этом остается постоянным в любом поперечном сечении канала (если не иметь в виду плазматроны с распределенной подачей газа).

Иначе обстоит дело в случае свободной струи, совмещенной со столбом электрической дуги. Здесь за характерный линейный размер целесообразно принять радиус наружной границы струи  $y_2$ . Кроме того, из теории струй известно, что расход газа через произвольное сечение основного участка струи пропорционален квадрату радиуса наружной границы струи. На этом основании можно записать:

$$G_x \sim G \frac{y_2^2}{d^2},$$

где  $G_x$  - расход газа через произвольное сечение струи;  
 $G$  - расход газа через срез сопла плазмотрона;  
 $d$  - диаметр среза сопла.

Учитывая, что  $y_2$  пропорционален расстоянию  $x_n$  от полюса струи до данного сечения, вместо  $\pi_1'$  и  $\pi_2'$  получим

$$\pi_1'' = \frac{\sigma E x_n^2}{j}; \quad \pi_2'' = \frac{j^2 d^2}{\sigma i G x_n^3}.$$

Если род плазмообразующего газа и геометрии плазмотрона неизменны, то для упрощения вычислительной работы вместо  $\pi_1''$  и  $\pi_2''$  можно использовать размерные комплексы:

$$\pi_1 = \frac{E x_n^2}{j}; \quad \pi_2 = \frac{j^2}{G x_n^3}.$$

На рис. 4. представлена зависимость  $\lg \pi_1$  от  $\lg \pi_2$ . Положение полюса находилось из теневых фотографий струи, а напряженность поля в каждом сечении - из зондовых измерений. Диапазон изменения расходов газа составлял  $2,0 + 4,3 \text{ г/с}$ , силы тока  $300 + 450 \text{ А}$ , расстояния от среза сопла -  $10 + 70 \text{ мм}$ .

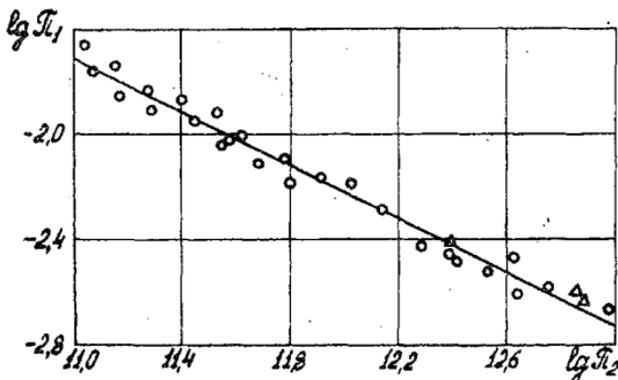


Рис. 4. Обобщенная вольт-амперная характеристика электрической дуги, обдуваемой потоком газа  
 о - опыты авторов,  $\Delta$  - опыты из работы [5]

Экспериментальные точки удовлетворительно группируются вокруг прямой, соответствующей уравнению

$$\frac{E x_n^2}{J} = 6160 \left( \frac{J^2}{G x_n^3} \right)^{-0,502}$$

Из уравнения видно, что напряженность почти не зависит от силы тока, т.е. для подобных дуг вольт-амперные характеристики имеют вид почти горизонтальных кривых.

На основе полученного в данной работе уравнения и известных струйных закономерностей можно определить все основные газодинамические и электрические параметры в любой точке струи, совмещенной со столбом электрической дуги.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев К.В. Газоэлектрическая резка металлов. Машгиз, М., 1963.
2. Быховский Д.Г. Газоэлектрическая резка металлов в судостроении. "Судостроение", 1964.
3. Вайнбойм Д.И., Гольдфарб В.М., Юрк А.Д. Сжатая воздушная дуга и ее технологические применения. В сб. "Генераторы низкотемпературной плазмы". Труды III Всесоюзной научно-технической конференции по генераторам низкотемпературной плазмы. "Энергия", М., 1969.
4. Васильев К.В. О некоторых свойствах проникающей режущей дуги. Труды ВНИИ АВТОГЕНМАШ, вып. VII, 1960.
5. Муркин Л.П. Измерение напряженности поля в проникающей дуге. "Сварочное производство", № 12, 1966.
6. Муркин Л.П. Температура в дуге с вынужденной конвекцией. Труды КуАИ, вып. 22, 1965.
7. Гольдфарб В.М., Гуревич Б.Н., Юрк А.Д. Исследование некоторых контактных методов измерения тепловых потоков и температуры плазмы. Теплофизические свойства низкотемпературной плазмы. "Наука", 1970.
8. Дубровин В.М., Лебедев А.Д., Урюков Б.А., Фридберг А.Э. Электрическая дуга в затопленной газовой струе. ПМТФ, № 5, 1971.
9. Мосеев Д.В. Экспериментальная установка для исследования

плазменной струи, совмещенной со столбом электрической дуги. Материалы научно-технической конференции КуАИ, 1972.

10. Жуковский А.Е., Мильштейн И.И., Пинес В.Н. Особенности применения первичных преобразователей давления в условиях повышенных вибраций. "Измерительная техника". № 10, 1969.
11. Жидович А.И., Ясько О.И. Некоторые вопросы обобщения вольт-амперных характеристик обдуваемых электрических дуг. ИФЖ, том XVI, № 3, 1969.
12. Даутов Г.Ю., Жуков М.Ф. Критериальное обобщение характеристик плазмотронов вихревой схемы. ПМТФ, № 6, 1965.

В.Я. Давыдов, Г.В. Филиппов

## О РАВНОВЕСИИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ В СЛАБЫХ СИЛОВЫХ ПОЛЯХ

Одной из основных задач механики жидкости в слабых гравитационных полях является задача об определении равновесных форм. Общая задача - установление формы границы раздела жидкость - газ с учетом сил поверхностного натяжения - была поставлена в прошлом веке в связи с исследованием капиллярных явлений. Первоначально были определены форма мениска в капилляре, форма капли. Ряд работ о равновесных формах двухфазных сред в замкнутом объеме, подверженных действию капиллярных и гравитационных сил, был опубликован в последнее десятилетие советскими [1,2,3,4 и др.] и зарубежными [5,6,7 и др.] учеными.

Ниже в общем виде сформулирована задача о равновесии жидкости в том случае, когда кроме указанных выше сил действует поверхностная сила на границу раздела. Получено в конечном виде решение простейшей плоской задачи о равновесной форме поверхности при действии капиллярных сил и плоского однородного силового поля, обуславливающего возникновение поверхностной силы, пропорциональной квадрату косинуса между силовыми линиями и поверхностью раздела.

1. Уравнения равновесия. Рассмотрим сосуд, неподвижный относительно системы координат, движущийся с малой осевой перегруз-