

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА В ЗАТОПЛЕННОЙ ГАЗОВОЙ СТРУЕ

*В. М. Дубровин, А. Д. Лебедев, Б. А. Урюков
А. Э. Фридберг*

(Новосибирск)

Приведены результаты фотографических исследований поведения электрической дуги в затопленной газовой струе, полученные обычным методом и методом теневых фото- и киносъемок. Отмечается взаимодействие дуги с турбулентной частью струи и развитие возмущений дуги и теплового слоя около дуги в зависимости от начальной скорости струи.

Экспериментально полученные значения протяженности ламинарной зоны горения дуги, радиуса теплового слоя дуги и напряженности электрического поля сопоставляются с результатами расчетов.

В ряде последних работ [1-2], посвященных исследованию характеристик продольно обдуваемой электрической дуги, было показано, что имеется значительное влияние турбулентности потока газа на локальные характеристики дуги¹.

Однако выводы основывались на изучении интегральных характеристик без детального рассмотрения процесса взаимодействия дуги с турбулентным потоком газа и причин, обуславливающих появление неустойчивости дугового столба (шнура).

Проведение подобного рода исследований на реальных конструкциях затруднено из-за наличия стенок канала. В связи с этим проводились исследования свойств и поведения дуги, горящей в свободной струе. В работе [3] было показано, что стабильность горения дуги определяется, вообще говоря, уровнем турбулентности потока. Для создания малотурбулентной свободной струи была изготовлена специальная установка, позволяющая получать затопленную струю газа с уровнем турбулентности $\epsilon \sim 0.5 \div 4\%$ в диапазоне скоростей $v = 10 \div 300$ м/сек. На оси струи зажигалась электрическая дуга.

1. Схема установки, на которой проводились все описываемые ниже эксперименты, приведены на фиг. 1; она состоит из форкамеры 1 со сменным соплом 2, укрепленным на оси камеры катода 3, подвижного анода 4 с изоляционным покрытием 5, координатника 6 и водяного реостата 7.

Форкамера была выполнена с учетом требований, предъявляемых к форкамерам аэродинамических труб, и состояла из входного коллектора *a*, обеспечивающего равномерность ввода газа в камеру; хонейкомба *b* толщиной 20 мм и диаметром отверстий 3 мм; пяти сеток *v* с размером ячейки 0.5×0.2 ; сменного выходного сопла 2, выполненного по кривой Витошинского. Диаметр камеры 186 мм, диаметр выходного сопла во всех экспериментах, описанных ниже, составлял 30 мм.

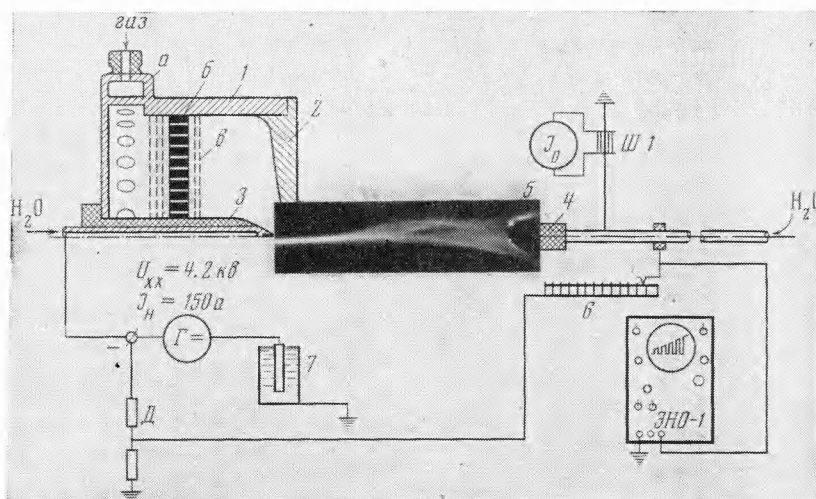
На оси камеры располагался специальным образом спрофилированный медный водоохлаждаемый катод с впрессованной в его торец циркониевой проволокой $d = 2$ мм. Катод был смещен в глубь камеры (от среза сопла) на 15 мм.

¹ Frind G. Electric arcs in turbulent flows, I. ARL, pp. 64—148, 1964.

Специальная форма катода и заглубление его обеспечили минимальные возмущения потока от центрального тела, которым в данном случае являлся катод.

При помощи термоанемометра системы «Диза» измерялись профили скоростей и уровни турбулентности; датчик — позолоченная вольфрамовая нить $d = 5$ и $l = 2$ мм; погрешность измерения скорости $2 \div 3\%$ в диапазоне $11 \div 60$ м/сек и $4 \div 6\%$ в диапазоне $60 \div 120$ м/сек.

Результаты измерений показали, что уровень турбулентности на оси струи (в ядре) не превышает 4% (минимальный 0.3%), а профили скорости достаточно близко совпадают с данными расчетов, проведенных следуя ра-



Фиг. 1

ботам [4,5]. Совпадение расчетных профилей с измеренными позволило в дальнейшем использовать известные соотношения [4,5] для определения положения границы ядра потока.

Подвижный анод 4 был выполнен из меди и охлаждался водой. Форма анода была выбрана из условия обеспечения минимального возмущения потока. Рабочая поверхность анода, по которой перемещалось анодное пятно, была равна 15 мм.

Поджиг дуги осуществлялся сведением электродов до соприкосновения и последующим отводом анода с помощью пружинного привода.

Во время экспериментов можно было производить измерения расхода газа (с помощью мерных сопел), тока и напряжения дуги, а также осциллографирование напряжения как во время работы, так и в момент растягивания дуги при поджиге. Напряжение в течение времени отвода анода подавалось на осциллограф через специальный координатник, что позволило получить данные по напряженности электрического поля.

Основной задачей на данном этапе работ было исследование поведения дуги в затопленной струе, ее стабильности относительно оси потока и причин, обуславливающих ее нестабильность.

Для этого применялась киносъемка аппаратом СКС-1М, скоростная фотография поперечных колебаний дуги с помощью камеры СФР в режиме фоторазвертки, обычная фотография и теневая фото- и киносъемка дуги.

В качестве источника света при теновом фотографировании использовалась лампа ИШ-5 с энергией вспышки ~ 4 дж и временем экспозиции 5 мксек. При киносъемке теневой картины в качестве источника использовался газовый лазер ЛГ-75. Киносъемка велась со скоростью 4000 кадров/сек. При фотографировании использовался светофильтр СС-4. При киносъемке теневой картины применялся интерференционный фильтр.

Кадры, полученные обычным методом, с помощью теневой установки, и последовательные кадры киносъемки приведены на фиг. 2, а, б, в.

2. Проведенные исследования показали, что в свободной малотурбулентной струе возможно устойчивое горение дуги. СФР-граммы, снятые (при $I = 100$ а, $G = 60$ г/сек) в различных сечениях ($s = 50, 100, 170$ мм, считая от среза сопла) по длине дуги, показывают, что в начальной зоне (фиг. 3, а) отклонение дуги от оси потока не улавливается в диапазоне скоростей съемки 4000 ± 200 кадров/сек. При сдвиге вниз по потоку неустойчивость дугового столба увеличивается, что видно из последующих СФР-грамм (фиг. 3, б, в).

Теневые фотографии позволяют определить некоторую границу теплового слоя около дуги (дугового слоя), а именно область, где происходит резкое изменение плотности среды.

Оценка местоположения максимального градиента плотности по профилям энтальпии — по аппроксимирующему полиному четвертой степени [2] и рассчитанному численным методом [5,6] — показывает, что эта точка расположена достаточно близко (с погрешностью не более 10%) к границе дугового слоя, где происходит переход к энтальпии окружающей среды. Следовательно, по теневым фотографиям можно судить о поведении границы дугового слоя. При относительно небольших скоростях потока (до ~ 20 м/сек) граница дугового слоя на некотором начальном участке представляет собой гладкую монотонную кривую.

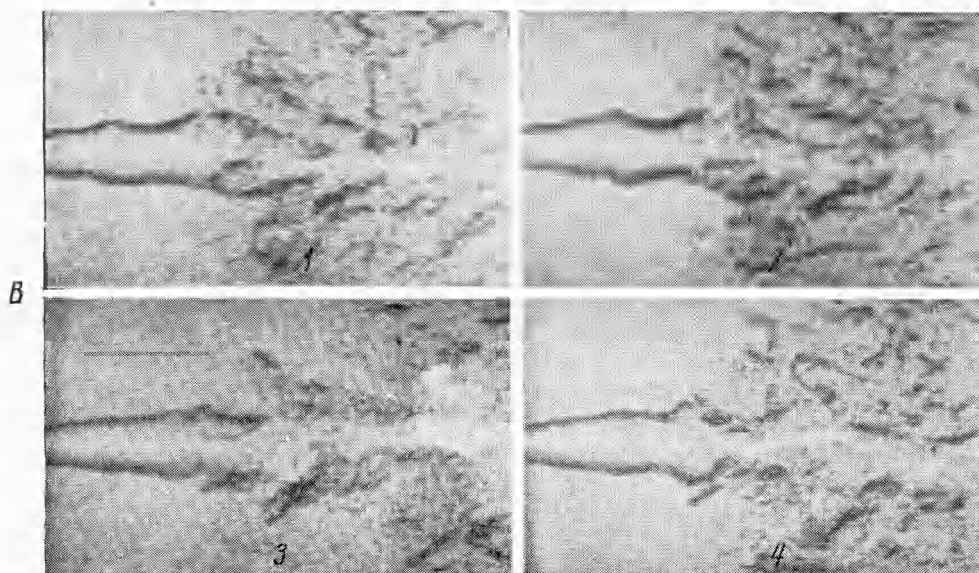
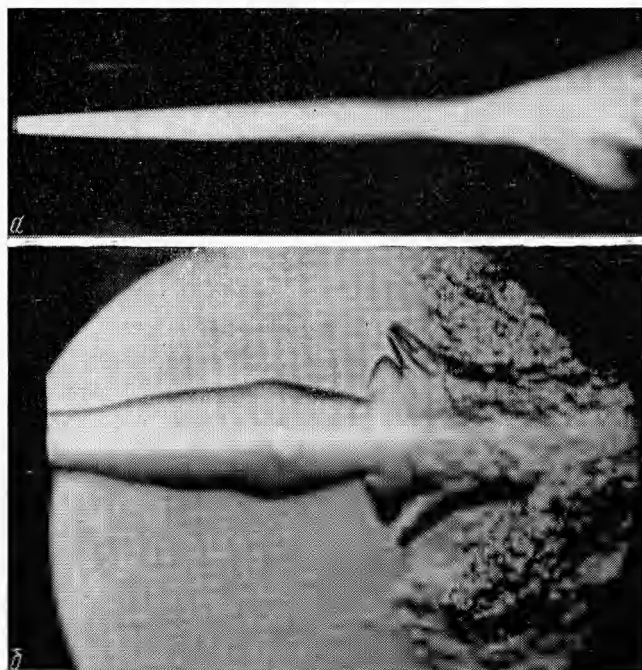
С ростом скорости граница начинает подвергаться периодическим, по-видимому, близким к осесимметричным возмущениям, которые в дальнейшем теряют симметричность и на которые накладываются более мелкие возмущения, все глубже проникающие внутрь дугового слоя.

Скоростная киносъемка показывает, что кроме возмущений границы дугового слоя имеют место периодические локальные возмущения дугового столба, пробегающие по всей длине дуги в направлении потока. Эти возмущения также становятся заметными лишь начиная с некоторой пороговой скорости. Тем не менее столб дуги на некоторой длине в среднем остается прямолинейным.

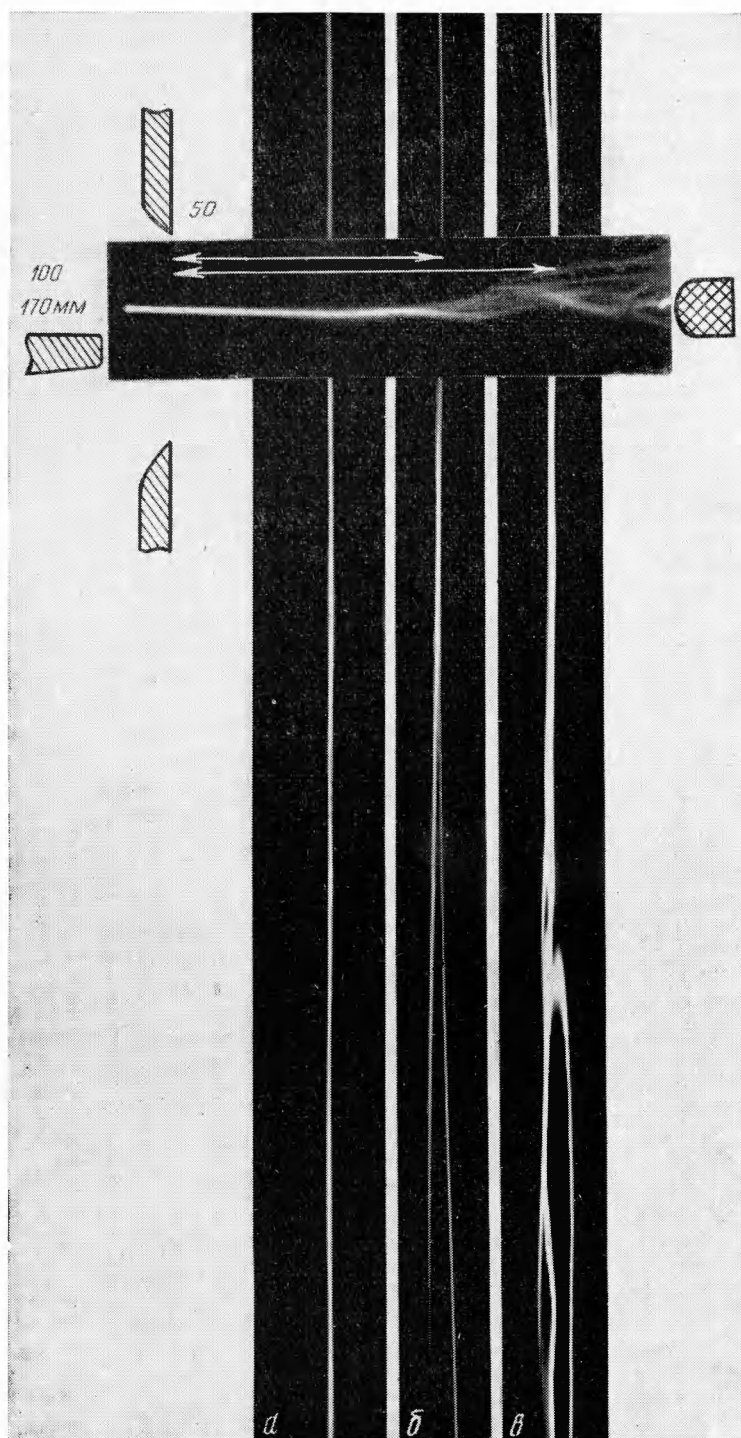
Во всех случаях на некотором расстоянии от среза сопла происходит резкое перемешивание массы газа дугового слоя с окружающей средой. Этот процесс, как показывает скоростная киносъемка, носит «взрывной» характер и напоминает иллюстрации классических опытов Рейнольдса с окрашенной струйкой в потоке жидкости.

Последнее явление несомненно есть следствие взаимодействия дугового слоя с турбулентной областью струи. Это подтверждается также тем, что точка начала разрушения дугового слоя приблизительно совпадает с точкой пересечения теоретической границы ядра потока с экспериментальной границей дугового слоя. На несколько большем расстоянии от начала дуги хаотические колебания начинает испытывать столб дуги.

С ростом скорости эти точки — точка разрушения дугового слоя и точка начала турбулентных колебаний дуги — сближаются. Это видно из фиг. 4, где приведены значения x_0' и x_0 — расстояния от среза сопла до указанных точек (кривые 1 и 2 — экспериментальные значения, соответственно x_0' и x_0 ; кривая 3 — теоретическое значение x_0).



Фиг. 2



Фиг. 3

Интересно, отметить, что x_0 — длина существования прямолинейного столба дуги, при малых скоростях растущая эквидистантно x'_0 , при больших скоростях начинает уменьшаться. Это, по-видимому, обусловлено возникновением и развитием упомянутых возмущений границы дугового слоя, которые постепенно начинают затрагивать и токонесущую часть дугового слоя — собственно столб дуги.

Проведено сопоставление теоретических решений [2,5] с экспериментальной границей дугового слоя, приведенное на фиг. 5, где нанесено решение для границы дуги, полученное интегральным методом [2] (кривая 1)

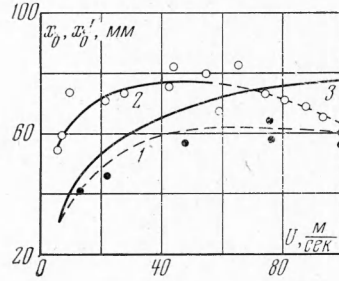
$$\eta = 7.2\xi^{0.339} \quad (2.1)$$

и аппроксимация линии наибольшего градиента плотности, рассчитанной численным методом [5] (кривая 2)

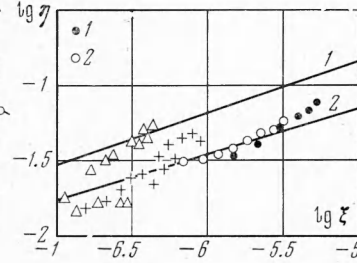
$$\eta = 2.82\xi^{0.315}$$

$$\bar{\eta} = \frac{2\pi\epsilon}{I} \sqrt{\frac{\lambda_0 h_0 \sigma_0}{c_{p_0}}}, \quad \xi = \frac{z h_0 \sigma_0 \lambda_0^2 4\pi^2}{I^2 \rho_\infty u_\infty c_{p_0}^2} \quad (2.2)$$

Здесь λ_0, h_0, c_{p_0} — характерные значения теплопроводности, энтальпии, теплоемкости (принимались значения для свободного потока); σ_0 — характерное значение электропроводности (принималось равным 436 мО/м [2,6]);



Фиг. 4



Фиг. 5

ρ_∞, u_∞ — плотность и скорость свободного потока; I — сила тока; z — осевая координата, отсчитываемая от электрода, находящегося внутри сопла; δ — радиальный размер дугового слоя; точки 1, 2, +, Δ соответствуют значениям $U = 12.0, 24.8, 62.0, 124.0$ м/сек.

Видно, что последняя зависимость неплохо удовлетворяет эксперименту. Разброс точек при больших скоростях потока обусловлен наличием описанных волнообразных возмущений границы дугового слоя. Теоретическая зависимость проходит в основном между точками горбов и впадин экспериментальной границы дугового слоя.

Для теоретического определения точки разрушения дугового слоя находилось пересечение кривых (2.2) для различных скоростей внешнего потока с границей ядра потока, заданной формулой [4]

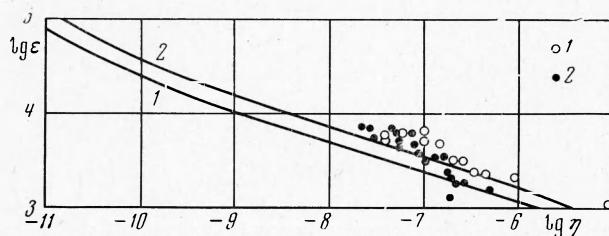
$$y = -\frac{a}{0.67}(z - z_0) + R \quad (2.3)$$

где z_0 — углубление электрода внутрь сопла ($z_0 = 15$ мм); R — радиус сопла ($R = 15$ мм); a — экспериментальная постоянная ($a = 0.07$).

Результат расчета, приведенный на фиг. 4, показывает хорошую сходимость теории и эксперимента при малых скоростях внешнего потока.

При больших скоростях экспериментальные данные лежат ниже теоретических, что, очевидно, является следствием возмущений дугового слоя, приводящих к более раннему взаимодействию с турбулентной областью струи.

Экспериментальные данные по напряженности электрического поля сравнивались с теоретическими зависимостями для дуги в безграничном потоке воздуха [2,5], что отражено на фиг. 6, где кроме полученных в этой



Фиг. 6

работе приведены результаты измерений напряженности поля в начальном участке цилиндрического канала [6,7], на котором можно пренебречь влиянием стенок (кривая 1 получена численным методом, кривая 2 — интегральным; экспериментальные точки 1 — для дуги в канале, точки 2 — в струе). Экспериментальные данные хорошо согласуются как с численным, так и с интегральным решением.

Поступила 9 X 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Колонина Л. И., Урюков Б. А. Напряженность электрической дуги в области взаимодействия с турбулентным пограничным слоем в плазмотроне с вихревой стабилизацией. Изв. СО АН СССР, Сер. техн., 1968, № 13, вып. 3.
2. Лебедев А. Д., Урюков Б. А., Фридберг А. Э. Продольно обдуваемая электрическая дуга в цилиндрическом канале. В сб. «Генераторы низкотемпературной плазмы», М., «Энергия», 1969.
3. Трохан А. М. Фотографическое исследование пульсаций в плазмотронах с воздушной стабилизацией. ПМТФ, 1964, № 2.
4. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М., Гостехиздат, 1953.
5. Ведерников Г. А., Урюков Б. А. Численный расчет электрической дуги в потоке воздуха. В сб. «Вопросы физики низкотемпературной плазмы», Минск «Наука и техника», 1970.
6. Васильковская А. С., Колонина Л. И., Лебедев А. Д., Смоляков В. Я. Распределение напряженности электрического поля по длине продольно-обдуваемой дуги в плазмотроне постоянного тока. ПМТФ, 1967, № 1.
7. Колонина Л. И., Смоляков В. Я. Продольно обдуваемая электрическая дуга в разных газах. В сб. «Генераторы низкотемпературной плазмы», М., «Энергия», 1969.