

В. В. ЛЕБЕДЕВА, Н. П. РОМАНОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В УГОЛЬНОЙ ДУГЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Концентрация электронов в угольной дуге переменного тока, горящей в воздухе, определялась по ширине линии  $H_{\beta}$ . Водород поступал в дугу при смачивании нижнего электрода водой. Измерены концентрации электронов в центре дуги при токах от 2,5 до 9 а и расстояниях между электродами от 1 до 4 мм, а также в различные фазы горения дуги с разрешением по времени  $5 \cdot 10^{-4}$  сек. Определена температура разряда. Введение водорода в угольную дугу возможно также пропиткой электродов раствором какого-либо вещества, содержащего кристаллизационную воду.

Концентрация электронов  $N_e$  в плазме при  $N_e = 2 \cdot 10^{15} \div 10^{17}$  см<sup>-3</sup> спектроскопически наиболее надежно определяется по уширению спектральных линий при Штарк-эффекте. Этот метод применим и в случае отсутствия термического равновесия. Определение концентрации электронов по контуру линии  $H_{\beta}$  с использованием теории Хольтсмарка проводилось неоднократно [1, 2, 3, 7]. Гримом, Колбом и Шеном [4] дан более точный квантовомеханический расчет контура линий водорода как функции концентрации электронов и температуры. В работах [5] получено совпадение экспериментальных контуров водородных линий с теоретическими в пределах  $\sim 10\%$  и сделан вывод о возможности определения  $N_e$  не только по контуру, но и по полуширине водородных линий. Там же приведены графики зависимости полуширины линии  $H_{\beta}$  от  $N_e$  для температур 10 000, 20 000 и 40 000° К.

Слабая зависимость полуширины линии  $H_{\beta}$  от температуры позволяет пользоваться расчетами, проведенными всего лишь для нескольких температур. На рис. 1 приведена зависимость  $N_e$  от полуширины линии  $H_{\beta}$  для  $T = 10\ 000^\circ$  К.

Если найдена концентрация электронов и в плазме имеется термическое равновесие, при помощи уравнения Саха

$$\frac{N_i}{N_0} N_e = \frac{2u_i}{u_0} \cdot \frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{\chi}{kT}}$$

можно определить температуру однокомпонентной плазмы [6]. Здесь  $\frac{u_i}{u_0}$  — отношение статистических сумм для ионов и нейтральных атомов газа,  $\chi$  — ионизационный потенциал газа. Если плазма имеет сложный состав, в качестве  $\chi$  следует принять эффективный ионизационный потенциал плазмы. Для всей плазмы можно считать  $N_i = N_e$ , а  $N_0$  определять из уравнения состояния идеального газа, считая приближенно тем-

пературу плазмы  $T=10^4$  К. Определение температуры таким путем является надежным, так как концентрация электронов очень чувствительна к изменению температуры.

Линии водорода появляются в спектре угольной дуги обычно либо при искусственном введении водорода в плазму, либо в сильноточной дуге, где температура достаточно высока и хорошо возбуждается водород, имеющийся в воздухе. Так, Меккер [1] в угольной дуге, горящей в воздухе при силе тока 200 а, получил  $N_e=7,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Юргенс [2] в дуге с водяной стабилизацией при силе тока 50 а получил  $N_e=8,4 \cdot 10^{16}$ . Измерив температуру различными методами, он показал также, что в дуге с водяной стабилизацией существует термическое равновесие, что позволяет для подсчета  $T$  пользоваться уравнением Саха. Бюген [3] в аналогичной дуге получил результаты, приведенные в таблице.

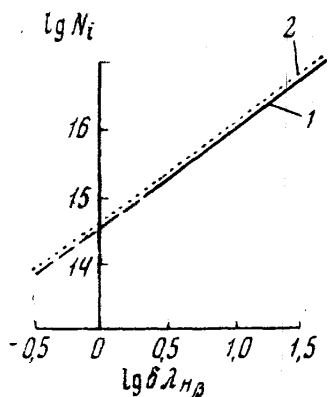


Рис. 1. Теоретическая зависимость полуширины линии  $H_{\beta}$  от концентрации электронов для  $T=10\ 000^\circ \text{ К}$ . 1 — по теории [4], 2 — по теории Хольтсмарка

Ток, а	Полуширина, Å	$T^\circ \text{ К}$	$N_e$
15	16	10 400	$2,1 \cdot 10^{16}$
50	31	12 000	$5,8 \cdot 10^{16}$
60	34	12 300	$7 \cdot 10^{16}$
250	63	15 500	$18 \cdot 10^{16}$

Он показал, что для  $H_{\beta}$  можно пренебречь поглощением в слое плазмы, т. е. считать плазму оптически тонким слоем. Поправка на поглощение превышает 15% только при  $I=250$  а. Концентрация электронов в водородной дуге с металлическими электродами измерялась в [7]. При силе тока 20 а получено  $N_e=7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $T=12\ 500^\circ \text{ К}$ .

В воздушной угольной дуге малой силы тока температура измерялась Хорманом [8], который, учтя электрические характеристики дуги, по уравнению Саха определил  $N_e=2,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация электронов в угольной дуге определялась Даниловой [9] по линии лития 4133 Å в предположении, что эта линия обладает квадратичным Штарк-эффектом. В работе [10] показано, что эта линия обладает линейным Штарк-эффектом, и даны уточненные значения величин расщепления.

Концентрацию электронов можно определять по линиям различных элементов, для которых известны параметры уширения, однако эти расчеты выполнены только для некоторых атомов (например, для цезия, аргона [11]).

В настоящей работе концентрация электронов определяется по полуширине линии  $H_{\beta}$  в угольной дуге переменного тока при малых силах тока ( $I_{\text{эфф}}$  до 12 а). Обычно линии водорода в такой угольной дуге не появляются, однако в некоторых условиях удавалось наблюдать линии водорода, кислорода и азота в начальные моменты всплеск дуги переменного тока [12].

### Методика измерений

Спектр дуги переменного тока исследовался во времени с помощью трехпризменного спектрографа СФК-1, предназначенного для регистрации спектров на движущуюся пленку. Использовалась аэрофотопленка

с чувствительностью 1000 ед. ГОСТ. Высота щели спектрографа при развертке была 1 мм, что при скорости пленки 2 м/сек давало разрешение по времени  $5 \cdot 10^{-4}$  сек или  $9^\circ$  по фазе переменного тока.

Дуга с вертикально расположенными угольными электродами питалась от генератора ДГ-1 в обычном дуговом режиме. При исследовании поперечного распределения свечения линий изображение дуги поворачивалось на  $90^\circ$  поворотной призмой. При всех съемках изображение дуги фокусировалось на щель.

Высокая чувствительность пленки позволяла при исследованиях поперечного распределения свечения линий (т. е. при съемках на неподвижную пленку) применять выдержки порядка  $10^{-3}$  сек, т. е. порядка 0,2 длительности вспышки. Влияние щели на уширение  $H_\beta$  не учитывалось, так как при дисперсии СФК-1 в области  $H_\beta$ , равной 36 Å/мм, и щели  $s=0,017$  мм спектральная ширина щели составляла 0,6 Å.

Для получения усредненной во времени картины снимки делались на спектрографе с дисперсией в области  $H_\beta$  13 Å/мм, при большом уширении  $H_\beta$  съемки проводились и на спектрографе (дисперсия 73 Å/мм). Интенсивности линий измерялись обычными методами фотографической фотометрии.

### Результаты исследований

На спектрах, полученных с чистыми угольными электродами как при развертке, так и при усреднении во времени при токах от 2 до 12 а линии водорода обнаружены не были. При съемках поперечного распределения свечения линий при токах больших 8 а в центральной части дуги появлялась очень слабая линия  $H_\alpha$ , полуширину которой нельзя было измерить из-за малой дисперсии в этой области (100 Å/мм).

Обеспечить появление линий  $H_\beta$  в спектре угольной дуги удалось увеличением концентрации водорода в плазме дуги следующими способами: 1) увлажнением нижнего электрода (электрод обвертывался ватой, смоченной водой), 2) пропиткой электродов раствором какого-либо вещества, содержащего кристаллизационную воду (медный купорос  $\text{CuSO}_4$ , сахар  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ), 3) пропиткой электродов полистиролом, растворенным в бензоле, с дополнительным нанесением раствора на их поверхность и последующей просушкой.

Введение в плазму водорода первым способом существенно меняло картину разряда. Вместо бочкообразной фиолетовой светящейся области образовывался тонкий шнур фиолетового свечения с красной серединой (свечение  $H_\alpha$ ). На нижнем увлажненном электроде появлялось катодное пятно, на верхнем же электроде картина не менялась. В спектре появлялись сильные линии  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$ , O, N, полосы циана резко ослаблялись. На рис. 2 приведены поперечные снимки обычной угольной дуги и угольной дуги с увлажненным нижним электродом. Видно уменьшение поперечного сечения дуги при увлажнении электрода.

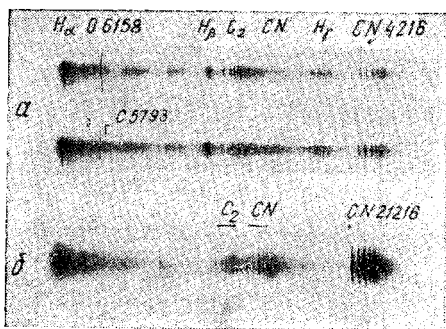


Рис. 2. Поперечное спектральное распределение свечения: а — дуги с увлажненным (нижним) электродом, б — обычной угольной дуги. Поперечные снимки, экспозиция  $\sim 10^{-3}$  сек СФК-1

Все исследования проводились при одинаковой степени увлажнения нижнего электрода, так как было замечено, что при одной и той же силе тока концентрация электронов, измеренная по  $H_{\beta}$ , уменьшается при уменьшении степени увлажнения нижнего электрода. При постоянной степени увлажнения концентрация электронов воспроизводится от снимка к снимку довольно хорошо (например, при силе тока  $7 \text{ а}$  и расстоянии между электродами  $d=3 \text{ мм}$  среднее из 10 снимков на оси разряда  $N_e=4,7 \cdot 10^{16} \pm 0,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ).

На рис. 3 представлена зависимость концентрации электронов  $N_e$  от силы тока дуги при увлажненном нижнем электроде и расстоянии между электродами  $d=3 \text{ мм}$ . Спектры были сняты на спектрографе

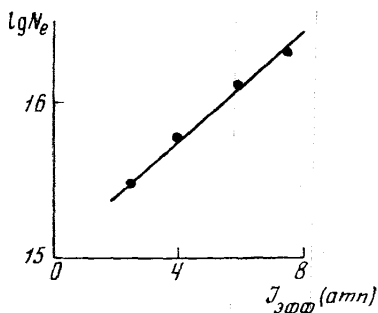


Рис. 3. Зависимость концентрации электронов в центре дуги  $N_e$  от силы тока в дуге с увлажненным нижним электродом. Расстояние между электродами  $d=3 \text{ мм}$ , выдержки 3—15 мин

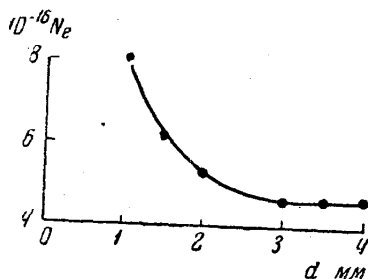


Рис. 4. Концентрация электронов в центре дуги  $N_e$  при различных расстояниях между электродами при  $I_{эфф}=7 \text{ а}$ . Выдержки 3—15 мин

КС-55 с выдержкой 3—15 мин. Быстрое возрастание с ростом силы тока может быть связано как с увеличением плотности тока, так и с увеличением количества испаряющейся воды при большем разогреве электрода.

Концентрация электронов  $N_e$  в центральной части дуги при различных расстояниях между электродами (сила тока  $7 \text{ а}$ , выдержки 3—15 мин) представлена на рис. 4. Величина  $N_e$  возрастает при уменьшении расстояния между электродами (начиная с  $d=2,5 \text{ мм}$ ), когда в свечении центральной части дуги начинают принимать участие приэлектродные области. Исследования продольного распределения свечения линии  $H_{\beta}$  также показали увеличение ширины водородных линий в приэлектродных областях.

Исследование свечения дуги во времени проводилось при токе  $7 \text{ а}$  и расстоянии между электродами  $d=1,5 \text{ мм}$ . При этом концентрации  $N_e$  были несколько выше, чем при больших расстояниях между электродами (см. рис. 4), и линия  $H_{\beta}$  имела достаточно хорошие почернения при использованном в работе временном разрешении  $5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$ .

Спектр дуги с увлажненным нижним электродом, развернутый по времени, показан на рис. 5. Различная длительность вспышек (примерно  $50$  и  $110^\circ$  по фазе) говорит о выпрямляющем действии дуги с охлаждаемым электродом [13]. Более длинная вспышка соответствует случаю, когда охлаждаемый электрод является анодом. На некоторых снимках можно заметить колебания интенсивностей линий, подобные наблюдавшимся в [12, 14]. Одновременно с линиями водорода светятся линии углерода, азота, кислорода.  $H_{\alpha}$  светится все время, однако интенсивность ее резко падает в момент исчезновения линии  $H_{\beta}$ . Полосы  $CN 4216 \text{ \AA}$  и

$\lambda$  4556 Å и полосы  $C_2$   $\lambda$  4737 Å светятся равномерно в течение всей вспышки. Зависимость концентрации электронов  $N_e$  от фазы  $\varphi$  горения угольной дуги для трех длинных вспышек показана на рис. 6. Вспышка *b* начинается с максимальной ширины  $H_\beta$ . В дуге, горящей длительное время, обычно бывали вспышки типа *a*, дуга с плохо разогретыми электродами давала в основном вспышки типа *б* и *в*.

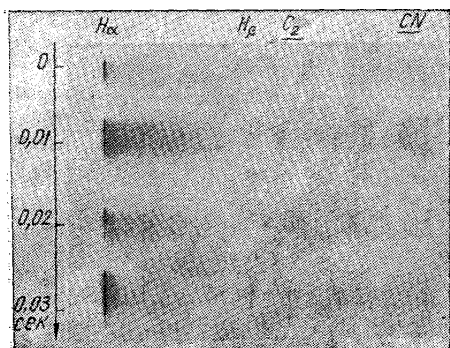


Рис. 5. Спектр угольной дуги с увлажненным нижним электродом, развернутый во времени

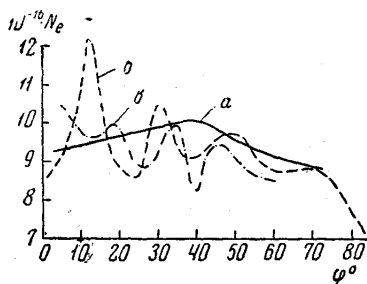


Рис. 6. Концентрация электронов  $N_e$  в зависимости от фазы горения дуги в трех различных вспышках. *a* — линии и фон не осциллируют по интенсивности, *б*, *в* — линии и фон осциллируют по интенсивности

На рис. 7 показано изменение температуры по фазе дуги при введении водорода в дугу вторым способом — пропиткой электродов водным раствором медного купороса. Кривая 1, *a* взята нами из [12], кривая 1, *б* получена по измерениям полуширины линии  $H_\beta$  на снимках, использованных в [12]. При расчете температуры по полуширине  $H_\beta$  эффективный потенциал ионизации плазмы принят равным 12,7 эв. Расхождение кривых 1, *a* и 1, *б* на рис. 7 связано с тем, что температура, измеренная по линиям  $Cu$  (кривая 1, *a*), соответствует области свечения этих линий, температура же, измеренная по  $H_\beta$ , соответствует центральной части разряда.

Прокаливание электродов, пропитанных медным купоросом, при температуре  $200 \div 300^\circ C$  в течение часа приводит к полному исчезновению линий газов в спектре и существенно меняет характер зависимости температуры дуги от фазы (кривая 2, температура измерена по линиям  $Cu$ , усреднение по трем вспышкам). Максимальное значение температуры соответствует середине вспышки.

При развертке спектра дуги с электродами, пропитанными раствором сахара и просушенными в течение 5 суток в естественных условиях, линии водорода и воздуха светились более длительное время, чем в случае медного купороса. Слабое прокаливание электродов с сахаром ос-

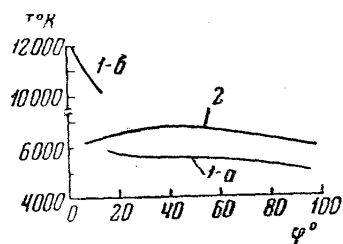


Рис. 7. Изменение температуры дуги по фазе с электродами: 1 — пропитанными раствором медного купороса: *a* — область свечения линий  $Cu$ , температура измерена по  $Cu$  5105, 5153 и 5218 в работе [2] и *б* — область свечения линий газов, температура измерена по полуширине линий  $H_\beta$ ; 2 — пропитанными раствором медного купороса и прокаленными, температура измерена по линиям  $Cu$

лабляло линии водорода, но полуширина  $H_{\beta}$  не менялась. В спектре присутствовал сильный сплошной фон.

Введение водорода в дугу с помощью полистирола давало очень слабую линию  $H_{\beta}$ , заметную только на снимках без развертки в самом центре дуги.

В дуге постоянного тока увлажнение нижнего электрода также приводило к появлению тонкого светящегося шнура вместо бочкообразного столба, однако дуга горела неустойчиво. При силе тока  $5 \text{ а}$  и  $d=3 \text{ мм}$  полуширина  $H_{\beta}$  была около  $5 \text{ \AA}$ , т. е.  $N_e=4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В этом случае учитывалась аппаратная функция.

Линии углерода С I 2906  $\text{\AA}$  и С II 2837  $\text{\AA}$ , которые использовались в [1] при определении температуры, в спектре нашего разряда отсутствовали. Следовательно, концентрация углерода в плазме меньше 30% (меньше, чем было в [1]). Эффективный потенциал ионизации плазмы для концентрации углерода 10% по графику, приведенному в [1] для  $T=10^4 \text{ К}$ ,  $\kappa=12,7 \text{ эв}$ . При изменении концентрации углерода от 5 до 25%  $\kappa$  изменяется от 13 до 12,2 эв.

Отношение статистических сумм берется для углерода  $\frac{u_1}{u_0}=6/9$ , так как он является основным поставщиком электронов, и отношение статистических сумм для воздуха имеет близкое значение.

Расчет температуры по уравнению Саха для  $\kappa=12,7 \text{ эв}$  и  $N_e=4,7 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , полученный в дуге при  $I_{\text{эфф}}=7 \text{ а}$  и  $d=3 \text{ мм}$ , дает  $T=10\ 600^\circ \text{ К}$ . Если принять концентрацию углерода 5 и 25%, то  $T=10\ 800^\circ \text{ К}$  и  $T^\circ=10\ 100^\circ \text{ К}$  соответственно.

## Выводы

При увлажнении нижнего электрода угольной дуги переменного тока можно получить достаточно яркие водородные линии и измерять концентрацию электронов по полуширине линии  $H_{\beta}$ . Уменьшение расстояния между электродами приблизительно до 1 мм еще более усиливает свечение водородных линий.

При увлажнении нижнего электрода дуги температура плазмы повышается ввиду увеличения эффективного потенциала ионизации плазмы за счет уменьшения поступления в разряд углерода, о чем говорит отсутствие в спектре ряда линий углерода и ослабление полос циана. Присутствие водорода, обладающего большой теплопроводностью, приводит к сжатию столба дуги за счет интенсивного охлаждения и также повышает температуру дуги. В дуге с увлажненным нижним электродом при  $I_{\text{эфф}}=7 \text{ а}$  и расстоянии между электродами 3 мм получена концентрация электронов на оси дуги  $N_e=4,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и температура  $10\ 600^\circ \text{ К}$ .

Параметры угольной дуги переменного тока с увлажненным электродом очень близки к параметрам дуг постоянного тока в атмосфере водорода или с водяной стабилизацией при соответствующих значениях силы тока: дуга в водороде [7]  $I=20 \text{ а}$ ,  $N_e=7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , дуга с водяной стабилизацией [3]:  $I=15 \text{ а}$ ,  $N_e=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , дуга с увлажненным электродом:  $I_{\text{эфф}}=7 \text{ а}$ ,  $I_{\text{макс}} \cong 20 \text{ а}$ , среднее  $N_e=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , на оси  $N_e=4,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Концентрация электронов на оси столба растет с увеличением силы тока и с уменьшением межэлектродного расстояния. Поведение  $N_e$  в начале вспышки дуги в значительной мере зависит от состояния поверхности электрода (степени его увлажнения).

Причиной повышения температуры и появления линий газов в начальные моменты всплеск угольной дуги с медным купоросом, обнаруженных в [12], является присутствие в медном купоросе кристаллизационной воды.

Использованный в работе способ введения водорода в угольную дугу прост и может быть применен в учебных лабораториях для определения концентрации электронов по линии  $H_{\beta}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Maesker H. Zs. Phys., **136**, 119, 1953.
2. Jürgens G. Zs. Phys., **134**, 21, 1953. См. в кн.: «Оптическая пирометрия плазмы» М., ИЛ, 1960, стр. 175.
3. Vogen P. Zs. Phys., **149**, 62, 1957.
4. Griem H. R., Kolb A. C., Shen K. J. Phys. Rev., **116**, 4, 1959.
5. Китаева В. Ф., Соболев Н. Н. ДАН СССР, **137**, 1091, 1961; Китаева В. Ф., Обухов-Денисов В. В., Соболев Н. Н. «Оптика и спектроскопия», **12**, 179, 1962.
6. Унсольд А. Физика звездных атмосфер. М., ИЛ, 1949.
7. Lochte W. Nissen. Zs. Phys., **133**, 124, 1952.
8. Hörmann H. Zs. Phys., **97**, 539, 1935.
9. Данилова В. И. «Изв. АН СССР», сер. физ., **11**, 252, 1947.
10. Lüssem H. Annal. d. Phys., **49**, 865, 1916.
11. Griem H. Phys. Rev., **128**, 515, 1962.
12. Лебедева В. В., Миловидова Р. А. «Оптика и спектроскопия», **2**, 150, 1957.
13. Финкельнбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. М., ИЛ, 1961.
14. Абрамсон И. С., Мандельштам С. Л. «Изв. АН СССР», сер. физ., **11**, 223, 1947.

Поступила в редакцию  
8. 6 1964 г.

Кафедра  
оптики