Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

В. Я. Смоляков, О некоторых особенностях горения электрической дуги в плазматроне постоянного тока,
Прикл. мех. техн. физ., 1963, том 4, выпуск 6, 148–153

https://www.mathnet.ru/pmtf9213

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
https://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 18.97.9.173
11 декабря 2025 г., 20:58:41

Здесь I — полный ток, текущий через газ

$$I = j_+ S_+ = j_- S_-, \qquad r = \frac{100}{2\pi l}\frac{1}{\sigma}\ln\frac{r_2}{r_1} + R'$$

В камере с цилиндрическими электродами, аналогичной [1], плотности тока на положительном j_- и отрицательном j_+ электродах различны ($j_+ \neq j_-$).

Так как величина сопротивления подводящих проводов R' в работе [1] не указана, то величина r при расчетах выбиралась из условия, чтобы вольт-амперная характеристика проходила через первую группу экспериментальных точек. При малых токах и напряжениях $\psi_+ \sim \varphi_-$ поэтому наклон начального участка характеристики приближенно определяет сопротивление газового промежутка без учета приэлектродных слоев. Определенная таким образом величина r остается постоянной при увеличении разности потенциалов. Рост эффективного внутреннего сопротивления $R_0 = V/I$ определяется падением напряжения на приэлектродных слоях.

Результаты расчета вольт-амперной характеристики по соотношению (5) приведены на фиг. 1, причем кривая *3* соответствует $\Phi = \Phi_1 = 3.93$ *в*, а кривая *2* — значению $\Phi = \Phi_2 = 4.01$ *в*.

Таким образом, метод расчета, развитый в работе [5], позволяет построить нелинейную вольт-амперную характеристику для газового промежутка, к которому приложена разность потенциалов. Рассчитанная характеристика хорошо соответствует экспериментальным данным работы [1]. Качественный вид этой характеристики аналогичен начальному участку экспериментально установленной кривой [2].

Указанные обстоятельства позволяют надеяться, что метод расчета и предположения, выдвинутые в работе [5], соответствуют физическому существу задачи по крайней мере до тех пор, пока падение потенциала в приэлектродных слоях невелико ($\varphi_+ \lesssim U_i$, U_i — потенциал ионизации добавок). Последнее условие выполняется в приведенных расчетах.

Уменьшение сопротивления, которое наблюдается при больших приложенных разностях потенциала [2], и не вытекает из развитой теории, может быть связано с тем, что ускоренные в приэлектродных слоях электроны (за счет больших падений потенциала в этих слоях) меняют условия ионизации на границе газового промежутка [5]. В этих условиях метод расчета, приведенный здесь, неприменим (может измениться величина r или условия эмиссии с электродов).

Поступила 10 IX 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Mullaney G. J., Kydd P. H., Dibelius N. R. Electrical conductivity in flame gases with large concentrations of potasium. J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, No 4.
(Русск. пер. в сб. «Плазма в магнитном поле», Госатомиздат, 1962).
2. Devime R., Lecroart H.,... Conductivity measurments in seedeal combustion gases. Symp. MHD power generation 1962. (Русск. пер. в сб. «Магнитогидродинамические генераторы электроэнергии», ВИНИТИ, 1963).
3. Pain H. J., Smy P. R. Experiments on power generation from a moving plasma. J. Fluid Mech., 1961, vol. 10, No. 1 (Русск. пер. в сб. «Механика», ИЛ, 1962, № 3).
4. George D. W., Messerle H. K. Elektrode conduction processes in air plasmas. J. Fluid Mech., 1962, vol. 13, No. 3. (Русск. пер. в сб. «Механика», ИЛ, 1963, № 2).
5. Любимов Г. А. Изменение электрического потенциала вблизи стенки канала при движении ионизованного газа в магнитном поле. ПМТФ, 1963, № 5.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ГОРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В ПЛАЗМАТРОНЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

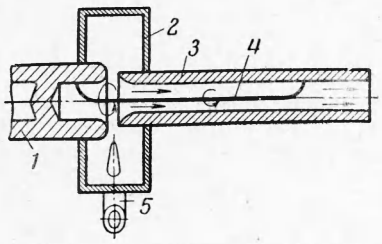
В. Я. Смоляков

(Новосибирск)

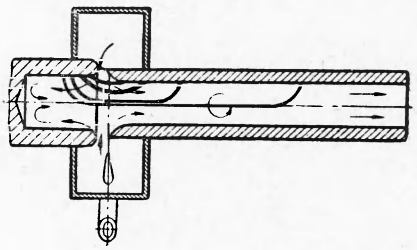
В работе показывается, что в плазматроне постоянного тока электрическая дуга претерпевает непрерывные изменения длины, напряжения и тока, вызванные особенностями ее горения при расположении части положительного столба вдоль оси канала электрода, через который газ истекает из плазматрона, причем дуга замыкается одним концом на этот же электрод. Колебания напряжения дуги при определенных условиях достигали 40—50% от среднего значения. Объясняется механизм установления среднего напряжения дуги в таком плазматроне и значительное влияние изменения полярности электродов на величину среднего напряжения дуги.

Все эксперименты, описанные в работе, проведены на плазматроне постоянного тока с вихревой воздушной стабилизацией дуги, однако выдвигаемые гипотезы справедливы для некоторых других схем плазматронов и не зависят от рода газа.

1. Схема плазматрона, на котором проводились исследования колебаний дуги, подобна описанной в [1] и приведена на фиг. 1, где *1* — катод, *2* — камера закручивания, *3* — анод, *4* — электрическая дуга, *5* — тангенциальный ввод в камеру закручивания. Вихревой поток газа, создаваемый в камере закручивания, выполняет здесь две функ-



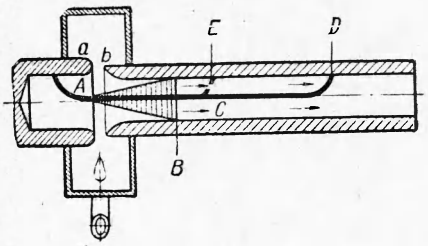
Фиг. 1



Фиг. 2

ции. Во-первых, создает пониженное давление на оси потока, совпадающей с осью электродов; вследствие этого основная часть положительного столба дугового разряда устанавливается в пространстве вдоль оси электродов. Во-вторых, закрученный газ увлекает в своем вращательном движении концы дуги, опирающиеся на внутренние цилиндрические поверхности электродов, и заставляет их с большой скоростью (до 10 *м/сек*) перемещаться относительно стенок электродов. Быстрое перемещение приэлектродных пятен в сочетании с интенсивным водяным или воздушным охлаждением электродов препятствует чрезмерному повышению температуры их стенок как от тепла, передаваемого через опорные пятна дуги, так и вследствие теплопередачи от газа, нагреваемого дугой.

Электрический пробой минимального промежутка между электродами осуществляется высокочастотным искровым разрядом специального высоковольтного осциллятора. Под действием разности потенциалов по каналу пробоя развивается дуговой разряд. Возникшая дуга под воздействием радиального потока газа сносится из межэлектродного промежутка на ось электродов; одновременно с этим, под действием осевых потоков газа дуга растягивается вдоль оси электродов, как это показано на фиг. 2.



Фиг. 3

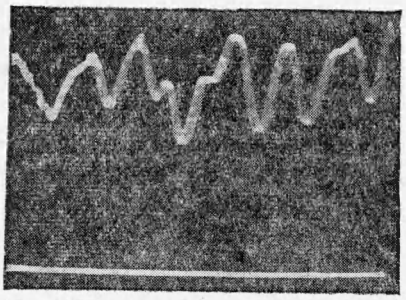
При этом, конец дуги, опирающийся на внутреннюю поверхность катода, под действием аэродинамических сил потока газа внутри полости катода в установившемся режиме вращается по замкнутой траектории в виде кольца, на некотором расстоянии от межэлектродного промежутка. Анодный конец дуги одновременно с вращением сносится потоком газа, движущимся через полость анода. Если анод короткий, а напряжение источника питания большое, то, как показывают наблюдения, дуга выдувается из анода и концом замыкается уже на торцевую поверхность анода, образуя петлю в факеле истекающего разогретого газа. Необходимо отметить, что собственное магнитное поле дуги при любом направлении тока в дуге также всегда способствует выталкиванию конца дуги из анода. Обычно, однако, длину анода опытным путем подбирают такой, чтобы дуга не выдувалась наружу. В изложенных ниже экспериментах дуга наружу не выдувалась. Тот факт, что в случае длинного анода, несмотря на воздействие аэродинамических и магнитных сил, растягивающих дугу, и отсутствие каких-либо ограничений ее выдуванию из анода, существует конечная длина дуги даже при бесконечно большом напряжении источника, заслуживает внимания.

При исследовании причин подобного явления на основании предварительных экспериментов, которые будут изложены ниже, оказалось, что в случае, когда дуга некоторой своей частью располагается в канале электрода, через который газ истекает из плазматрона, и одним концом опирается на этот же электрод, то канал и протекающий в нем газ определяют характер установления падения напряжения на дуге, а также длины дуги и вызывают непрерывные колебания дуги.

2. Можно предложить следующую гипотезу о механизме горения дуги в плазматроне и установления падения напряжения на ней. Для простоты рассуждений будем рассматривать дугу, как шнур с постоянным диаметром, малым по сравнению с диаметром канала электрода.

Разберем схему на фиг. 3, поясняющую возникновение колебаний.

Как указывалось, дуга после ее поджига в межэлектродном промежутке (положение ab) сносится потоком газа и располагается основной частью вдоль оси электродов, причем анодный конец магнитными силами и потоком газа выталкивается в направлении к выходу из анода. Зафиксируем какой-то момент, когда анодный конец дуги из точки b в своем движении к выходу попал в точку D. Холодный газ, поступающий из камеры закручивания, обдувая дугу, нагревается вследствие теплообмена с разрядным каналом дуги.



Фиг. 4

Зона нагретого газа (схематично конус с образующей AB) в какой-то точке B смыкается со стенкой электрода и далее к выходу весь газ постепенно разогревается до высоких температур.

Заметим, что металлический анод вследствие малого электрического сопротивления имеет по всей длине одинаковый потенциал, равный потенциалу конца дуги, опирающегося на анод. Разность потенциалов между концом дуги в точке D и любой точкой по длине дуги, к примеру точкой C, может быть записана в виде

$$\Delta U_{DC} = U_a + \int_0^l E(l)\,dl \qquad (1)$$

Здесь U_a — анодное падение, $E(l)$ — напряженность в положительном столбе дуги, l — расстояние между точками D и C по оси дуги.

Таким образом, между любой точкой дуги (кроме точки D) и анодом существует разность потенциалов, определяемая уравнением (1), т. е.

$$\Delta U_{CD} = \Delta U_{CE}$$

Очевидно, что при определенных условиях может возникнуть такое положение, когда эта разность потенциалов станет достаточной, чтобы осуществился электрический пробой газового промежутка между какой-то точкой дуги, расположенной на оси, и стенкой электрода.

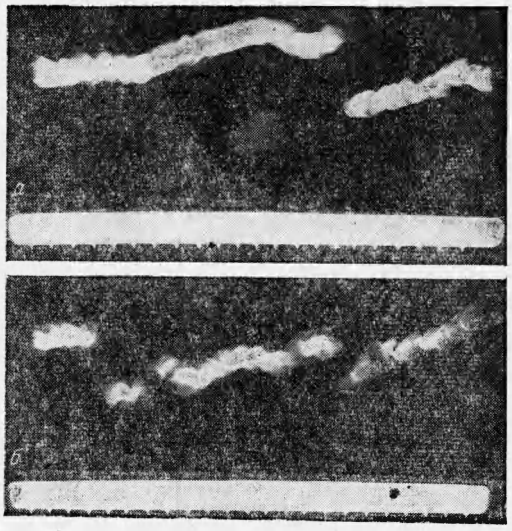
Положительный столб дуги и стенки анода представляют собой как бы два коаксиальных электрода, к которым приложена разность потенциалов, изменяющаяся по длине, согласно уравнению (1). Промежуток между этими электродами заполнен газом с высокой температурой. Известно, что с повышением температуры газа электрическая прочность промежутка падает обратно пропорционально абсолютной температуре [2]. При увеличении температуры газа от комнатной до 2000°К пробойная электрическая прочность промежутка, например, снижается примерно в 7 раз. На улучшение возможности пробоя оказывает влияние и то, что дуга фактически является эмиттером положительных и отрицательных ионов. Оксидная пленка на аноде и ионизирующее действие ультрафиолетового излучения дуги также улучшают условия пробоя. При повышении температуры газа, кроме того, начинается процесс термической ионизации и в этом случае электрическая прочность газового промежутка будет определяться в основном относительно холодным пристеночным слоем газа, который и будет определять минимальное напряжение пробоя.

Предположим далее, что в промежутке между точками CE разность потенциалов оказалась достаточной для пробоя газового промежутка. В этом случае между точками CE после пробоя развивается новый дуговой канал, существующий одновременно с прежним, замыкающимся на анод в точке D. Новый канал имеет меньшую длину, чем CD, а следовательно, и меньшее сопротивление. Канал CD, шунтированный новым разрядным каналом CE, отомрет. Новый конец дуги потоком газа будет выдуваться к выходу из анода до тех пор, пока не произойдет его шунтирования после очередного пробоя. Так как всегда существуют шероховатости на стенках электрода, а дуга расположена не строго по оси, новое шунтирование обычно происходит в какой-то окрестности сечения D. Поэтому колебания получаются не стабилизированными ни по фазе, ни по амплитуде (на фиг. 4 представлена осциллограмма напряжения дуги,

снятая на осциллографе ЭНО-1, длительность развертки 1000 *мксек*; прямая линия внизу — нуль напряжения).

Интересно, что в опытах при кратковременном запуске на чистой поверхности электрода можно было заметить обязательный сдвиг следов пятна дуги по окружности поперечного сечения цилиндрической полости анода после каждого нового пробоя. Вероятной причиной сдвига может быть либо влияние сносящего действия вихря при несимметрии расположения дуги в электроде, либо влияние следа в газе от вращающегося катодного конца дуги. Это обеспечивает симметричность выгорания материала электрода от воздействия пятна дуги.

Таким образом, благодаря периодическому замыканию дуги на стенку канала возбуждаются колебания. О высокочастотных колебаниях в дуге упоминается также в работах [3,4]. Исходя из других соображений одновременно с автором к выводу об образовании новых электродных пятен путем пробоя пришел Г. Ю. Даутов[1].



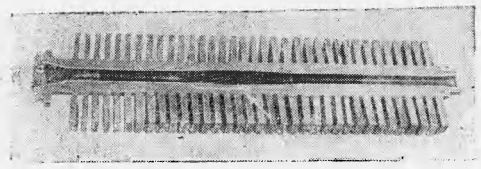
Фиг. 5 *а*, *б*

3. В нашем случае колебания дуги имели частоту порядка 10^3 *гц*. Очевидно, что частота колебаний f должна зависеть от скорости движения анодного пятна w под действием осевого потока

$$f = \frac{w}{h}\varphi \tag{2}$$

Здесь φ — коэффициент скольжения газа относительно конца дуги, h — размах колебаний.

На фиг. 5 представлены характерные осциллограммы напряжения дуги, полученные на импульсном осциллографе с длительностью развертки 400 *мксек*, снятые при значениях расхода газа G фиг. 5*а* и 2 G фиг. 5*б*. На одной из них — один, а на другой — два резких спада напряжения, обусловленных замыканием дуги на стенку при очередном пробое. Эти осциллограммы качественно подтверждают зависимость частоты колебаний от скорости движения газа, так как давление в этом случае менялось незначительно и увеличение расхода примерно соответствовало изменению скорости. Небольшие по амплитуде колебания напряжения с частотой $f = 50$ *кгц*, видимые на осциллограмме, между резкими спадами, можно отнести за счет скачкообразного движения приэлектродной части дуги на катоде или аноде при непрерывно горящей дуге. Для катодного пятна такое явление наблюдалось Х. С. Дункерлеем и Д. Л. Шефером [5], для анодного наблюдалось автором (при токе дуги 200 *а* следы пятна диаметром 1—1.5 *мм* с интервалом 1—2 *мм* на чистой поверхности анода образовывали строчки).

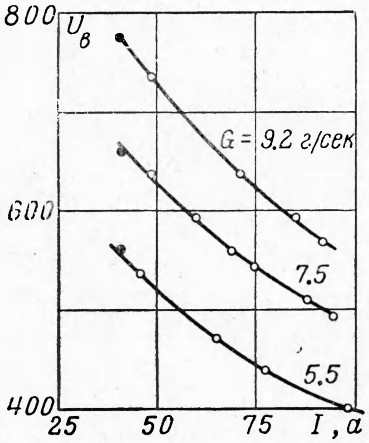


Фиг. 6

На фиг. 6 приведен снимок анода с воздушным охлаждением, разрезанного пополам, после отработки 8 *час* на примерно постоянном режиме горения дуги. На снимке стрелкой отмечено бочкообразное уширение цилиндрического внутреннего канала анода — результат эрозии электрода в зоне колебаний анодного пятна. Внутри бочки видны косые (от закрутки) следы, оставленные многократным пробеганием анодного пятна дуги. Величина размаха колебаний длины дуги составляла на этом электроде 5—6 *см*. Зная скорость движения газа в зоне пятна (порядка 1000 *м/сек*), можно пример-

[1] После сдачи статьи в набор автору стали ивестны две новые работы, посвященные колебаниям в дуге: 1. Harvey J. K., Simpkins P. G., Adcock B. D. Jnstability of Arc Columns. AJAA, 1963, vol. 1, No 3, 714—716. 2. Tateno H., Saito K. Anodic Phenomena in Nitrogen Plasma Jet. Japan. J. Appl. Phys., 1963, vol. 2, No. 3.

но оценить частоту колебаний по формуле (2). Коэффициент скольжения φ по нашим измерениям для катодного пятна равнялся примерно 0.1—0.2. Тогда частота колебаний имеет порядок $(2—4)\cdot 10^3$ *гц*.



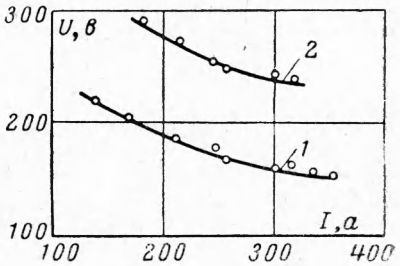
Фиг. 7

Исследования светимости струи, истекающей из плазматрона на срезе анода, показали соответствие колебаний светимости струи колебаниям дуги, как основным с частотой порядка 10^3 *гц*, так и малым колебаниям (от скачкообразного движения пятен дуги) с частотой 50 *кгц*.

Колебания длины дуги в электроде, показанном на снимке (фиг. 6), составляли ±25% от средней длины дуги. В ряде случаев эти колебания были еще больше.

По осциллограмме (фиг. 4) можно примерно оценить величину колебаний напряжения относительно среднего значения. Прямая линия под кривой напряжения—запись нуля. Колебания напряжения ±25%; однако если судить по непрерывной развертке (или обработать множество мгновенных снимков), то видно, что отдельные отклонения составляют ±50% от среднего значения U и более. Колебания тока дуги совпадают по фазе с колебаниями напряжения, однако по знаку отклонения они противоположны. По размаху отклонения тока от среднего имеют тот же порядок (до ±50% $I_{ср}$).

Как уже говорилось, замыкание дуги на стенку (шунтирование) ограничивает напряжение дуги при горении ее в канале электрода. Статическая вольтамперная характеристика плазматрона отражает зависимость среднеэффективного напряжения от среднеэффективного тока дуги при фиксированных значениях расхода газа и диаметра электрода. Она может быть получена либо графическим интегрированием (при непрерывной записи колебаний), либо при измерениях, с постановкой сглаживающих фильтров перед шлейфами осциллографа, либо при измерениях на обычных стрелочных щитовых амперметрах и вольтметрах, где роль фильтров играет инерционность механической системы прибора.



Фиг. 8

На фиг. 7 представлены статические вольтамперные характеристики дуги, горящей в плазматроне с диаметром анода 8 *мм*, при различных расходах газа. Из графика видно, что с увеличением расхода газа напряжение дуги возрастает при постоянном токе дуги.

Согласно высказанной гипотезе это объясняется тем, что зона повышенных температур, где осуществляется шунтирование, сдвигается к выходу.

4. На величину среднего напряжения дуги в плазматроне оказывает большое влияние полярность электродов. На фиг. 8 изображены статические вольтамперные характеристики дуги в плазматроне при прямой и обратной полярностях электродов; кривая 2 соответствует случаю, когда выходной электрод соединен с минусом источника питания. В том случае, когда выходной электрод имеет отрицательный потенциал, падение напряжения при одинаковых расходах газа на дуге возрастает, а длина дуги увеличивается. Причина этого явления в том, что при отрицательном потенциале на выходном электроде дуга относительно него заряжена положительно, и электрическое поле в зазоре «дуга-электрод» препятствует электронам, вылетающим из дуги, достичь поверхности электрода, в то время как при положительном полюсе на выходном электроде электрическое поле способствует попаданию электронов на поверхность электрода, облегчая пробой газового промежутка. Поэтому при положительно заряженном выходном электроде шунтирование дуги начинается раньше и достигаемые средние напряжения меньше.

Подобный факт влияния полярности электродов отмечался Дулеем, Макрегором и Брюйером при горении дуги в плазматроне типа Гердиена [4]. В этом случае шунтирование происходило не на канал длинного электрода, а на шайбу, которая имела ограниченную длину, но дуга выдувалась наружу и, делая петлю в факеле истекающего газа, замыкалась на торцевую поверхность шайбы. При этом также отмечались высокочастотные колебания в дуговом разряде [5].

Эффект колебаний дуги можно использовать для увеличения срока службы электродов. Известно, что эрозия электродов в катодном пятне дуги существенно превышает таковую в анодном пятне. В этом случае выгодно выходной электрод делать катодом, так как в нем выгорание распределяется вследствие колебаний дуги на большую поверхность и электрод увеличивает срок службы до момента прогорания.

Мыслимо также создание плазматрона с двусторонним истечением газа. Такая конструкция может найти применение, например, для расширения скважин при термическом бурении горных пород. В этом случае распределение выгорания вследствие колебаний дуги может удвоить срок службы электродов. При полной симметрии электродов можно, меняя простым переключением полярности, заставлять мало выгорающий анод работать часть времени в качестве катода.

В заключение автор благодарит В. М. Миронова и Г. Ю. Даутова за полезное обсуждение работы и М. Ф. Жукова за постоянное внимание и помощь в работе.

Поступила 3 V 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Даутов Г. Ю., Жуков М. Ф., Смоляков В. Я. Исследование работы плазматрона с воздушной стабилизацией дуги. ПМТФ, 1961, № 6.
2. Купфмюллер К. Основы теоретической электротехники. Госэнергоиздат, 1960.
3. Сергеев В. Я., Трофимов В. М., Юревич Ф. Б. и Ясько О. И. Некоторые результаты исследования работы электродугового подогревателя с газовой стабилизацией разряда. Инж.-физ. ж., 1963, № 1.
4. Dooley M. T., Mc Gregor W. K., Brewer L. E. Characteristics of the arc in a Gerdien — tipe plasma generator. ARSI, 1962, 32, 1392—1394. (Русск. пер. в Журн. Ракетная техника, 1962, т. 32, № 9.
5. Dunkerley H. S., Schaefer D. L. Observations of cathode arc tracks. J. Appl. Phys., 1955, vol. 26, No. 11.

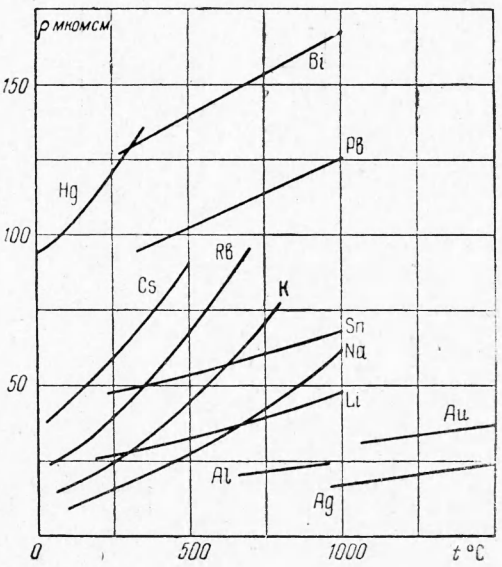
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

А. Н. Соловьев
(*Новосибирск*)

Рассматривается зависимость электрического сопротивления жидких металлов от удельного объема. Показано, что для ряда металлов зависимость атомного электрического сопротивления от относительного свободного объема имеет общий характер.

Экспериментальных данных по электропроводности чистых жидких металлов в достаточно широком интервале температур пока опубликовано мало. Для большинства металлов исследованный температурный интервал не превышает 20÷30% интервала жидкого состояния при нормальном давлении.

Анализ данных по электропроводности жидких металлов показывает, что линейная зависимость электрического сопротивления ρ от температуры $t°$ прослеживается в относительно узком интервале температур вблизи точки плавления (фиг. 1). Для описания зависимости сопротивления от температуры приходится прибегать к более сложным зависимостям, включающим члены со второй, третьей и даже четвертой степенью [1, 2].



Фиг. 1

Здесь уместно отметить, что, в отличие от твердых тел, удельное электрическое сопротивление жидкостей обычно относится исследователями к непостоянному числу атомов в исследуемом объеме, так как при нагревании часть исследуемой жидкости из-за термического расширения уходит из рабочей части контейнера в компенсационный объ-