

Л. П. МУРКИН

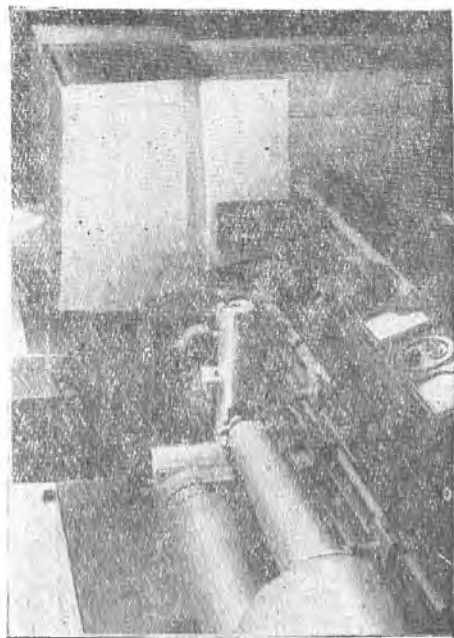
## ТЕМПЕРАТУРА В ДУГЕ С ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИЕЙ

Для определения поля температур в дуге с вынужденной конвекцией необходимо решить систему уравнений неразрывности, движения и баланса энергии, что в общем случае невозможно. Однако, при течении потока газа вдоль столба дуги, что имеет место, например, в практически важном случае горения длинной дуги при газозлектрической резке, скоростной член в уравнении энергии мал, поскольку изотермы и линии тока почти совпадают, и, следовательно, перенос энергии за счет скорости оказывает слабое влияние на температуру дуги. Результаты экспериментов по измерению температуры дуги в процессе резки, приведенные ниже, подтверждают этот вывод.

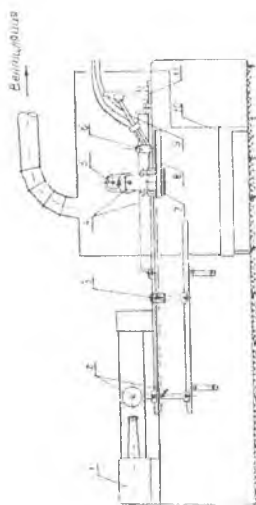
В статье даются также формулы для расчета профиля температуры на срезе сопла горелки, полученные из решения уравнения баланса энергии с использованием аппроксимации функции вещества  $\sigma(s)$  тремя прямыми. Проведено сравнение расчетного профиля с экспериментальным.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка выполнена по схеме, соответствующей автоматической газозлектрической резке (фиг. 1). В боксе 10, расположенном около спектрографа 1, смонтирована газозлектрическая горелка 6 на кронштейне 9. Разрезаемый металл 8, закрепленный в держателе 7, может перемещаться с помощью мотора 5 и тросовой передачи 4 вдоль направляющего рельса 11. Дуга, горящая вертикально, отображается на щель спектрографа ИСП-67 горизонтально с помощью линзы 3 и системы зеркал 2. Полное увеличение оптической системы установки, включая спектрограф, равно 1,1. Изменяя положение горелки с металлом относительно оси оптической системы, можно проектировать на щель спектрографа различные сечения дуги. Общий вид установки и бокса показан на фиг. 2 и фиг. 3.



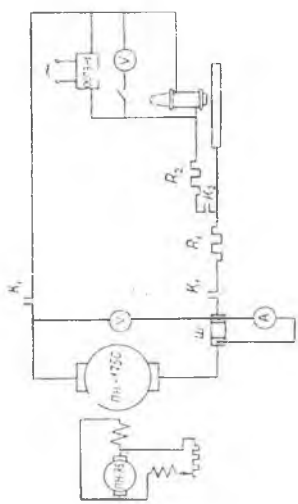
Фиг. 2. Общий вид установки



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки



Фиг. 3. Расположение горелки и металла в боксе



Фиг. 4. Электрическая схема установки

Электрическая схема установки изображена на фиг. 4. Источником питания является генератор типа ПН-1750 с независимым возбуждением. Для улучшения характеристик дуги в цепь включен балластный реостат  $R_1$  сопротивлением 0,141 ом. Реостат  $R_2$  служит для поддержания слаботочной вспомогательной дуги, горящей в период запуска между соплом и электродом горелки. Запуск дуги осуществляется с помощью осциллятора ОСПЗ-1. После зажигания основной дуги на металл сопло с реостатом  $R_2$  отключается. Электрические измерения производились приборами класса 0,5 — вольтметром М252 и милливольтметром М105 с шунтом, включенным по обычной схеме.

Газоэлектрическая горелка взята от установки УГР-1, спроектированной и изготовленной в термодинамической лаборатории Куйбышевского авиационного института. Основные данные горелки: диаметр сопла 6 мм, диаметр электрода 7 мм, материал электрода — лантанированный вольфрам. Применяемый газ — аргон чистый 1 состава. Расход аргона измерялся ротаметром типа РС-5. Во время эксперимента измерялось также давление аргона на входе в сопло горелки.

#### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Профиль температуры в дуге определялся следующими методами: по относительной интенсивности линии  $\text{AgI } \lambda = 7635\text{Å}$ ; по относительной интенсивности фона при  $\lambda = 4647\text{Å}$ ; по отношению интенсивности линии  $\text{AgI } \lambda = 7635\text{Å}$  к интенсивности линии  $\text{AgII } \lambda = 5009\text{Å}$ . Эти методы описаны в ряде работ [1], [2], [3], [4]. Коротко их сущность состоит в следующем: коэффициент излучения спектральной линии может быть выражен формулой

$$\varepsilon \sim \frac{n(T)}{z(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $n(T)$  — концентрация частиц при температуре  $T$ ;

$z(T)$  — сумма по состояниям;

$E_m$  — энергия возбуждения данной линии.

При увеличении температуры  $n(T)$  непрерывно падает, а  $\exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right)$  стремится к 1, поэтому коэффициент излучения  $\varepsilon$  проходит через максимум при некоторой температуре  $T^*$ . Приняв  $\varepsilon(T^*) = 1$ , получим зависимость относительного коэффициента излучения от температуры.

Аналогичную зависимость можно найти и для сплошного фона, состоящего из тормозного и рекомбинационного континуума [2], [4]. Однако эти результаты будут справедливы только в области  $\lambda = 4500\text{—}6000\text{Å}$ , где коэффициент излучения континуума не зависит от длины волны [5].

Большое значение для измерения температуры имеет метод, основанный на определении отношения интенсивностей атомной и

ионной линии, т. к. он дает возможность проверить наличие термического равновесия по сходимости температурного профиля с профилем, найденным другим независимым методом, например, по относительной интенсивности атомной линии. Воспользовавшись формулой (1), можно записать для отношения интенсивности атомной и ионной линии:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 \lambda_2 g_1}{A_2 \lambda_1 g_2} \cdot \frac{\frac{n_1}{z_1} \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right)}{\frac{n_2}{z_2} \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)}, \quad (2)$$

где  $A_1$  — коэффициент вероятности перехода,

$\lambda_1$  — длина волны линии;

$g_1$  — статистический вес нижнего уровня.

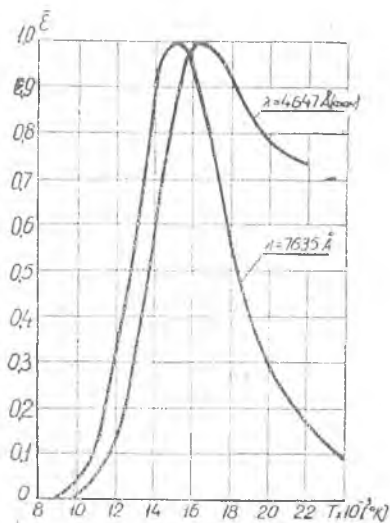
Те же обозначения с индексом 2 относятся к ионной линии.

В нашем случае для измерения температуры были выбраны линии:

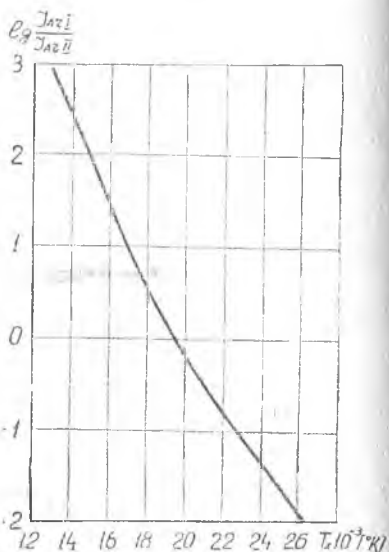
1) ArI  $\lambda_1 = 7635 \text{ \AA}$ ;  $A_1 = 1,44 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$ ;  $g_1 = 5$ ;  $E_1 = 13,17 \text{ эв}$ ;

2) ArII  $\lambda_2 = 5009 \text{ \AA}$ ;  $A_2 = 4,13 \cdot 10^7 \text{ сек}^{-1}$ ;  $g_2 = 6$ ;  $E_2 = 19,22 \text{ эв}$ ,

а также участок континуума при  $\lambda = 4647 \text{ \AA}$ , свободный от наложения посторонних линий. Атомные константы для линий были взяты из работ [6], [7].



Фиг. 5. Зависимость относительного коэффициента излучения для фона и линии ArI  $\lambda = 7635 \text{ \AA}$  от температуры



Фиг. 6. Зависимость отношения интенсивности линий ArI  $\lambda = 7635 \text{ \AA}$  и ArII  $\lambda = 5009 \text{ \AA}$  от температуры

Полученные расчетные зависимости представлены на фиг. 5 и фиг. 6.

Интересно отметить, что температура, определяемая по отношению интенсивности линий AgI к AgII

определяемая по отношению мало чувствительна к ошибкам, допускаемым при нахождении интенсивности. Так, например, изменение отношения интенсивности в 2 раза вызывает изменение температуры примерно на  $600^{\circ}$ .

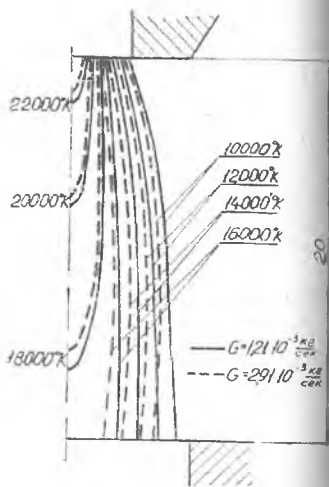
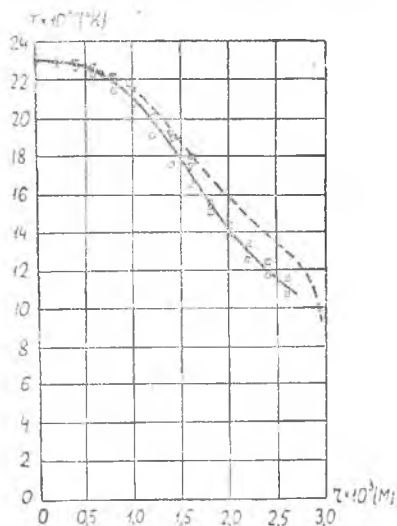
На фиг. 7 и фиг. 8 показаны фотографии участков спектра, выбранных для количественной обработки, в районе  $\lambda = 7635 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 5009 \text{ \AA}$ . Инфракрасная область спектра снималась на пластинках «Инфра-720», а видимая область — на пластинках «Спектральные, тип III». Впечатывание марок почернения для построения характеристических кривых в абсолютных единицах производилось на спектросенситометре ИСП-73. Выдержки при съемке спектрограмм дуги и эталонного спектра были

одинаковые и составляли 0,2 сек. После фотометрирования линий по высоте, которое выполнялось на микрофотометре МФ-4, и перевода кривых почернений в кривые интенсивности, полученные зависимости пересчитывались на радиальное распределение с помощью машины «Урал-1», а затем, используя кривые, представленные на фиг. 5 и фиг. 6, находился профиль температуры в отрезке сечения дуги.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При резке металла сохранились неизменными следующие данные установки: расстояние от среза сопла до металла, равное 10 мм, и скорость резки —  $3 \cdot 10^{-3}$  м/сек. Измерение температуры

производилось в трех сечениях дуги: на срезе сопла, на расстоянии 10 и 20 мм от сопла, и при трех значениях расхода аргона  $1,21 \cdot 10^{-3}$ ,  $1,90 \cdot 10^{-3}$  и  $2,91 \cdot 10^{-3}$  кг/сек. Сила тока составляла 550 а, напряжение — 100, 110 и 115 в соответственно. Давление аргона на срезе сопла равнялось  $10^5$  н/м<sup>2</sup>.



Фиг. 9. Профили температуры на срезе сопла. Сплошной линией показан экспериментальный профиль, пунктиром профиль, рассчитанный по уравнению энергии.

Фиг. 10. Поле изотерм в дуге при силе тока 550а и различных значениях расхода аргона.

О — температура, определенная по линии ArI,  
 □ — температура, определенная по фону,  
 Δ — температура, определенная по отношению интенсивностей атомной и молекулярной линий.

На фиг. 9 показан профиль температуры на срезе сопла (сплошная линия) для расхода аргона  $1,21 \cdot 10^{-3}$  кг/сек. Здесь же

приведены экспериментальные точки. Максимальный разброс точности составляет не более  $\pm 5\%$ , что говорит о хорошем совпадении температур, определенной различными независимыми методами.

Измеренные профили температуры перестроены в поле изотерм, которое представлено на фиг. 10 для максимального и минимального расходов аргона. Интересно сравнить полученный результат со снимками дуги в различных участках спектра, которые наглядно показывают качественную структуру дуги. На фиг. 11 и фиг. 12 показана горелка в работе, причем дуга на фиг. 11 снята через фильтры КС-18 и ИКС-12, имеющие максимум пропускания около 8200Å. В этой области излучение дуги определяется в основном линиями атомов ArI. Дуга на фиг. 12 снята через фильтры СЗС-18 ЖС-17 и НС-8, выделяющих участок спектра 4800—5000Å, где излучение дуги определяется в основном интенсивными линиями

ионов  $\text{ArII}$ . В дуге виден темный язычок (фиг. 11), отходящий от сопла. Здесь степень ионизации близка к единице, и излучают, главным образом, ионы  $\text{ArII}$ . На фиг. 12 виден яркий язычок свечения ионов в зоне, совпадающей с темным язычком на фиг. 11. Эта качественная картина соответствует полю температур в дуге, а также рассчитанным зависимостям коэффициента излучения атомов и ионов от температуры.



Фиг. 11. Горелка в работе. Дуга снята в инфракрасной области.



Фиг. 12. Горелка в работе. Дуга снята в области 4800—5000Å.

Результаты экспериментов говорят о слабом влиянии скорости течения вдоль дуги на температуру. Только в наружных зонах дуги уменьшение температуры составляет 15—20%.

#### РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СРЕЗЕ СОПЛА

Для цилиндрической дуги с вынужденной конвекцией имеет место следующее уравнение баланса энергии:

$$\sigma E^2 = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \lambda \frac{dT}{dr} \right)^+ + \omega + \rho c_p \vec{V} \text{grad } T, \quad (3)$$



где  $\sigma$  — удельная проводимость;  
 $E$  — напряженность поля в столбе дуги;  
 $T$  — температура;  
 $\omega$  — энергия излучения;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  — плотность плазмы при температуре  $T$ ;  
 $c_p$  — теплоемкость при постоянном давлении;  
 $V$  — скорость.

Решение уравнения проводится при следующих предположениях:

- 1) радиус дуги на срезе сопла равен радиусу сопла;
- 2) дуга является объемным излучателем, так что энергию излучения можно представить следующей зависимостью:

$$\omega = \eta \sigma E^2, \quad (4)$$

где  $\eta$  по данным Неймана [8] величина постоянная в широком диапазоне силы тока, равная 0,465;

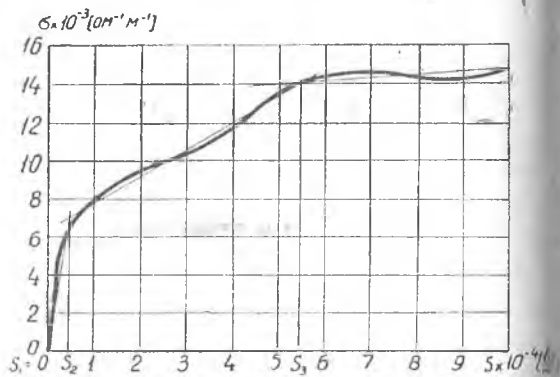
- 3) скоростной член  $\rho c_p \vec{v} \cdot \text{grad } T$  равен нулю.

Если ввести функцию теплопроводности  $s = \int_0^T \lambda dT$ , то уравнение (3) можно записать в виде

$$\sigma E^2 (1 - \eta) = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \frac{ds}{dr} \right). \quad (5)$$

Используя приведенные в работе [8] графики  $\lambda = f(T)$  и  $\sigma = f(T)$  была построена зависимость  $\sigma = f(s)$ , которая представлена на

фиг. 13. Для решения уравнения (3) функция  $\sigma(s)$  аппроксимируется несколькими прямыми. В [9] дается решение для одной прямой, в работе [10]  $\sigma(s)$  заменяется двумя прямыми. Чтобы повысить точность расчета, в нашем случае аппроксимация была сделана тремя прямыми (фиг. 13):



Фиг. 13. Зависимость  $\sigma = f(T)$ .

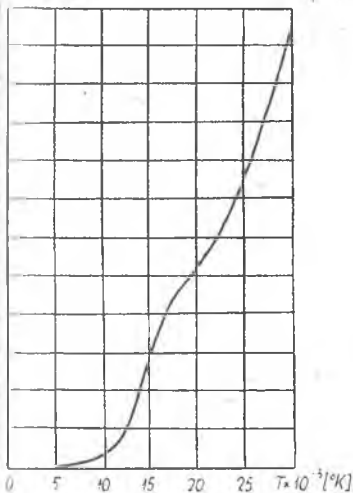
$$\sigma = A_i S + B_i,$$

где  $i$  — номер участка.

Если ввести новое переменное  $x_i = Er \sqrt{(1 - \eta) A_i}$ , то уравнение преобразуется в уравнение Бесселя:

$$\sigma = - \frac{1}{x_i} \frac{d}{dx_i} \left( x_i \frac{d\sigma}{dx_i} \right). \quad (6)$$

$\delta \cdot 10^{-4} [ \frac{B_3}{A_3} ]$



Фиг. 14. Зависимость функции теплопроводности от температуры.

После решения уравнения и определения постоянных интегрирования из условий стыковки  $S$  и производных на границах участков, получаем для функции теплопроводности  $S$ :

на третьем участке

$$S = \frac{k}{\beta_3^2} I_0 \left( \frac{\beta_3}{\rho_3} \rho \right) - \frac{B_3}{A_3}; \quad (7)$$

на втором участке

$$S = -\frac{\pi k}{4} \left[ \Delta_1 I_0 \left( \frac{\beta_2}{\rho_2} \rho \right) \Delta_2 N_0 \left( \frac{\beta_2}{\rho_2} \rho \right) \right] - \frac{B_2}{A_2}; \quad (8)$$

на первом участке

$$S = S_1 + \frac{\pi^2 k \beta_2^2}{16} \left[ (\Delta_1 \Delta_1' \Delta_2 \Delta_2' I_0 \left( \frac{\beta_1}{\rho_1} \rho \right) + (\Delta_1 \Delta_1'' + \Delta_2 \Delta_2'') N_0 \left( \frac{\beta_1}{\rho_1} \rho \right)) \right], \quad (9)$$

$$\rho = \frac{r}{R}; \quad \beta_1 = ER \rho_1 \sqrt{(1-\eta) A_1}; \quad \beta_2 = ER \rho_2 \sqrt{(1-\eta) A_2};$$

$$\beta_3 = ER \rho_3 \sqrt{(1-\eta) A_3}; \quad s_1 = 0; \quad \rho_1 = 1;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} I_0(\beta_3) & N_0(\beta_4) \\ I_2(\beta_3) & N_2(\beta_4) \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} I_2(\beta_3) & I_2(\beta_4) \\ I_0(\beta_3) & I_0(\beta_4) \end{vmatrix};$$

$$\Delta_1' = \begin{vmatrix} N_2(\beta_5) & I_2(\beta_2) \\ N_0(\beta_5) & I_0(\beta_2) \end{vmatrix}; \quad \Delta_2' = \begin{vmatrix} N_2(\beta_5) & N_2(\beta_2) \\ N_0(\beta_5) & N_0(\beta_2) \end{vmatrix};$$

$$\Delta_1'' = \begin{vmatrix} I_2(\beta_2) & I_2(\beta_2) \\ I_0(\beta_2) & I_0(\beta_2) \end{vmatrix}; \quad \Delta_2'' = \begin{vmatrix} N_2(\beta_2) & I_2(\beta_2) \\ N_0(\beta_2) & I_0(\beta_2) \end{vmatrix};$$

$$\beta_4 = ER \rho_3 \sqrt{(1-\eta) A_2}; \quad \beta_5 = ER \rho_2 \sqrt{(1-\eta) A_1};$$

$$k = \frac{(A_3 S_3 + B_3) \beta_3^2}{A_3 I_0(\beta_3)};$$

$I$  и  $N$  — функции Бесселя и Неймана.

По найденным значениям  $S$  можно построить профиль температуры, используя зависимость  $S = f(T)$  (фиг. 14).

Расчетный профиль температуры на срезе сопла при силе тока  $I = 100$  а показан на фиг. 9 (пунктир).

## ВЫВОДЫ

1) Температуру дуги в процессе резки можно определять с точностью  $\pm 5\%$ . Совпадение профилей температуры, найденных различными методами, свидетельствует о наличии термического равновесия в дуге.

2) Скорость газа оказывает слабое влияние на температуру. Так, увеличение расхода газа в 2,4 раза вызывает уменьшение температуры от 5 до 15—20% в направлении от оси к периферийным зонам.

3) Расчет профиля температуры на срезе сопла по уравнению баланса энергии с учетом излучения показывает удовлетворительное совпадение с экспериментом. Расхождение температуры в наружных зонах дуги составляет примерно 15—20%, что может быть объяснено скорее недостаточно известной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры, чем влиянием скоростного члена в уравнении энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ларенц. О методе измерения очень высоких температур почти прозрачных дуговых разрядов, в сб. «Оптическая пирометрия плазмы» стр. 257—270, ИЛ, 1960.
2. Меккер, Петерс. Электронный континуум в столбе сильноочаговой угольной дуги и в других дугах, в сб. «Оптическая пирометрия плазмы» стр. 224—239, ИЛ, 1960.
3. В. Финкельбург и Г. Меккер. Электрические дуги и термическая плазма, ИЛ, 1961.
4. Olsen H. N., Thermal and electrical properties of an argon plasma. The Physics of Fluids, vol. 2, no. 6, p. 614—623, 1959.
5. Busz G. und Finkelburg, Thermische Lichtbögen hoher Temperatur und niedriger Brennspannung, Zeitschrift für Physik, Bd. 10, s. 212—225, 1959.
6. Olsen H. N., Determination of properties of an optically thin argon plasma, в сб. Temperature. Its measurement and control in science and industry, vol. 3, part. 1, p. 593—606, New-York, 1962.
7. Atomic Energy Levels, Vol. 1, Sec. 1, By, C. E. Moore, Circular of the National Bureau of Standards 467, Washington, 1948.
8. Neumann W., Über den radialen Temperaturverlauf im Stationären und im impulsmodulierten Argon — Hochtemperaturbogen, Beiträge aus der Plasma Physik, Bd. 2, Hf. 2, s. 80—115, 1962.
9. Г. Меккер. О характеристиках цилиндрической дуги, в сб. Движущаяся плазма, стр. 438—477, ИЛ, 1961.
10. Schmitz G. und Ihlenbusch J., Berechnung der Temperaturverteilung und der Charakteristik eines zylindrischen Stickstoffbogens, Zeitschrift für Physik, Bd. 166, Hf. 4, s. 460—467, 1962.
11. Д. С. Кузнецов. Специальные функции, изд. «Высшая школа», 1962.
12. Э. А. Чистова. Таблицы функций Бесселя от действительного аргумента и интегралов от них, АН СССР, 1958.