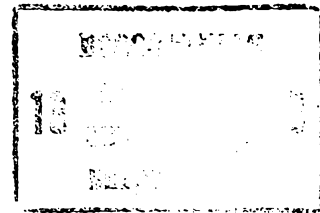




ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

# ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



(21) 2915901/18-25

(22) 14.05.80

(46) 23.03.85. Бюл. № 11

(72) И.А. Васильева и А.С. Уринсон

(71) Институт высоких температур  
АН СССР

(53) 536.35(088.8)

(56) 1. Кадышев А.Е. Измерение температуры пламени. М., "Наука", 1961, с. 85.

2. Лицки Я. Разработка системы для измерения температуры в двухфазной струе продуктов сгораемой угольной пыли. В сб.: МГД-электростанции на твердом топливе. Под ред. Шумяцкого Б.Я. ЦВТ, АН СССР, 1979, с. 132 (прототип).

(54)(57) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА И ЧАСТИЦ В РАБОЧЕМ ТЕЛЕ МГД-ГЕНЕРАТОРА, заключающийся в том, что измеряют интенсивность излучения источника сравнения  $\Phi_1(\lambda_i)$ , интенсивность излучения рабочего тела  $\Phi_2(\lambda_i)$ , интенсивность излучения рабочего тела, просвечиваемого излучением источника сравнения  $\Phi_3(\lambda_i)$  по крайней мере на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , одна из которых  $\lambda_1$  расположена в области резонансной линии щелочного металла, отличающийся тем, что, с целью повышения точности измерения температуры газа и частиц, длину волны  $\lambda_2$  выбирают так, что она отстоит от  $\lambda_1$  на расстоянии, определяемом соотношением:

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\Delta \lambda_\phi} > \left[ \frac{5,5 \cdot 10^{19}}{\epsilon(\lambda_2)} \frac{P}{T_{\min}} \gamma \lambda_{1, \Delta \lambda_\phi} \right]^{\frac{1}{x}},$$

где  $P$  - давление продуктов сгорания, атм;

$T_{\min}$  - приближенное значение минимально возможной температуры рабочего тела МГД-генератора, °К;

$\gamma$  - молярное содержание атомов щелочного металла с резонансной линией на  $\lambda_1$

$\epsilon$  - глубина излучателя, см;

$\epsilon(\lambda_2)$  - допустимая оптическая плотность на  $\lambda_2$ ;

$\alpha_{\Delta \lambda_\phi}$  - атомарный фойхтовский коэффициент поглощения ( $\text{см}^2$ ) на расстоянии  $\Delta \lambda_\phi$  от центра линии,

где фойхтовский контур переходит в степенной с показателем степени  $(-x)$ , причем при проведении измерений на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  из последовательности сигналов  $\Phi_1(\lambda_i)$ ,  $\Phi_2(\lambda_i)$ ,  $\Phi_3(\lambda_i)$  при требуемой погрешности  $K(\%)$  выбирают лишь те группы, которые удовлетворяют соотношению

$$\frac{\left( \frac{\Phi_1(\lambda_i) - \Phi_3(\lambda_i)}{\Phi_2(\lambda_i)} \right)^2 \Phi_2(\lambda_i) + \Phi_1(\lambda_i) + \Phi_3(\lambda_i)}{(\Phi_1(\lambda_i) + \Phi_2(\lambda_i) - \Phi_3(\lambda_i))^2} <$$

$$< \left( \frac{14380}{\lambda_i T_{\max}} \right)^2 \frac{10^{-4} \text{ К}^2}{K_1},$$

где  $K_1$  - коэффициент, определяющий величины дробового эффекта в фотоприемнике с размерностью, равной размерности  $\Phi_1(\lambda_i)$ ;

$T_{\max}$  - приближенное значение максимально возможной температуры рабочего тела МГД-генератора, °К;

$\lambda_i$  - длины волн, мкм.

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения температуры продуктов сгорания рабочего тела МГД-генератора.

Известен способ определения температуры продуктов сгорания методом обращения спектральных линий [1].

При определении температуры газа этим методом измеряют три световых потока в области спектральной линии, характеризующей излучение газа: интенсивность излучения источника сравнения  $\Phi_1(\lambda_1)$  с известной температурой  $T_1$ , интенсивность излучения продуктов сгорания  $\Phi_2(\lambda_1)$ , интенсивность излучения продуктов сгорания и просвечиваемого излучением источника сравнения  $\Phi_3(\lambda_1)$  для соответствующей длины волны  $\lambda_1$  ( $i = 1, 2$ ).

С помощью этих трех величин можно определить температуру чисто газообразных продуктов сгорания, однако, если в продуктах сгорания имеются твердые или жидкие частицы, то данным способом определить температуру газа и частиц нельзя.

Наиболее близким к изобретению является способ определения газа и частиц в рабочем теле МГД-генератора, заключающийся в том, что измеряют интенсивность излучения  $\Phi_1(\lambda_1)$ ,  $\Phi_2(\lambda_1)$ ,  $\Phi_3(\lambda_1)$  на разных длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , при этом  $\lambda_1$  — длина волны, характерная для резонансной линии калия, а  $\lambda_2$  выбирают так, чтобы излучение на этой длине волны было связано только с частицами [2].

Однако измерение температуры газа и частиц ведется с неконтролируемой в процессе опытов случайной приборной погрешностью. Если при измерениях в стационарной среде эту погрешность можно уменьшить увеличением числа измерений, то при исследовании нестационарного рабочего тела МГД-генератора этого сделать нельзя, когда характерное время измерения рабочего тела в МГД-генераторе сравнимо со временем между получением двух последовательных групп сигналов  $\Phi_1(\lambda_1)$ ,  $\Phi_2(\lambda_1)$ ,  $\Phi_3(\lambda_1)$ , по которым рассчитывается температура.

Нет критерия, который определяет количественно расстояние между длинами волн  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ . Такой критерий необходим, так как резонансные линии щелочных металлов в МГД-генераторах обладают широкими крыльями и есть

опасность при выборе  $\lambda_2$ , опирающиеся лишь на знание расположения соседних спектральных линий, остаться на крыле линии и получить сведения о температуре частиц с большой неконтролируемой погрешностью.

Целью изобретения является повышение точности измерения температуры.

Поставленная цель достигается тем, что в способе определения температуры газа и частиц в рабочем теле МГД-генератора, заключающемся в том, что измеряют интенсивность излучения источника сравнения  $\Phi_1(\lambda_1)$ , интенсивность излучения рабочего тела  $\Phi_2(\lambda_1)$ , интенсивность излучения рабочего тела, просвечиваемого излучением источника сравнения  $\Phi_3(\lambda_1)$ , по крайней мере на двух длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , одна из которых  $\lambda_1$  расположена в области резонансной линии щелочного металла, длину волны  $\lambda_2$  выбирают так, что она отстоит от  $\lambda_1$  на расстоянии, определяемым соотношением:

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\Delta \lambda_\phi} > \left[ \frac{5,5 \cdot 10^{19}}{\tau(\lambda_2)} \frac{p}{T_{\min}} y\% \varepsilon \alpha_{1, \Delta \lambda_\phi} \right]^{\frac{1}{x}},$$

где  $p$  — давление продуктов сгорания атм;

$T_{\min}$  — приближенное значение минимально возможной температуры рабочего тела МГД-генератора, °К;

$y\%$  — молярное содержание атомов щелочного металла с резонансной линией на  $\lambda_1$ ;

$\varepsilon$  — глубина излучателя, см;

$\alpha_{1, \Delta \lambda_\phi}$  — допустимая оптическая плотность линии на  $\lambda_2$ ;

$\alpha_{1, \Delta \lambda_\phi}$  — атомарный фойхтовский коэффициент поглощения (см<sup>2</sup>) на расстоянии  $\Delta \lambda_\phi$  от центра линии,

где фойхтовский контур переходит в степенной с показателем степени ( $-x$ ), причем при проведении измерений на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  из последовательности групп сигналов  $\Phi_1(\lambda_1)$ ,  $\Phi_2(\lambda_1)$ ,  $\Phi_3(\lambda_1)$  при заданной погрешности  $K$  выбирают лишь те группы, которые удовлетворяют соотношению

$$\frac{\left( \frac{\Phi_1(\lambda_1) - \Phi_3(\lambda_1)}{\Phi_2(\lambda_1)} \right)^2 \Phi_2(\lambda_1) + \Phi_1(\lambda_1) + \Phi_3(\lambda_1)}{(\Phi_1(\lambda_1) + \Phi_2(\lambda_1) - \Phi_3(\lambda_1))^2} < 1$$

$$< \left( \frac{14380}{\lambda_1 T_{\max}} \right)^2 \frac{10^{-4} K^2}{K_1},$$

где  $k_1$  - коэффициент, определяющий величину дробового эффекта в фотоприемнике с размерностью, равной размерности  $\Phi_1(\lambda_i)$ ;

$T_{\text{макс}}$  - приближенное значение максимально возможной температуры рабочего тела МГД-генератора, °K;

$\lambda_i$  - длины волн, мкм.

Таким образом, имея возможность вводить и использовать в способе два количественных критерия, определяющих качество и пригодность каждого произведенного измерения на выбранной длине волны и расстояние между длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , можно провести определение температуры рабочего тела МГД-генератора с заданной точностью.

Критерий, определяющий качество произведенных измерений, может быть получен из анализа случайных приборных погрешностей устройства для измерения температуры. Приемным элементом устройств, измеряющим интенсивности  $\Phi_1(\lambda_1)$ ,  $\Phi_2(\lambda_2)$ ,  $\Phi_3(\lambda_3)$ , обычно является фотоприемник, величина случайных приборных погрешностей при этом определяется, главным образом, дробовым эффектом фотоприемника.

Учитывая это, можно записать выражение приборной относительной случайной погрешности в измерении температуры в следующем виде

$$\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 = \left(\frac{\lambda_i T}{14380}\right)^2 \frac{\left(\frac{\Phi_1(\lambda_1) - \Phi_3(\lambda_3)}{\Phi_2(\lambda_2)}\right)^2 \Phi_2(\lambda_2) + \Phi_1(\lambda_1) + \Phi_3(\lambda_3)}{(\Phi_1(\lambda_1) + \Phi_2(\lambda_2) + \Phi_3(\lambda_3))^2} k_1 \quad (1)$$

Этот эффект может быть определен экспериментально или рассчитан по известным соотношениям. Если приемлемая погрешность задана величиной  $k$ , то из (1) получаем условие пригодности измерения, накладываемое на сигналы  $\Phi_1(\lambda_1)$ ,  $\Phi_2(\lambda_2)$ ,  $\Phi_3(\lambda_3)$ :

$$\frac{\left(\frac{\Phi_1(\lambda_1) - \Phi_3(\lambda_3)}{\Phi_2(\lambda_2)}\right)^2 \Phi_2(\lambda_2) + \Phi_1(\lambda_1) + \Phi_3(\lambda_3)}{(\Phi_1(\lambda_1) + \Phi_2(\lambda_2) + \Phi_3(\lambda_3))^2} < \frac{10^{-4} k^2}{k_1} \times \left(\frac{14380}{\lambda_i T_{\text{макс}}}\right)^2 \quad (2)$$

Критерий, определяющий минимальное расстояние между длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , может быть получен из условия доста-

точно малой оптической плотности линии на ее крыле. Оптическая плотность - есть произведение концентрации атомов толщины излучающего слоя  $l$  и атомарного коэффициента поглощения  $\alpha_1$ , зависимость которого от длины волны исследована экспериментально и может быть представлена в виде

$$\alpha_1 = \alpha_{10} \Delta \lambda \phi \left(\frac{\Delta \lambda}{\Delta \lambda \phi}\right)^{-x},$$

где  $\Delta \lambda$  - расстояние длины волны  $\lambda_i$  от центра спектральной линии;

$\alpha_{10} \Delta \lambda \phi$  - атомарный фойхтовский коэффициент поглощения на расстоянии  $\Delta \lambda \phi$ , где фойхтовский контур переходит в степенной с показателем степени  $(-x)$ . Выражая концентрацию атомов через давление газовой смеси ( $p$ ) и молярное процентное содержание щелочных атомов  $y\%$ , а также задавая максимально допустимую величину оптической плотности на крыле  $\tau(\lambda_2)$ , получаем необходимое соотношение для выбора расстояния между  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$\left| \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\Delta \lambda \phi} \right| > \left[ \frac{5,5 \cdot 10^{19}}{\tau(\lambda_2)} \frac{p}{T_{\text{мин}}} y\% \alpha_{10} \Delta \lambda \phi \right]^{\frac{1}{x}} \quad (3)$$

Здесь  $T_{\text{мин}}$  - приближенное значение минимально возможной температуры в МГД-генераторе, °K.

Таким образом, при измерении с заранее заданной требуемой точностью температуры нестационарного рабочего тела МГД-генератора с произвольной щелочной добавкой и при наличии частиц длина волны  $\lambda_1$ , на которой ведется измерение, должна быть выбрана в области резонансной линии щелочного металла, другая длина волны  $\lambda_2$  должна отстоять от  $\lambda_1$  на величину, определяемую неравенством (3), а пригодность каждой группы сигналов  $\Phi_1(\lambda_1)$ ,  $\Phi_2(\lambda_2)$ ,  $\Phi_3(\lambda_3)$  для измерения температуры должна быть проверена с помощью соотношения (2). Если неравенство (2) не выполняется, соответствующая группа сигналов должна быть отброшена.

На чертеже изображена функциональная схема устройства для измерения температуры газа в МГД-генераторе, работающем на продуктах сгорания угля.

Устройство содержит основной источник сравнения 1, просвечивающий

плазму, и опорный 2, который позволяет следить за изменением чувствительности фотоэлектронного умножителя вследствие изменения внешних магнитных полей, нестабильности источника питания и утомляемости фотокатода. Питание источников сравнения осуществляется от стабилизированных блоков питания 3. Излучение от основного источника сравнения направляется с помощью линзы 4 через защитное стекло 5 на объект измерения температуры 6. При измерении температуры в МГД-генераторе используется квазипараллельный пучок света. При этом нить источника сравнения устанавливается в фокусе линзы 4. Линза 7 фокусирует измерение от плазмы на входную щель 8 монохроматора 9, используемого для выделения излучения в узком спектральном интервале. Излучение от опорного источника с помощью линзы 10 и призмы 11 направляется на кубпризму с полупрозрачной диагональю 12 и далее поступает на входную щель монохроматора. На выходе монохроматора установлен фотоэлектронный преобразователь 13. В данной схеме используется временное разделение световых потоков, которое обеспечивается модуляторами: основным 14 и вспомогательным 15. Синфазное вращение моторов модуляторов осуществляется специальным блоком 16. С выхода преобразователя 13 сигналы через эмиттерный повторитель 17 подаются в измерительный блок 18, где происходит преобразование электрических сигналов, а затем три сигнала, пропорциональных потоку излучения плазмы, источника сравнения и суммарному потоку излучения плазмы и лампы поступают на вход вычислительной машины (ЭВМ) 19. К выходу ЭВМ 19 подключен датчик 20,

установленный на монохроматоре и дающий сигнал, пропорциональный измеряемой длине волны  $\lambda_1$ .

Настройка монохроматора на разные участки спектра производится поворотом его диспергирующей системы мотором 21 от ЭВМ в соответствии введенной в нее программой через тиристорный блок 22. Результаты расчета температуры газа представляются на дисплей 23.

Основные условия опытов:  $P=1$  атм;  $T_{\text{мин}}=2300^\circ\text{K}$ ;  $T_{\text{макс}}=3000^\circ\text{K}$ ; молярное содержание калия 1%; толщина излучателя  $l=20$  см.

В устройстве применяется фотоприемник. Экспериментально измеренный коэффициент дробного эффекта в использованной схеме нагружения фотоприемника определяется величиной  $K_1=2$  мВ.

Измерение температуры велось в области резонансной линии натрия,  $\lambda_1=5890\text{Å} \pm 0,59$  мкм. Величина  $\lambda_2$  определялась по соотношению (3). Содержание атомов натрия по отношению к содержанию атомов калия, как показывают специальные опыты с техническим поташом, составляет не более 0,05, поэтому  $y=0,05\%$ . Пользуясь известными данными, получаем  $\Delta\lambda_{\text{ф}}=10\text{Å}$ ,  $x=1,2$ .

В соответствии с формулами для Фойхтовского контура находим  $\Delta\lambda_{10\text{Å}}=2 \cdot 10^{-11}\text{см}^2$ . Наконец, положив  $\varphi(\lambda_2) \leq 0,1$ , по соотношению (3) находим  $|\lambda_1 - \lambda_2| > 21\text{Å}$ . Выбирают  $\lambda_2=5860\text{Å}$ .

В табл. 1 и 2 приведены некоторые данные по измерениям на длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . В первых трех столбцах приведены сигналы  $\phi_1(\lambda_1)$ ,  $\phi_2(\lambda_1)$ ,  $\phi_3(\lambda_1)$ . В четвертом — комбинация сигналов, входящая в левую часть неравенства (2),

(измерения на  $\lambda_1=5890\text{Å}$ )

Т а б л и ц а 1

№	$\phi_1(\lambda_1)$	$\phi_2(\lambda_1)$	$\phi_3(\lambda_1)$	$\phi$	Пригодность § 7,5	$T_{\text{ф.т.}}, ^\circ\text{K}$	$T_{\text{газа}}, ^\circ\text{K}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4,6	6,5	8,0	1,5	+	2560	2600
2	4,0	15,3	16,0	2,7	+	2790	2820
3	4,6	6,5	10	15,7	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8
4	4,0	-	9,5	7,9	-	-	-
5	4,0	6	8	3,7	+	2660	2740

$$\phi = \frac{\frac{(\phi_1(\lambda_i) - \phi_3(\lambda_i))^2}{\phi_2(\lambda_i)} \phi_2(\lambda_i) + \phi_1(\lambda_i) + \phi_3(\lambda_i)}{(\phi_1(\lambda_i) + \phi_2(\lambda_i) + \phi_3(\lambda_i))^2} b^{-1}$$

(измерения на  $\lambda_2 = 5860 \text{ \AA}$ )

Т а б л и ц а 2

№	$\phi_1(\lambda_i)$	$\phi_2(\lambda_i)$	$\phi_3(\lambda_i)$	$\phi$	Пригодность $\geq 30$	Т частиц, °К
1	3,2	0,9	3,5	19	+	2470
2	3,2	0,8	3,4	18	+	2440
3	3,2	1,0	3,5	19	+	2450
4	3,2	0,6	3,2	18	+	2370
5	3,2	1,0	3,2	6,4	+	2370

Требуемая погрешность измерения температуры газа составляет  $K=1,5\%$ , а измерения температуры частиц —  $K=3\%$ . Рассчитаем при  $\lambda_1$  допустимую величину правой части неравенства (2). Она составляет 7,5 при  $\lambda_1$ . Аналогично при  $\lambda_2$  величина равна 30. Сопоставление с этими величинами значений четвертого столбца дает оценку пригодности измеренных сигналов для определения температуры газа с требуемой точностью.

В программу вычислительной машины включены оценка пригодности по соотношению (2), поэтому расчет температуры произведен во всех случаях, за исключением строк 3,4 таблицы 1, в которых группы сигналов на длине волны  $\lambda_1$  не пригодны для определения температуры газа с требуемой точностью. В шестом столбце приведены температуры, рассчитанные по известной формуле обращенного метода обращения

$$T = T_{\lambda} \left[ 1 - \frac{\lambda T_{\lambda}}{C_2} \ln \left( \frac{\phi_2(\lambda_i)}{\phi_1(\lambda_i) + \phi_2(\lambda_i) - \phi_3(\lambda_i)} \right) \right]^{-1}$$

где  $T_{\lambda} = 2373^{\circ}\text{K}$ ; $C_2 = 1,4387 \cdot 10^{-2} \text{ м.град.}$ 

Затем вычислительная машина вводит поправку на отличие измеренной на длине волны  $\lambda_1$  температуры  $T_{\phi t}$  от температуры газа  $T_2$  из-за влияния частиц на измерении на длине волны  $\lambda_1$ . Известное соотношение для поправки введены в ЭВМ в следующем виде:

$$T_2 = T_{\phi t} \left[ 1 - \frac{\lambda_1 T_{\phi t}}{C_2} \ln(1 + \alpha) \right];$$

где

$$\alpha = \beta(1 - \gamma)$$

$$\beta = \frac{\ln \frac{\phi_1(\lambda_2)}{\phi_3(\lambda_2) - \phi_2(\lambda_2)}}{\ln \left[ \frac{\phi_3(\lambda_2) - \phi_2(\lambda_2)}{\phi_3(\lambda_1) - \phi_2(\lambda_1)} \frac{\phi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_2)} \right]}$$

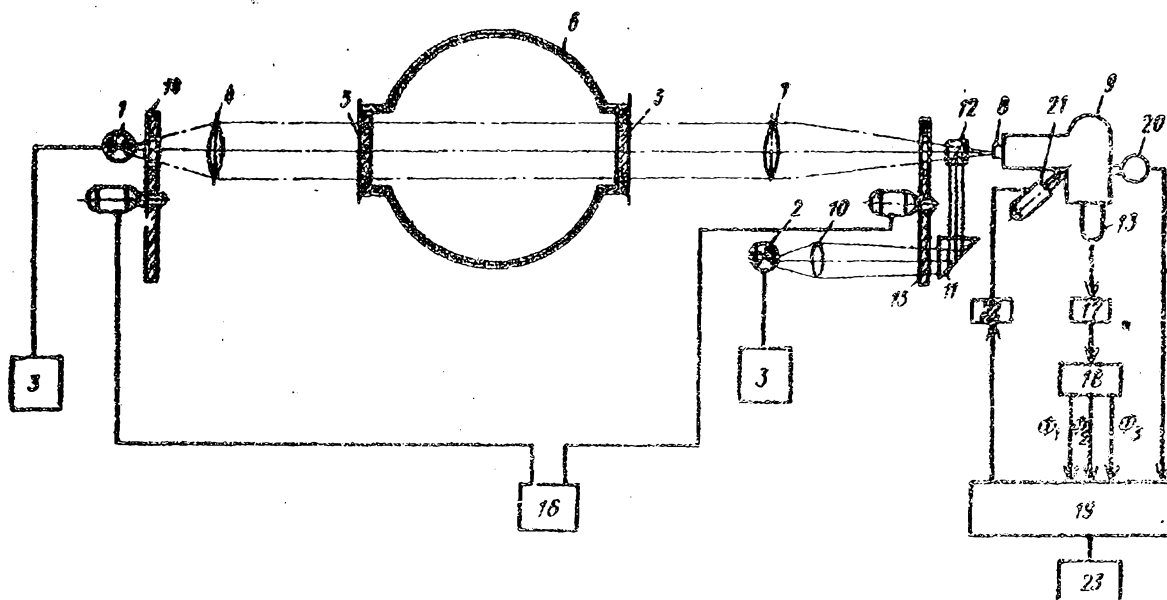
$$\gamma = \frac{\phi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_1)} \frac{\phi_2(\lambda_1) + \phi_1(\lambda_1) - \phi_3(\lambda_1)}{\phi_2(\lambda_2) + \phi_2(\lambda_1) - \phi_3(\lambda_1)} \frac{\phi_1(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_1)}$$

Так как поправка обычно невелика, в расчете используются средние значе-

ния  $\Phi_1(\lambda_2) = 3,2 \text{ В}$ ;  $\Phi_2 \lambda_2 = 0,86 \text{ В}$ ,  
 $\Phi_3(\lambda_2) = 3,6 \text{ В}$ . В седьмом столбце  
 табл. 1 приведены окончательные зна-  
 чения температуры газа.

Использование способа определения  
 температуры с заданной заранее точ-

ностью дает возможность надежно оп-  
 тимизировать процесс работы сгорания,  
 экономить топливо на МГД-электростан-  
 ций, повысить эффективность преобра-  
 зования тепловой энергии в электри-  
 ческую.



Редактор П. Горькова

Составитель Н. Ананьева

Техред С. Мигунова

Корректор М. Розман

Заказ 1686/3

Тираж 897

Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета СССР

по делам изобретений и открытий

113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., д. 4/5

Филиал ИПИ "Патент", г. Ужгород, ул. Проектная, 4