ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Том 11 *1973* *№ 4*

УДК 533.9.082.5

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С НЕПРЕРЫВНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

И. А. Васильева, В. В. Кириллов, И. А. Максимов, Г. П. Малюжонок, В. Б. Новосадов

Приводится описание устройства для автоматического непрерывного измерения температуры плазмы в МГДГ. В работе устройства использован обобщенный метод обращения спектральных линий. Устройство содержит оптическую схему с источником сравнения, спектральным прибором и фотоэлектрической приставкой к нему, вычислитель с блоком разделения каналов и регистрирующим прибором. В лабораторных условиях проведено измерение температуры пламени горелки Меккера. Проведены измерения температуры плазмы в канале крупных МГДГ, приводятся результаты измерений.

Эффективность работы различных плазменных установок таких, в частности, как равновесный МГД-генератор, существенно зависит от температуры изотермической плазмы. Присутствие операторов вблизи объекта исследования часто бывает нежелательным или недопустимым. Поэтому автоматическое непрерывное измерение температуры плазмы является насущной необходимостью.

Для автоматического измерения температуры плазмы в канале МГДГ выбран обобщенный метод обращения спектральных линий, основанный на измерении интенсивности излучения и поглощения спектральных линий [1]. Для определения температуры этим методом необходимо знать три величины: поток излучения плазмы в спектральной линии $\Phi_{пл}$; поток излучения при просвечивании плазмы источником сравнения $\Phi_{пл+л}$ и поток излучения от источника сравнения, излучающего сплошной спектр $\Phi_л$.

Считая форму спектральной линии прямоугольной, эти три величины на основании закона Кирхгофа и формулы Вина можно записать в следующем виде:

$$\Phi_л = C_1\lambda^{-5}Ds'\,(d/f)^2hsk_1k_2e^{-C_2/\lambda T_л}, \tag{1}$$

$$\Phi_{пл} = aC_1\lambda^{-5}\delta\lambda\,(d/f)^2hsk_2e^{-C_2/\lambda T_{пл}}, \tag{2}$$

$$\Phi_{пл+л} = C_1\lambda^{-5}Ds'\,(d/f)^2hsk_1k_2e^{-C_2/\lambda T_л} - aC_1\lambda^{-5}\delta\lambda\,(d/f)^2hsk_1k_2e^{-C_2/\lambda T_л} + aC_1\lambda^{-5}\delta\lambda\,(d/f)^2hsk_2e^{-C_2/\lambda T_{пл}}, \tag{3}$$

где $T_{пл}$ — истинная температура плазмы; $T_л$ — яркостная температура источника сравнения; C_1 и C_2 — константы излучения; $\delta\lambda$ — ширина линии; a — поглощательная способность в линии; D — линейная дисперсия, Å/*мм*; d/f — относительное отверстие камерного объектива; s' и s — ширина входной и выходной щели; h — высота выходной щели спектрографа; k_1, k_2 — коэффициенты пропускания элементов оптической системы до плазмы и после плазмы соответственно.

Из приведенных выше соотношений можно получить следующие выражения:

$$T_{пл} = T_л \Big/ \left[1 - \frac{\lambda T_л}{C_2} \ln\left(\frac{k_1 \Phi_{пл}}{\Phi_{пл} + \Phi_л - \Phi_{пл+л}}\right)\right] \quad (4)$$

—для температуры и

$$a\delta\lambda/Ds' = [\Phi_{пл} - (\Phi_{пл+л} - \Phi_л)]/\Phi_л \quad (5)$$

— для поглощательной способности.

Для надежного измерения необходимо использовать яркую линию. В низкотемпературной плазме со щелочными добавками наиболее яркими являются резонансные линии щелочных металлов. Выбор линий ограничен, с одной стороны, малой чувствительностью фотоприемника к красному и инфракрасному спектрам, с другой — быстрым спадом излучательной способности источника сравнения к фиолетовому концу спектра, если в качестве источника сравнения использовать лампу накаливания.

Обобщенный метод обращения использован в [2] для измерения температуры плазмы в ударной трубе. Измеряемая температура определялась только после проведения опыта и обработки записей осциллографа.

В работе [3] предлагается устройство для автоматического измерения температуры продуктов сгорания, использующее обобщенный метод обращения в несколько измененном виде. Авторы рассматривали два случая: первый, названный ими «метод поглощения», предлагается использовать при температуре источника сравнения выше температуры пламени, и второй—«метод излучения», применяется когда температура источника сравнения ниже температуры плазмы. Авторами проведены измерения распределения температуры пламени по профилю бунзеновской горелки.

Однако описываемое устройство обладает недостатками. В случае использования вольфрамовой лампы с максимальной температурой в 2700° К диапазон температур, измеряемых методом поглощения, находится в пределах 1850—2550° К. При температурах, приемлемых для МГДГ, необходимо использовать в методе поглощения высокотемпературные источники сравнения. (Аналогичным недостатком обладает метод измерения температуры плазмы, описанный в [4].) В методе излучения работы [3] при определении температуры авторы предлагают пользоваться пересчетом по градуировочной кривой, что снижает ценность автоматического измерения температуры. Кроме того, если температура пламени может принимать значения выше и ниже температуры источника сравнения, это приводит к необходимости изменения схемы решающего устройства.

Описание устройства. В ИВТ АН СССР совместно с ОКБ ИВТ было создано автоматическое устройство для измерения температуры высокотемпературного потока, также основанное на обобщенном методе обращения. Функциональная схема устройства показана на рис. 1. Прибор состоит из источника сравнения и его блока питания, модулятора, линз, спектрографа ИСП-51 и фотоэлектрической приставки к нему ФЭП-1, усилителя сигналов, блока разделения каналов, детекторов импульсов, вычислительного и регистрирующего устройств. В автоматическом устройстве температура плазмы представляется в виде напряжения и может непосредственно подаваться в систему автоматической регистрации и обработки данных (АСРО).

Рассмотрим подробнее каждый из указанных узлов устройства и работу устройства в целом.

В качестве источника сравнения использовалась вольфрамовая светоизмерительная лампа СИ-10-300 (*2*), градуированная во ВНИИКе на яркостные температуры с точностью 0,1%. Стабилизированный источник питания СИП-30 (*1*) с точностью стабилизации 0,05% позволял плавно регулировать ток лампы. Указанная система позволяла воспроизводить температуру лампы с точностью ~2°.

Излучение от источника сравнения с помощью линзы *4* направлялось на объект измерения температуры. При работе на каналах МГДГ использовался параллельный пучок. Линза *6* фокусировала излучение от плазмы и пламени горелки на входную щель спектрографа.

Спектрограф ИСП-51 (*7*) выделял яркую резонансную линию натрия, которая выбиралась из следующих соображений: во-первых, резонансная *D*-линия натрия легко возбуждается в продуктах сгорания органических топлив, во-вторых, натрий содержится в виде примеси в техническом поташе, используемом в качестве легкоионизирующейся присадки в МГДГ, и, в-третьих, в спектральном интервале излучения натрия обычно

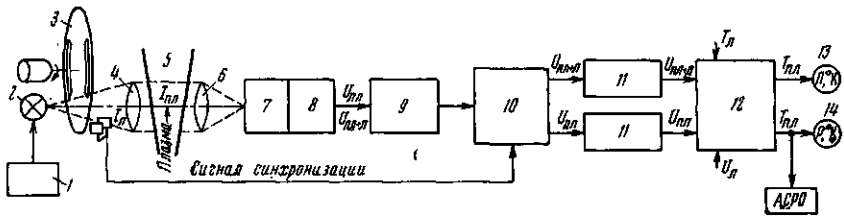

Рис. 1. Функциональная схема устройства:

1 — источник тока СИП-30; *2* — лампа СИ-10-300; *3* — диск модулятора; *4*, *6* — линзы; *5* — канал; *7* — ИСП-51; *8* — ФЭП-1; *9* — усилитель сигналов; *10* — блок разделения каналов; *11* — детектор импульсов; *12* — вычислитель на блоках ЭВМ МН-7; *13* — показывающий прибор; *14* — регистрирующий прибор;

фотоумножители обладают достаточной чувствительностью, а источник сравнения в этой области имеет достаточную излучательную способность.

Модулятор *3* — диск с отверстиями, приводимый во вращение синхронным электродвигателем. Когда световой поток от источника сравнения проходил через отверстие модулятора, на вход спектрального прибора попадал поток $\Phi_л$ в том случае, если плазмы в канале нет, либо поток $\Phi_{пл+л}$, если плазма в канале есть. Когда световой поток от источника сравнения закрыт диском модулятора, на вход спектрографа попадает поток $\Phi_{пл}$. Световые потоки от источника сравнения и плазмы регистрировались фотоумножителем фотоприставки ФЭП-1 (*8*). Выходной сигнал ФЭУ подавался на усилитель сигналов через усилитель-согласователь (на схеме не показан), служащий для согласования высокоомной нагрузки ФЭУ с кабелем, соединяющим фотоумножитель с остальными узлами устройства.

Блок разделения каналов *10* служит для того, чтобы выходной сигнал ФЭУ, состоящий из непрерывной последовательности импульсов, представить в виде двух напряжений, пропорциональных световым потокам $\Phi_{пл}$ и $\Phi_{пл+л}$. Такой узел промышленностью не изготовляется, поэтому его следовало разработать и изготовить самостоятельно. Схема блока разделения каналов, выполненного в рассматриваемом устройстве, представлена на рис. 2. Фотодиоды $ФД_1$ и $ФД_2$, расположенные за модулятором, дают команду формирователям импульсов, которые открывают ключи T_7T_8 и T_9T_{10}. Фотодиоды включены так, что один из них дает команду при открытии модулятором светового пучка от источника сравнения, а другой — при закрытии. Этим самым обеспечивается синхронность работы модулятора и ключей. С выхода ключей сигналы поступают на детекторы импульсов *11* (рис. 1), при этом конденсаторы C_{11} и C_{12} заряжаются до амплитудных напряжений, соответствующих световым потокам $\Phi_{пл}$ и $\Phi_{пл+л}$. Эти напряжения передаются затем в вычислительное устройство *12*, которое производит расчет температуры по формуле

$$T_{пл} = T_л \Big/ \left[1 - \frac{\lambda T_л}{C_2} \ln\left(\frac{k_1 U_{пл}}{U_{пл} + U_л - U_{пл+л}}\right)\right], \qquad (6)$$

где $U_л$, $U_{пл}$ и $U_{пл+л}$ — напряжения, пропорциональные световым потокам $\Phi_л$, $\Phi_{пл}$ и $\Phi_{пл+л}$.

Для расчета $T_{пл}$ по формуле (6) используется моделирующая нелинейная установка МН-7 (МН-7м). Необходимые для расчета коэффициенты λ, C_2 и $T_л$, а также величина $U_л$, которая измеряется перед проведением измерений, вводятся в память устройства.

К вычислительному устройству подключается регистрирующее, состоящее из самопишущего потенциометра и цифрового вольтметра с печатающим устройством *14*.

Выбор режима работы фотоумножителя. В нагрузочном сопротивлении фотоумножителя наряду с сигналом, пропорциональным световому потоку, падающему на фотокатод, выделяются сигналы помех. Эти помехи

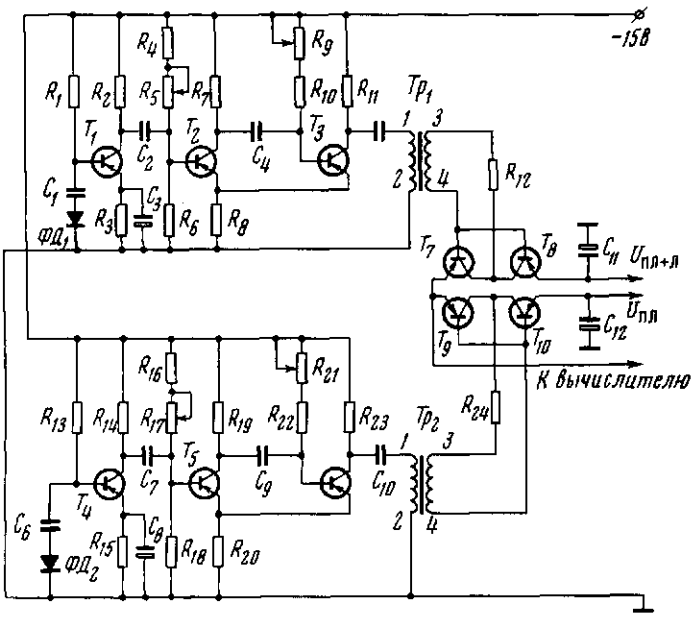

Рис. 2. Блок разделения каналов (БРК), принципиальная электрическая схема

создаются внутренними источниками электрических флуктуаций, важнейшие из которых — дробовой эффект в фотоумножителе и тепловые флуктуации в нагрузочном сопротивлении. В нашем случае усиления постоянного тока можно записать выражение для квадрата отношения напряжения сигнала к суммарному отношению шумов ρ^2 в следующем виде [5]:

$$\rho^2 = \frac{\pi I R C}{[eM(1+B)+2kT]\,\mathrm{arctg}\,2\pi f R C}, \qquad (7)$$

где I — ток в нагрузочном сопротивлении ФЭУ; R — величина нагрузочного сопротивления ФЭУ; M — коэффициент усиления фотоумножителя; $(1+B)$ — коэффициент, учитывающий дробовой эффект на эмиттерах фотоэлектронного умножителя; T — температура нагрузочного сопротивления, °К; f — верхняя частота полосы пропускания устройства; C — емкость, параллельная нагрузочному сопротивлению.

В нашем случае величина, обусловленная тепловыми флуктуациями, достаточно мала и ею можно пренебречь. Из приведенного выражения видно, что отношение сигнала к шуму увеличивается с ростом тока, нагрузочного сопротивления и емкости. Эти три величины должны быть ограничены. Ток фотоумножителя ограничен, во-первых, потому, что при больших токах фотокатода резче выражается эффект утомления, т. е. изменение чувствительности фотокатода во времени и, во-вторых, напря-

жение на аноде фотоумножителя не должно превышать максимального значения, при котором нарушается линейность световой характеристики.

Световая характеристика фотоумножителя ФЭУ-17*А* снималась при напряжении питания $U_0 = 800$ *в* при различных входных и выходных щелях спектрографа ИСП-51 в спектральном интервале *D*-линии натрия. Было определено, что линейность световой характеристики сохраняется при напряжении на аноде ФЭУ до ~ 25 *в*.

Определим допустимую величину постоянной времени цепи нагрузки $\tau = RC$. Эквивалентную схему включения фотоумножителя можно представить в виде источника тока, включенного последовательно с нагрузочным сопротивлением, параллельно которому включена емкость. Пусть край отверстия модулятора пересекает световой поток за время t_1, а время, в течение которого световой поток полностью проходит через отверстие модулятора, t_2. Можно считать, что во время пересечения диском потока, его величина нарастает и спадает линейно.

Можно записать дифференциальные уравнения для нашего случая

$$RC\frac{dU_c}{dt} + U_c = \frac{U_m}{t_1}t \quad \text{для } 0 < t < t_1, \tag{8}$$

$$RC\frac{dU_c}{dt} + U_c = U_m \quad \text{для } t_1 < t < t_2, \tag{8a}$$

где U_c — напряжение на конденсаторе; U_m — амплитудное значение сигнала.

Решая эти уравнения, получим

$$U_c = \frac{U_m\tau}{t_1}\left(\frac{t}{\tau} - 1 + e^{-t/\tau}\right) \quad \text{для } 0 < t < t_1,$$

$$U_c = \frac{U_m\tau}{t_1}\left[\frac{t_1}{\tau} - e^{-t/\tau}(1 - e^{-t_1/\tau})\right] \quad \text{для } t_1 < t < t_2.$$

Можно принять, что за время $t_2 = 2t_1$ сигнал достигает значения, равного $U_c = 0{,}99\ U_m$. В этом случае ошибка в температуре не превышает $0{,}2\%$. Зная длительность фронта t_1 (из конструктивных данных), можно графически определить постоянную времени τ.

Как видно из (8), *R* и *C* одинаково влияют на отношение сигнал/шум, а величина *R* определяет значение выходного напряжения ФЭУ, поэтому необходимо брать максимальное значение *R* при минимальной емкости *C*. В этом случае потребуется меньший коэффициент усиления усилителя. Емкость *C* обычно состоит из емкости монтажа и емкости кабеля. Зная эту емкость, можно определить величину нагрузочного сопротивления *R*. В нашем случае величина сопротивления нагрузки ФЭУ составляла 1,2 *мгом*.

Результаты и погрешность измерений. Отработка методики измерений температуры с автоматической регистрацией проводилась на горелке Меккера с температурой пламени до 2100 °К. Охранный факел обеспечивал постоянную температуру по сечению во внутреннем факеле [6], в который вводили распыленный раствор хлористого натрия. Содержание атомов натрия в пламени могло изменяться в пределах $2{,}7\cdot10^{11} \div 14\cdot10^{12}$ $см^{-3}$. В предварительных опытах отрабатывалась оптическая схема устройства вместе с ФЭУ, при этом измерения проводили со сходящимися пучками лучей. Блок разделения каналов и вычислительное устройство в этих опытах не использовались. Выходные сигналы фотоумножителя измерялись ламповым вольтметром, а затем рассчитывалась температура по формуле (7) по измеренным значениям $U_л$, $U_{пл}$ и $U_{пл+л}$. Результаты расчетов сравнивались с температурой, измеряемой визуальным методом обращения.

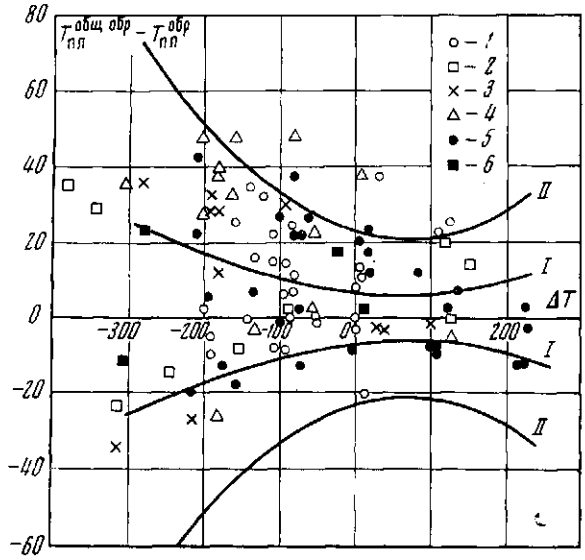

Рис. 3. Погрешности измерения температуры:

1 — концентрация р-ра NaCl 25 *г/л*; *2* — 50; *3* — 5; *4* — 10; *5* — 25; *6* — 50; *1—2* — входная щель — 10 *мк*; *3—6* — 25 *мк*; *I* — $\Delta\Phi/\Phi = 1\%$; *II* — 3%, *I*, *II* — расчетные кривые

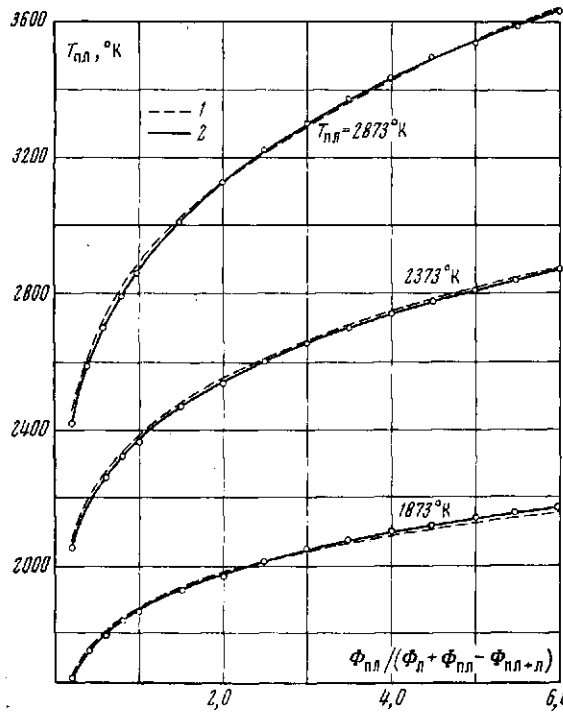

Рис. 4. Проверка работы вычислителя:

1 — расчет; *2* — эксперимент

На рис. 3 приведены результаты измерений температуры на лабораторной горелке. По оси абсцисс отложена разность температур лампы и пламени, а по оси ординат — разность температур, измеренных обобщенным и визуальными методами обращения. Видно, что с ростом разности температур $T_л - T_{пл}$ имеется тенденция к увеличению погрешности измерений.

В наших опытах не замечено существенного влияния ширины входной щели и концентрации излучающих атомов на погрешность измерений. По-видимому, влияние этих факторов на погрешность измерения значительно меньше влияния других.

На рис. 3 построены рассчитанные погрешности измерения температуры при различных значениях относительной погрешности определения $\varphi = k_1\Phi_{пл}(\Phi_л \div \Phi_{пл} - \Phi_{пл+л})^{-1}$

$$\Delta T_{пл} = T^2_{пл}\left(\frac{\lambda}{C_2}\frac{\Delta\varphi}{\varphi} + \frac{\Delta T_л}{T_л^2}\right),$$

$$\frac{\Delta\varphi}{\varphi} = \frac{\Delta\Phi_{пл}(|\Phi_л - \Phi_{пл+л}|/\Phi_{пл}) + \Delta\Phi_л + \Delta\Phi_{пл+л}}{\Phi_{пл} + \Phi_л - \Phi_{пл+л}}.$$

Расчеты проводились для $k = 1$ и $\Delta T_л/T_л = 0{,}01$. На этой стадии работы точность градуировки лампы невысокая и составляла 1%, при этом учитывалось поглощение светового потока окном лампы. Поглощение и отражение линзой светового потока источника сравнения дает потери

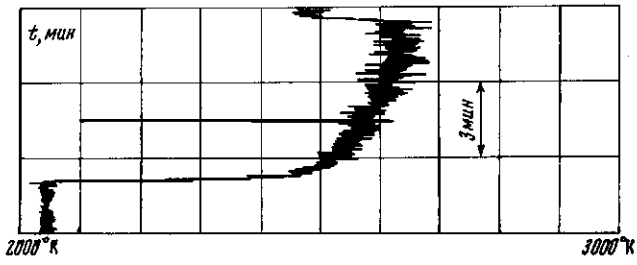

Рис. 5. Измерение температуры плазмы в переходном процессе на У-02

интенсивности ~ 10%. Учет этих потерь полностью компенсируется изменением излучательной способности вольфрама при переходе от длины волны градуировки 0,65 *мк* к рабочей длине волны *D*-линии натрия.

Сравнение опытных точек с расчетными кривыми показывает, что в этих опытах относительная погрешность $\Delta\varphi/\varphi$ достигала 20%. Это приводило к погрешности измерения температуры пламени не более 2%. Сравнительно большой разброс сигналов фотоумножителя объясняется шумами ФЭУ и колебаниями расхода раствора хлористого натрия. Погрешность измерения каждого из трех сигналов составляла 3 ÷ 5%. Кроме того, выше говорилось о выборе оптимального отношения сигнал/шум. Однако в процессе работы устройства это отношение не остается постоянным, а ухудшается с изменением температуры, так как уменьшается ток фотокатода. Расчеты показывают, что при изменении температуры от 3000 до 1800 °K отношение сигнал/шум может изменяться приблизительно в 15 раз.

Отдельно проводилась проверка точности расчетов температуры вычислителем, использующимся в устройстве. Для этого на вход вычислителя МН-7 от имитатора сигналов подавались соответствующие напряжения, и показания приборов сравнивались с точно рассчитанными по формуле (7) значениями температуры. На рис. 4 показаны результаты проверки вычислительного устройства. Как видно из рисунка, погрешность вычисления температуры не превосходила 0,5%. Следует подчеркнуть, что указанная погрешность обеспечивалась тщательной настройкой нелинейной установки МН-7 с помощью цифрового вольтметра и непрерывным контролем ее параметров.

На той же горелке Меккера проведены измерения температуры с использованием всей системы в целом (с блоком разделения каналов и вычислительным устройством). В этих опытах использовался диск модуля-

тора с четырьмя отверстиями. Частота модуляции 200 *гц*, длительность импульсов, открывающих ключи, 1,5 *мсек*.

Измерения температуры с помощью автоматического устройства показали, что различие в значениях температур, измеренных визуальным методом обращения и автоматическим устройством, в худшем случае не превышало 20° К. Величина $\Delta\varphi/\varphi$ при этом не превышала 4%. Уменьшение погрешности измерения величины $\Delta\varphi/\varphi$, вероятно, связано с тем, что в каждом канале $U_{пл}$ и $U_{пл+л}$ блока разделения каналов были включены конденсаторы большой емкости, которые уменьшали полосу пропускания и улучшали отношение сигнал/шум.

Для проверки работоспособности устройства на полупромышленных установках проведены измерения температуры плазмы в канале МГДГ установки У-02 [7]. Результаты измерений контролировались визуальным методом обращения. Измерения проводились при различных режимах работы камеры сгорания при сжигании природного газа в подогретом воздухе с кислородным обогащением и без него. Расхождение температур, измеренных устройством и визуальным методом обращения без кислородного обогащения, не превышало 35°.

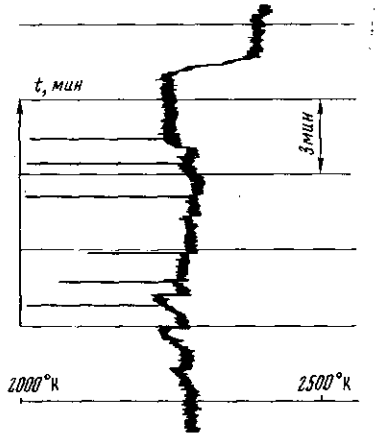

Рис. 6. Запись температуры плазмы в канале установки У-25

На рис. 5 показано изменение температуры в переходном процессе в канале установки У-02 при подаче кислорода в камеру сгорания. В кислородном режиме наблюдались довольно значительные пульсации температуры. Такие колебания температуры происходят с частотой от нескольких *гц* и выше и не могут быть зафиксированы при измерении температуры визуальным методом обращения.

На рис. 6 показано записанное с помощью автоматического устройства изменение температуры плазмы в канале МГДГ У-25 [8] при изменении режима работы камеры сгорания. На этом же рисунке видно повышение температуры плазмы при обогащении воздуха кислородом. Обогащение воздуха кислородом в этом случае невелико и поэтому не наблюдаются большие пульсации температуры, типичные для кислородных режимов.

Авторы выражают благодарность А. П. Нефедову и М. А. Рыбакову за помощь в работе.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
19 VII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Свиридов, Н. Н. Соболев. Ж. эксперим. и теор. физ., 24, 93, 1953.
2. Ф. С. Файзуллов. Тр. ФИАН, 18, 105, 1962.
3. R. Huster, D. Kisch, M. Mahnig. Berichte der Gesellschaft für Phys. Chem. I und II, 73, 1, 1969.
4. D. Liddon Thomas. Combustion and Flame, 12, № 6, 569 (B68), 1960.
5. Н. О. Чечик, С. М. Файнштейн, Т. М. Лифшиц. Электронные умножители. ГИТТЛ, 1957.
6. И. А. Васильева, Л. В. Депутатова, В. В. Кириллов, А. П. Нефедов. Оптика и спектроскопия, 33, № 3, 1972.
7. В. А. Кириллин, А. Е. Шейндлин. Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии. «Энергия», 1968.
8. В. А. Кириллин, П. С. Непорожний, А. Е. Шейндлин. Докл. C_4-72 на VII МИРЭК, М., 1968.