

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2738999

Способ определения температуры потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет ИТМО" (Университет ИТМО) (RU)*

Авторы: *Мехреньгин Михаил Викторович (RU), Мирошниченко Георгий Петрович (RU), Чистяков Алексей Павлович (RU), Мешковский Игорь Касьянович (RU)*

Заявка № 2020109147

Приоритет изобретения 28 февраля 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 21 декабря 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 28 февраля 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ильев





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01K 2013/024 (2020.08); *G01J 5/0014* (2020.08); *G01J 2005/0081* (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2020109147, 28.02.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.02.2020Дата регистрации:
21.12.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.02.2020

(45) Опубликовано: 21.12.2020 Бюл. № 36

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр.,
49, лит. А, Университет ИТМО, ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Мехреньгин Михаил Викторович (RU),
Мирошниченко Георгий Петрович (RU),
Чистяков Алексей Павлович (RU),
Мешковский Игорь Касьянович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Национальный
исследовательский университет ИТМО"
(Университет ИТМО) (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: М.В. Mekhregin, I.K. Meshkovskii,
V.A. Tashkinov, V.I. Guryev, A.V. Sukhinets, D.S.
Smirnov, "Multispectral pyrometer for high
temperature measurements inside combustion
chamber of gas turbine engines", Measurement,
V. 139, 2019, pp. 355-360. RU 2686385 C1,
25.04.2019. RU 2583853 C1, 10.05.2016. WO
2018167095 A1, 20.09.2018. US 6422745 B1, (см.
прод.)

(54) Способ определения температуры потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом

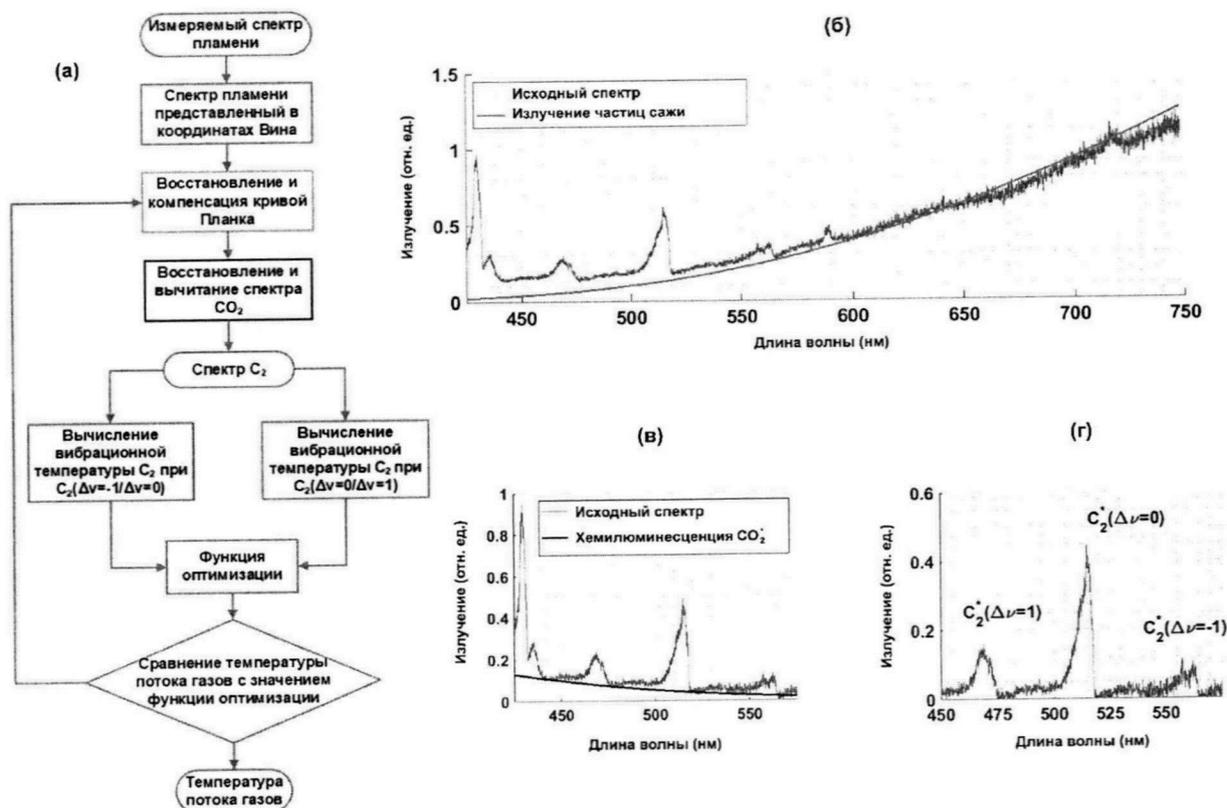
(57) Реферат:

Изобретение относится к области бесконтактного измерения высоких температур потока газов, в частности к способам измерения температуры потока газов в камере сгорания и обработки спектральных данных оптических средств контроля, и может быть использовано для экспериментальных исследований рабочего процесса в зоне горения камер сгорания и повышения надежности при эксплуатации современных авиационных и вертолетных двигателей и энергетических турбин. Предложен способ определения температуры потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом, который включает регистрацию в диапазоне длин волн от 400 до 800

нм спектра теплового излучения потока газов, образующегося при горении углеводородного топлива, а о температуре потока газов судят на основании температуры частиц сажи, присутствующих в потоке газов, которую рассчитывают при помощи аппроксимации закона излучения Планка в координатах Вина. Для расчета температуры частиц сажи из зарегистрированного спектра выделяют область теплового излучения потока газов в диапазоне длин волн от 600 до 800 нм, по вычисленной температуре частиц сажи по формуле Планка рассчитывают спектр теплового излучения частиц сажи. Вычитают рассчитанный спектр теплового излучения частиц сажи из первоначального

спектра теплового излучения потока газов, рассчитывают спектр хемиллюминесценции радикалов CO_2^* , вычитают спектр хемиллюминесценции радикалов CO_2^* из спектра теплового излучения потока газов, полученного после вычитания спектра теплового излучения частиц сажи, рассчитанного по формуле Планка. Рассчитывают интегральные интенсивности серий электронно-колебательных переходов и на их основании определяют два отношения интегральных интенсивностей серий электронно-колебательных переходов. По полученным отношениям, и, используя полученные расчетным путем с помощью выражений зависимости $G(1,0)$ и $G(-1,0)$ отношений интегральных интенсивностей полос излучения радикалов C_2^* от колебательной температуры радикалов получают два значения колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$. Сравнивают полученные значения колебательной температуры $T_{C_2^*}$ и получают ошибку вычисления колебательной температуры $T_{C_2^*}$. Определяют два новых значения колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$, вычисляют величину, на которую необходимо скорректировать температуру частиц

сажи при помощи рассчитываемой функции оптимизации, и, используя скорректированное значение температуры частиц сажи, повторяют вышеперечисленные действия до тех пор, пока разница значений колебательных температур радикалов $\Delta T_{C_2^*}^i$ не станет меньше заданного значения погрешности, а значение температуры частиц сажи T , при котором выполняется это условие, принимается за достоверное значение искомой температуры потока газов. Технический результат - повышение достоверности и расширение области применения способа определения температуры потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом на основе спектра теплового излучения потока газов, за счет расчета и компенсации спектральных составляющих, соответствующих тепловому излучению частиц сажи и радикалов CO_2^* в составе суммарного теплового излучения потока газов, измерения колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$ по полосам излучения в видимом диапазоне и определения температуры потока газов на основе температуры частиц сажи, скорректированной на основании колебательных температур радикалов $T_{C_2^*}$. 1 з.п. ф-лы, 4 ил.



ФИГ.4

R U 2 7 3 8 9 9 9 C 1

R U 2 7 3 8 9 9 9 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

G01K 2013/024 (2020.08); *G01J 5/0014* (2020.08); *G01J 2005/0081* (2020.08)(21)(22) Application: **2020109147, 28.02.2020**(24) Effective date for property rights:
28.02.2020Registration date:
21.12.2020

Priority:

(22) Date of filing: **28.02.2020**(45) Date of publication: **21.12.2020 Bull. № 36**

Mail address:

**197101, Sankt-Peterburg, Kronverkskij pr., 49, lit.
A, Universitet ITMO, OIS i NTI**

(72) Inventor(s):

**Mekhrengin Mikhail Viktorovich (RU),
Miroshnichenko Georgij Petrovich (RU),
Chistyakov Aleksej Pavlovich (RU),
Meshkovskij Igor Kasyanovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Natsionalnyj issledovatel'skij
universitet ITMO" (Universitet ITMO) (RU)**(54) **METHOD OF DETERMINING GAS FLOW TEMPERATURE IN COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINE WITH HYDROCARBON FUEL**

(57) Abstract:

FIELD: measurement.

SUBSTANCE: invention relates to noncontact measurement of high gas flow temperatures, in particular to methods of measuring temperature of gas flow in combustion chamber and processing spectral data of optical monitoring means, and can be used for experimental studies of working process in combustion zone combustion chambers and improving operating reliability of modern aircraft and helicopter engines and power turbines. Disclosed is method of determining temperature of gas flow in combustion chamber of gas turbine engine with hydrocarbon fuel, which includes recording in the wavelength range from 400 to 800 nm of the spectrum of heat radiation of the stream of gases formed during combustion of hydrocarbon fuel, and the gas flow temperature is determined based on the temperature of soot particles present in the gas stream, which is calculated by approximating Planck's radiation law in Wien coordinates. To calculate temperature of soot particles from the detected spectrum, a region of thermal radiation of the gas stream is selected in the wavelength range from 600 to 800 nm, as per the calculated temperature of soot particles by Planck's

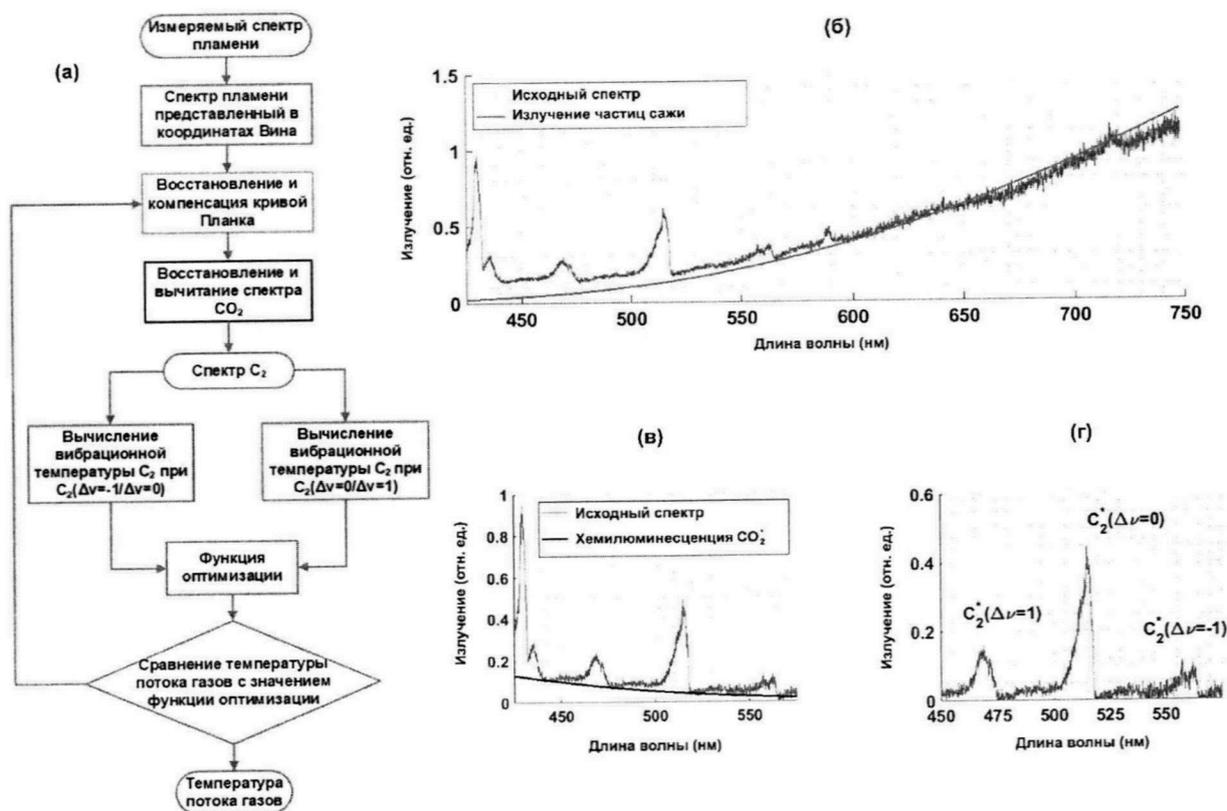
formula, spectrum of thermal emission of soot particles is calculated. Calculated spectrum of thermal radiation of soot particles is subtracted from initial spectrum of heat radiation of gas flow, spectrum of chemoluminescence of CO_2^* radicals is calculated, chemiluminescence spectrum of CO_2^* radicals is subtracted from spectrum of heat radiation of gas flow obtained after subtraction of spectrum of thermal emission of soot particles calculated by Planck formula. Integral intensities of the series of electron-vibrational transitions are calculated, and on their basis two ratios of integral intensities of the series of electronic-oscillatory transitions are determined. According to the obtained ratios, and using expressions $G(1,0)$ obtained using a calculation method, and $G(-1,0)$ of ratios of integral intensities of emission bands of radicals C_2^* from vibrational temperature of radicals, two values of oscillatory temperature of $T_{C_2^*}$, radicals are obtained. Obtained values of the oscillation temperature $T_{C_2^*}$ are compared to obtain the error of calculating the

oscillatory temperature $T_{C_2^*}$. Determining two new values of oscillatory temperature of radicals $T_{C_2^*}$, calculating a value, on which it is necessary to correct temperature of soot particles using the calculated optimization function, and using the corrected temperature value of particles of soot, repeating said actions until until difference of values of vibrational temperatures of radicals $\Delta T_{C_2^*}^i$ becomes less than a predetermined error value, and temperature value of particles of soot T, at which this condition is met, is taken as reliable value of required temperature of gas flow.

EFFECT: technical result is increase of reliability

and expansion of application area of method for determination of gas flow temperature in combustion chamber of gas turbine engine with hydrocarbon fuel based on spectrum of heat radiation of gas flow, due to the compensation calculation and spectral components corresponding to thermal radiation of the particles of soot and CO_2^* radicals in the composition of the total gas flow of the thermal radiation, measuring the vibrational temperature of the $T_{C_2^*}$ radicals in the visible band and determining the gas flow temperature based on the temperature of the soot particles corrected based on the vibrational temperatures of the $T_{C_2^*}$ radicals.

1 cl, 4 dwg



ФИГ.4

RU 2738999 C1

RU 2738999 C1

Изобретение относится к области бесконтактного измерения высоких температур потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом, в частности к способам спектральной пирометрии потоков и обработки спектральных данных оптических средств контроля, и может быть использовано для
 5 экспериментальных исследований рабочего процесса в зоне горения камер сгорания и повышения надежности при эксплуатации современных авиационных и вертолетных двигателей, а также энергетических турбин.

Известен способ спектрометрического определения температуры потока газов (патент РФ №2686385, МПК G01K 13/02, G01J 5/10, G06N 3/02, G06N 3/08, G06F 17/50, приор. 23.05.2018), представляющий собой измерение соотношений интенсивностей
 10 излучения потока газов не менее чем в двух областях спектра в видимом диапазоне и не менее чем в двух областях спектра в инфракрасном диапазоне, по которым оценивается текущая температура потока газов при помощи искусственной нейронной сети. Набор весовых коэффициентов для искусственной нейронной сети получен
 15 предварительно методом обратного распространения ошибки. В качестве обучающей выборки для искусственной нейронной сети используются в том числе показания опорной термопары. Процесс обучения нейронной сети включает корректировку весовых коэффициентов нейронной сети с целью достижения заданной точности вычисления температуры потока газов.

Недостатком способа является применение для определения температуры потока газов искусственной нейронной сети, требующей предварительного обучения на основании показаний опорной термопары, что ограничивает возможности применения
 20 представленного способа, поскольку использование термопар в зонах горения камер сгорания современных двигателей не представляется возможным в силу их быстрого перегрева и выхода из строя, а точность измерения предложенного метода ограничена
 25 точностью измерений термопары.

Наиболее близким к предлагаемому способу и принятым за прототип является способ определения температуры потока газов в зоне смешения камеры сгорания газотурбинного двигателя, представленный в статье (M.V. Mekhregin, I.K. Meshkovskii,
 30 V.A. Tashkinov, V.I. Guryev, A.V. Sukhinets, D.S. Smirnov, Multispectral pyrometer for high temperature measurements inside combustion chamber of gas turbine engines, Measurement 139 (2019) 355-360, <https://doi.org/10.1016/i.measurement.2019.02.084>). представляющий собой измерение спектра теплового излучения потока газов в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм в зоне горения камеры сгорания и последующее вычисление температуры частиц
 35 сажи на основании измеренного спектра при помощи аппроксимации закона излучения Планка в координатах Вина, вычисленное значение температуры частиц сажи принимают за искомую величину температуры потока газов.

Недостатком способа является отсутствие анализа спектральных составляющих, входящих в состав спектра теплового излучения потока газов, и использование области
 40 спектра в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм для вычисления температуры частиц сажи, приводящее к снижению достоверности температурных показаний и ограничивающее область применения способа для контроля температуры реальных промышленных силовых установок, спектр излучения потока газа в которых неизбежно
 45 содержит иные источники излучения в выбранном диапазоне длин волн, такие как радикалы C_2^* , и радикалы CO_2^* .

Задачей, на решение которой направлено данное изобретение, является повышение достоверности и расширение области применения способа определения температуры потока газов на основе спектра теплового излучения частиц сажи за счет расчета и

компенсации спектральных составляющих, соответствующих тепловому излучению частиц сажи и радикалов CO_2^* , а также корректировки температуры потока газов на основании колебательных температур радикалов C_2^* .

5 Технический результат достигается за счет регистрации спектра излучения потока газов в области спектра от 400 нм до 800 нм, расчета температуры частиц сажи по области спектра излучения потока газов в области длин волн от 600 до 800 нм, расчета и компенсации спектра теплового излучения частиц сажи на основании формулы Планка, расчета и компенсации спектра хемиллюминесценции радикалов CO_2^* , измерения
10 интегральных интенсивностей полос излучения радикалов C_2^* : №1 (468-474 нм,), №2 (507-517 нм,), №3 (550-564 нм), а также последующего вычисления двух колебательных температур радикалов C_2^* по двум отношениям интегральных интенсивностей спектральных полос излучения радикалов C_2^* в выбранном оптическом диапазоне и
15 определения температуры потока газов на основе температуры частиц сажи, скорректированной на основании двух колебательных температур C_2^* .

Поставленная задача решается следующим образом.

В способе определения температуры потока газов, включающем регистрацию спектра
20 излучения потока газов, в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм в зоне горения камеры сгорания на основании полученного спектра при помощи аппроксимации закона излучения Планка в координатах Вина рассчитывают температуру частиц сажи T , по которой судят о температуре потока газов, рассчитывают и компенсируют спектральные составляющие, соответствующие тепловому излучению частиц сажи и радикалов CO_2^*
25 в составе суммарного теплового излучения потока газов, измеряют колебательные температуры радикалов C_2^* по не менее чем трем полосам электронно-колебательных переходов излучения радикалов C_2^* в видимом диапазоне и определяют температуру потока газов на основе температуры частиц сажи, скорректированной на основании
30 двух колебательных температур C_2^* .

Сущность заявляемого изобретения поясняется чертежами, где на ФИГ. 1 представлена принципиальная схема реализующего заявляемый способ устройства для сбора данных, преобразовываемых в температуру, на ФИГ. 2 представлен типичный
35 спектр горения углеводородного пламени и отмечены основные составляющие этого спектра. В видимом диапазоне данный спектр излучения состоит из трех основных компонентов: непрерывного спектра излучения частиц сажи [1], хемиллюминесценции радикалов CO_2^* (250-600 нм), дискретных полос излучения радикалов C_2^* (468-474 нм, 507-517 нм, 550-564 нм) и хемиллюминесценции радикалов CH^* [2]. Кроме того, на ФИГ.
40 2 представлены спектр излучения частиц сажи и спектр хемиллюминесценции CO_2^* , рассчитанные математически. На ФИГ. 3 представлены зависимости, позволяющие выполнить преобразование отношения полос излучения радикалов C_2^* в колебательную температуру радикалов C_2^* . На ФИГ. 4 (а) представлена блок-схема способа определения температуры потока газов на основании теплового излучения частиц сажи и
45 колебательной температуры радикалов C_2^* , а также процесс выделения спектра излучения сажи и спектра излучения радикалов CO_2^* из исходного спектра излучения потока газов.

На ФИГ. 4 (б) - рассчитанный математически спектр теплового излучения частиц сажи в потоке газов на основании Закона излучения Планка и температуры частиц сажи, рассчитанной на первом этапе. На ФИГ. 4 (в) - рассчитанный математически спектр хемилюминесценции CO_2^* и спектр теплового излучения потока газов, полученный

5 после вычитания математически рассчитанного спектра теплового излучения частиц сажи. На ФИГ. 4 (г) - полученный спектр излучения радикалов C_2^* , содержащий набор дискретных компонент, появляющихся в результате электронно-колебательных переходов радикалов C_2^* .

10 Сущность заявляемого изобретения поясняется следующим. Непрерывный спектр эмиссии частиц сажи лежит в широкой полосе длин волн и описывается законом излучения Планка. В случае углеводородного топлива, область спектра излучения потока газов в диапазоне от 600 до 800 нм включает в себя исключительно тепловое излучение частиц сажи и не искажена хемилюминесценцией других веществ, участвующих

15 в реакции горения. Данная область спектра предоставляет достаточную информацию для изменения температуры частиц сажи, входящих в состав потока газов. Пример спектра теплового излучения частиц сажи, рассчитанный математически, представлен на ФИГ. 2.

Хемилюминесценция радикалов CO_2^* описывается непрерывным спектром излучения

20 в диапазоне длин волн от 250 до 600 нм. Пример спектра хемилюминесценции радикалов CO_2^* , полученный математически в соответствии с алгоритмом, представленным в статье [4], представлен на ФИГ. 2.

Спектр излучения радикалов C_2^* возникает в результате электронно-колебательных

25 переходов молекулы C_2^* . Радикал C_2^* переходит с одного из колебательных уровней v' возбужденного электронного состояния на один из колебательных уровней и v'' невозбужденного электронного состояния. В результате электронно-колебательного перехода в спектре излучения формируется дискретная составляющая. Разность между колебательными квантовыми числами Δv является основной характеристикой перехода.

30 Так, длины волн фотонов, излученных в рамках переходов с $\Delta v=1$ сосредоточены в области длин волн 468,6-473,8 нм, $\Delta v=0$: 507,2-516,6 нм, $\Delta v=-1$: 550,3-563,7 нм.

Анализ спектра излучения радикалов C_2^* позволяет оценить колебательную температуру радикалов C_2^* . Интенсивность рассматриваемого излучения можно описать

35 следующим образом:

$$I_{v'v''} = \hbar \cdot \omega_{v'v''} \cdot A_{v'v''} \cdot n_{v'}, \quad (1)$$

где $\omega_{v'v''}$ - частота электронно-колебательного перехода, $n_{v'}$ - населенность колебательного уровня v' возбужденного электронного состояния, $A_{v'v''}$ - коэффициент Эйнштейна, v' - номер колебательного уровня возбужденного электронного состояния, и v'' - номер колебательного уровня невозбужденного электронного состояния, \hbar - приведенная постоянная Планка.

Коэффициент Эйнштейна показывает вероятность перехода между колебательным уровнем v' возбужденного состояния и колебательным уровнем и v'' невозбужденного

45 состояния:

$$A_{v'v''} = \frac{4}{3 \cdot \hbar \cdot c^3} \cdot (\omega_{v'v''})^3 \cdot |D_{v'v''}|^2, \quad (2)$$

где $D_{v'v''}$ - дипольный момент электронно-колебательного перехода.

Дипольный момент характеризует электрические свойства молекулы. Дипольный момент при электронно-колебательном переходе изменяется согласно уравнению:

$$D_{v'v''} = \int p \cdot \psi_{ex} \cdot \psi_{gr} d(r) \cdot \int \psi_{v'} \cdot \psi_{v''} d(R), \quad (3)$$

где ψ_{gr}, ψ_{ex} - волновые функции электронных состояний, $\psi_{v'}, \psi_{v''}$ - волновые функции колебательных состояний, p - квантово-механический дипольный оператор, R - межъядерное расстояние, r - координаты электронов.

Квадрат дипольного момента перехода состоит из фактора Франка - Кондона и электрического дипольного момента электрона, который является постоянной:

$$|D_{v'v''}|^2 = (p_{el})^2 \cdot FK_{v'v''}, \quad (4)$$

где $FK_{v'v''}$ - фактор Франка - Кондона, p_{el} - матричный элемент электронного дипольного момента перехода.

Населенность колебательного уровня v' возбужденного электронного состояния можно представить как:

$$n_{v'} = N \cdot g^{v'} \cdot \frac{1}{Z} \cdot \exp\left(-\frac{E_{v'}}{kT_{C_2^*}}\right), \quad (5)$$

где N - количество молекул на колебательном уровне v' на единицу объема, $E_{v'}$ - энергия колебательного уровня v' возбужденного электронного состояния, k - постоянная Больцмана, $T_{C_2^*}$ - колебательная температура радикалов C_2^* , Z - константа нормализации.

Как видно из уравнения (5) населенность колебательного уровня зависит от колебательной температуры. Тогда, используя уравнение (1) можно найти зависимость интенсивности излучения от колебательной температуры:

$$I_{v'v''} = \hbar \cdot \omega_{v'v''} \cdot A_{v'v''} \cdot \frac{N}{Z} \cdot \exp\left(-\frac{E_{v'}}{kT_{C_2^*}}\right). \quad (6)$$

Из уравнений (2), (4) и (6) получим:

$$I_{v'v''} = H \cdot (\omega_{v'v''})^4 \cdot FK_{v'v''} \cdot \exp\left(-\frac{E_{v'}}{kT}\right), \quad (7)$$

константа H представлена как:

$$H = \frac{4}{3 \cdot c^3} \cdot \frac{N \cdot g^{v'}}{Z} \cdot (p_{el})^2. \quad (8)$$

Так как каждый электронно-колебательный переход сопровождается вращательным спектром, то спектры электронно-колебательно-вращательных переходов перекрывают друг друга и становятся трудно разрешимы. Также наибольший вклад в интенсивность серий вносят переходы между колебательными уровнями с малыми номерами. Вследствие чего, наиболее удобно интегрировать интенсивность по серии переходов между уровнями с малыми номерами.

Тогда интенсивность электронно-колебательных переходов, с номером колебательного уровня меньше или равным четверем, входящих в серию можно найти по следующей формуле:

$$I_{C_2^*}(\Delta v = 1) = B \cdot \sum_{v'=1}^{v'=4} (\omega_{v'v''})^4 \cdot (FK_{v'v''}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T_{C_2^*}}}, \quad (9)$$

где $I_{C_2^*}(\Delta v = 1)$ - интегральная интенсивность серии электронно-колебательных переходов.

Чтобы сократить константу В, предлагается рассмотреть отношения интенсивности серий электронно-колебательных переходов:

$$G(1,0) = \frac{\sum_{v'=1}^{v'=4} (\omega_{v',v'-1})^4 \cdot (FK_{v',v'-1}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T C_2^*}}}{\sum_{v'=0}^{v'=3} (\omega_{v',v'})^4 \cdot (FK_{v',v'}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T C_2^*}}}, \quad (10)$$

где $G(1,0)$ - отношение интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = 1)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=1$ к интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = 0)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=0$.

$$G(-1,0) = \frac{\sum_{v'=0}^{v'=3} (\omega_{v',v'+1})^4 \cdot (FK_{v',v'+1}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T C_2^*}}}{\sum_{v'=0}^{v'=3} (\omega_{v',v'})^4 \cdot (FK_{v',v'}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T C_2^*}}}, \quad (11)$$

где $G(-1,0)$ - отношение интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = -1)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=-1$ к интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = 0)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=0$, $FK_{v',v''}$ - фактор Франка - Кондона

ФИГ. 3 показывает зависимости отношения интегральных интенсивностей $G(1,0)$ и $G(-1,0)$ от колебательных температур радикалов C_2^* , полученные при помощи выражений (10) и (11).

Суть предлагаемого способа определения температуры потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом заключается в определении температуры потока газов на основании температуры частиц сажи и дальнейшей верификации данного результата на основании разности колебательных температур радикалов C_2^* , полученных на основании различных пар полос излучения радикалов C_2^* при помощи функции оптимизации. Блок схема предлагаемого способа представлена на ФИГ. 4 (а).

Исходными данными для способа является спектр излучения потока газов, образующийся при горении углеводородного топлива, а также зависимости, предварительно полученные на основании выражений (10) и (11). Текущую температуру потока газов оценивают на основании частиц сажи, присутствующих в потоке в результате неполного сгорания углеводородного топлива. Схема поясняется далее.

1. Выделяют область из зарегистрированного спектра теплового излучения потока газов в диапазоне длин волн от 600 до 800 нм, преобразуют эту область в координаты Вина и рассчитывают температуру частиц сажи при помощи аппроксимации закона излучения Планка в координатах Вина в соответствии с выражением [1, 3]:

$$\ln(\lambda^5 I) - \ln(\varepsilon C_1) = - \frac{C_2}{\lambda T}, \quad (12)$$

где λ - длина волны излучения, I - интенсивность оптического излучения на длине волны λ , ε - степень черноты исследуемого объекта, T - температура частиц сажи в составе потока газов, C_1 и C_2 - первая и вторая постоянные Вина, соответственно.

Использование части спектра связано с тем, что исходный спектр излучения потока газов включает в себя излучения радикалов C_2^* , радикалов CN^* , и радикалов CO_2^* .

2. Расчет спектра теплового излучения частиц сажи в потоке газов на основании Закона излучения Планка и температуры частиц сажи, рассчитанной на первом этапе. Результат данной операции представлен на ФИГ. 4 (б).

3. Вычитание спектра излучения частиц сажи из спектра излучения потока газов. Полученный спектр содержит только составляющие, соответствующие хемилюминесценции CO_2^* и излучению радикалов C_2^* .

4. Расчет спектра хемилюминесценции CO_2^* в соответствии с выражением (13).

Хемилюминесценция радикалов CO_2^* может быть представлена математически при помощи выражения [4]:

$$I_{CO_2^*}(\lambda) = A \cdot \exp\left(-\exp\left(\frac{-\lambda+\lambda_0}{w}\right) - \left(\frac{\lambda+\lambda_0}{w}\right) + 1\right), \quad (13)$$

где $I_{CO_2^*}(\lambda)$ - интенсивность хемилюминесценции радикалов CO_2^* на длине волны λ , A - масштабный коэффициент, λ_0 - длина волны, соответствующая максимуму эмиссии радикалов CO_2^* , w - параметр ширины спектральной полосы. Результат моделирования представлена на ФИГ. 4 (в).

5. Вычитание спектра хемилюминесценции CO_2^* из спектра излучения потока газов, полученного в результате шага №3. Полученный спектр содержит только набор дискретных компонент, описывающих излучение радикалов C_2^* и показан на ФИГ. 4 (г).

6. Расчет интегральных интенсивностей трех серий электронно-колебательных переходов радикалов $I_{C_2^*}(\Delta v = 1)$, $I_{C_2^*}(\Delta v = 0)$ и $I_{C_2^*}(\Delta v = -1)$, наиболее разрешенных в спектрах (ФИГ. 3).

7. Расчет двух отношений интегральных интенсивностей серий электронно-колебательных переходов: $\frac{I_{C_2^*}(\Delta v=1)}{I_{C_2^*}(\Delta v=0)}$ и $\frac{I_{C_2^*}(\Delta v=-1)}{I_{C_2^*}(\Delta v=0)}$.

8. Предварительно математически получают зависимости $G(1,0)$ и $G(-1,0)$ отношений интегральных интенсивностей серий электронно-колебательных переходов от колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$ на основании выражений (10) и (11). Зависимости представлены на рисунке ФИГ. 3.

9. Из множества значений зависимостей $G(1,0)$ и $G(-1,0)$ графическим способом находят значения, соответствующие полученным отношениям интегральных

интенсивностей $\frac{I_{C_2^*}(\Delta v=1)}{I_{C_2^*}(\Delta v=0)}$ и $\frac{I_{C_2^*}(\Delta v=-1)}{I_{C_2^*}(\Delta v=0)}$, соответственно, и таким образом получают

колебательные температуры радикалов $T_{C_2^*}$, соответствующие отношениям интегральных

интенсивностей $\frac{I_{C_2^*}(\Delta\nu=1)}{I_{C_2^*}(\Delta\nu=0)}$ и $\frac{I_{C_2^*}(\Delta\nu=-1)}{I_{C_2^*}(\Delta\nu=0)}$. Графическое пояснение представлено на ФИГ. 3.

10. Сравнение колебательных температур, полученных на основании отношений $G(1,0)$ и $G(-1,0)$, и вычисление текущего значения ошибки вычисления колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$ в соответствии с выражением:

$$\Delta T_{C_2^*}^i = T_{C_2^*}^i(G(1,0)) - T_{C_2^*}^i(G(-1,0)), \quad (14)$$

где $\Delta T_{C_2^*}^i$ - ошибка вычисления колебательной температуры C_2^* , $T_{C_2^*}^i(G(1,0))$ - колебательная температура радикалов $T_{C_2^*}$ найденная по отношению полосы с $\Delta\nu=1$ к полосе с $\Delta\nu=0$, $T_{C_2^*}^i(G(-1,0))$ - колебательная температура радикалов $T_{C_2^*}$ найденная по отношению полосы с $\Delta\nu=-1$ к полосе с $\Delta\nu=0$, i - номер шага при корректировке значения температуры частиц сажи. Полученная величина показывает отклонение кривой Планка, восстановленной с помощью пространства Вина от достоверного значения.

Полученную ошибку вычисления колебательной температуры радикалов $\Delta T_{C_2^*}^i$ используют для корректировки вычисленной температуры частиц сажи T , на основании скорректированного значения температуры частиц сажи T определяют два новых значения колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$, повторяют вышеперечисленные действия до тех пор, пока разница значений колебательных температур радикалов $\Delta T_{C_2^*}^i$ не станет меньше заданного значения погрешности, а значение температуры частиц сажи T , при котором выполняется это условие, принимается за достоверное значение искомой температуры потока газов.

Для корректировки значения температуры частиц сажи в потоке газов используется функция оптимизации, вычисляемая на основании значения ошибки работы алгоритма $\Delta T_{C_2^*}^i$, на основании выражения:

$$f_{opt}^i = \frac{\theta_1 \cdot \Delta T_{C_2^*}^i}{\exp((\Delta T_{C_2^*}^i / |\Delta T_{C_2^*}^i|) \cdot \theta_2 \cdot \Delta T_{C_2^*}^i)}, \quad (15)$$

где θ_1 и θ_2 - параметры функции оптимизации, влияющие на количество шагов, f_{opt}^i - значение функции оптимизации вычисления колебательной температуры радикалов C_2^* . Значение функции оптимизации показывает на сколько необходимо изменить вычисленную температуру частиц сажи. Параметры функции оптимизации θ_1 и θ_2 вычисляются при помощи метода градиентного спуска с целью обеспечения минимального количества шагов при корректировке температуры потока газов в рамках представленного способа измерения температуры потока газов в камере сгорания.

Корректируют значение температуры частиц сажи в соответствии с выражением:

$$T^{i+1} = T^i + f_{opt}^i, \quad (16)$$

где T^{i+1} - температура частиц на следующем шаге корректировки температуры потока

газов с номером $i+1$, T^i - температура частиц сажи на текущем шаге корректировки температуры потока газов с номером i .

Вышеперечисленные действия повторяют со второго шага способа и в качестве начального параметра использует новое значение температуры частиц сажи.

Вышеперечисленные шаги повторяются до тех пор, пока значение функции оптимизации не начнет удовлетворять выражению:

$$f_{opt}^i < 0.1 K, \quad (17),$$

где K - единица измерения «Кельвин». Температура частиц сажи, полученная на последнем шаге корректировки температуры потока газов, принимается за достоверное значение температуры потока газов. Таким образом, полученная величина температуры потока газов определяется не только тепловым излучением частиц сажи, но и хемилюминесценцией радикалов CO_2^* и C_2^* .

Заявляемый способ может быть реализован с помощью устройства (ФИГ. 1), включающего газотурбинный двигатель 1, оптическую схему 2, соединенную при помощи оптического волокна 3 со спектрометром 4. Спектрометр 4 выполняет разложение части оптического сигнала, соответствующей видимому диапазону длин волн, в спектр (ФИГ. 2), дальнейшее оптоэлектронное и аналого-цифровое преобразования сигнала и передачу электрических сигналов, соответствующих интенсивностям излучения потока газов в различных областях спектра, в блок цифровой обработки сигналов (ЦОС) 5. Блок ЦОС 5 реализует предложенный способ (ФИГ. 4 (а)), в том числе: вычисляет тепловую температуру частиц сажи, рассчитывает спектр излучения частиц сажи (ФИГ. 4 (б)), рассчитывает спектр хемилюминесценции радикалов CO_2^* (ФИГ. 4 (в)), получает спектр излучения радикалов C_2^* (ФИГ. 4 (г)) и на основании полученного спектра рассчитывает не менее чем две колебательные температуры радикалов C_2^* при помощи предварительно полученных математических зависимостей (ФИГ. 3), рассчитывает значение функции оптимизации (ФИГ. 4 (а)) на основании колебательных температур радикалов C_2^* , которая формирует на выходе значение измеряемой температуры потока газов.

Заявляемый способ реализуется следующим образом. Оптическое излучение потока газов отводится из зоны горения камеры сгорания газотурбинного двигателя 1 при помощи оптической схемы 2 и передается при помощи оптического волокна 3 на спектрометр 4. Спектрометр 4 выполняет измерение интенсивностей излучения потока газов в оптическом диапазоне от 400 до 800 нм, соответствующем непрерывному спектру излучения частиц сажи, хемилюминесценции радикалов CO_2^* , дискретных полос излучения радикалов C_2^* (468-474 нм, 507-517 нм, 550-564 нм) и хемилюминесценции радикалов CH^* . Данные об интенсивностях излучения потока газов в оптическом диапазоне от 400 нм до 800 нм поступают в блок ЦОС 5, где происходит расчет температуры частиц сажи при помощи аппроксимации закона излучения Планка в координатах Вина, вычисление колебательных температур радикалов C_2^* и дальнейшее вычисление температуры потока газов в соответствии с алгоритмом, представленным ФИГ. 4 (а) Блок ЦОС 5 выдает температуру потока газов потребителю.

В качестве конкретного примера выполнения для реализации заявляемого способа предлагается устройство, где оптическая схема, представляет собой совокупность оптического окна и волоконно-оптического кабеля. Оптическое окно выполнено в

виде полированного с обеих сторон цилиндра. Волоконно-оптический кабель представляет собой оптическое волокно типа «кварц-кварц» в алюминиевой оболочке, помещенное в оплетку из высокотемпературного теплоизоляционного материала.

Волоконно-оптический кабель при помощи оптического коннектора подключается к спектрометру. Спектрометр построен на базе схемы Черни-Тёрнера, а также содержит дифракционную решетку и массив фотоприемных устройств. Дифракционная решетка позволяет распределить свет с разными длинами волн по разным фотоприемным устройствам в составе массива фотоприемных устройств. Массив фотоприемных устройств позволяет измерять интенсивность излучения в вышеупомянутых областях спектра. Примеры спектров теплового излучения потока газов в видимом оптическом диапазоне показаны на ФИГ. 2.

Блок ЦОС реализуется на базе платы с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС). Блок ЦОС выполняет аналого-цифровое преобразование данных с массива фотоприемных устройств и передает их в ПЛИС. В ПЛИС реализован алгоритм обработки данных, схема которого представлена на ФИГ. 4 (а) и поясняется выше. В качестве исходных данных алгоритм принимает спектр излучения потока газов, представленный на ФИГ. 2, и предварительно полученные зависимости соотношений $G(1,0)$ и $G(-1,0)$ от колебательной температуры радикалов C_2^* , представленные на ФИГ. 3. Выходное значение алгоритма принимается за измеряемую температуру потока газов.

Таким образом, заявляемый способ определения температуры потока газов в камере сгорания позволяет повысить достоверность измерений температуры потока газов в камерах сгорания газотурбинных двигателей с углеводородным топливом, а также расширить область применения способов измерения температуры потока газов в камере сгорания на основе теплового излучения за счет учета вклада хемилюминесценции радикалов CO_2^* (250-600 нм), дискретных полос излучения радикалов C_2^* (468-474 нм, 507-517 нм, 550-564 нм), а также вычисления колебательной температуры радикалов C_2^* и использования полученной температуры радикалов C_2^* для корректировки измеряемой температуры потока газов.

Источники информации:

[1] M.V. Mekhregin, I.K. Meshkovskii, V.A. Tashkinov, V.I. Guryev, A.V. Sukhinets, D.S. Smirnov, Multispectral pyrometer for high temperature measurements inside combustion chamber of gas turbine engines, Measurement 139 (2019) 355-360, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.02.084>

[2] J. Kojima, Y. Ikeda, T. Nakajima, Detail distributions of OH^* , CH^* and C_2^* chemiluminescence in the reaction zone of laminar premixed methane/air flames, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit (2000), <https://doi.org/10.2514/6.2000-3394>.

[3] A.N. Magunov, Spectral pyrometry (Review), Instruments and Experimental Techniques 52(4) (2009) 451-472.

[4] N. dos S. Alves, Chemiluminescence analysis of vitiated conditions for Methane and Propane flames (2016), https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1407770020545087/Resumo_72954.pdf.

(57) Формула изобретения

1. Способ определения температуры потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом, включающий регистрацию спектра теплового

излучения потока газов в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм в зоне горения камеры сгорания, на основании полученного спектра при помощи аппроксимации закона излучения Планка в координатах Вина рассчитывают температуру частиц сажи T , по которой судят о температуре потока газов, отличающийся тем, что для расчета температуры частиц сажи из зарегистрированного спектра выделяют область теплового излучения потока газов в диапазоне длин волн от 600 до 800 нм, по рассчитанной температуре частиц сажи по формуле Планка рассчитывают спектр теплового излучения частиц сажи, вычитают рассчитанный спектр теплового излучения частиц сажи из первоначального спектра теплового излучения потока газов, рассчитывают спектр хемиллюминесценции радикалов CO_2^* , вычитают спектр хемиллюминесценции радикалов CO_2^* из спектра теплового излучения потока газов, полученного после вычитания спектра теплового излучения частиц сажи, рассчитанного по формуле Планка, рассчитывают интегральные интенсивности серий электронно-колебательных переходов $I_{C_2^*}(\Delta v = 1), I_{C_2^*}(\Delta v = 0)$ и $I_{C_2^*}(\Delta v = -1)$, где Δv - разность номеров колебательных уровней верхнего и нижнего электронных состояний, определяют два отношения интегральных интенсивностей серий электронно-колебательных переходов $\frac{I_{C_2^*}(\Delta v=1)}{I_{C_2^*}(\Delta v=0)}$ и $\frac{I_{C_2^*}(\Delta v=-1)}{I_{C_2^*}(\Delta v=0)}$, по полученным отношениям, и, используя полученные расчетным путем с помощью выражений

$$G(1,0) = \frac{\sum_{v'=1}^{v'=4} (\omega_{v',v'-1})^4 \cdot (FK_{v',v'-1}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T_{C_2^*}}}}{\sum_{v'=0}^{v'=3} (\omega_{v',v'})^4 \cdot (FK_{v',v'}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T_{C_2^*}}}},$$

$$G(-1,0) = \frac{\sum_{v'=0}^{v'=3} (\omega_{v',v'+1})^4 \cdot (FK_{v',v'+1}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T_{C_2^*}}}}{\sum_{v'=0}^{v'=3} (\omega_{v',v'})^4 \cdot (FK_{v',v'}) \cdot e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T_{C_2^*}}}},$$

зависимости $G(1,0)$ и $G(-1,0)$ отношений интегральных интенсивностей полос излучения радикалов C_2^* от колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$, где $G(1,0)$ - отношение интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = 1)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=1$ к интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = 0)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=0$, $G(-1,0)$ - отношение интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = -1)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=-1$ к интенсивности $I_{C_2^*}(\Delta v = 0)$ серии электронно-колебательных переходов с $\Delta v=0$, где $E_{v'}$ - энергия колебательного уровня v' возбужденного электронного состояния, k - постоянная Больцмана, $FK_{v',v''}$ - фактор Франка - Кондона, определяют два значения колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}^i(\Delta v=1/\Delta v=0)$ и $T_{C_2^*}^i(\Delta v=-1/\Delta v=0)$ сравнивают полученные значения и получают текущее значение ошибки вычисления колебательной температуры $\Delta T_{C_2^*}^i$, которое используют для корректировки вычисленной температуры частиц сажи T , определяют два новых значения колебательной температуры радикалов $T_{C_2^*}$, используя скорректированное

значение температуры частиц сажи, повторяют вышеперечисленные действия до тех пор, пока разница значений колебательных температур радикалов $\Delta T_{C_2^*}^i$ не станет меньше заданного значения погрешности, а значение температуры частиц сажи, при котором выполняется это условие, принимается за достоверное значение искомой температуры потока газов.

2. Способ определения температуры потока газов в камере сгорания газотурбинного двигателя с углеводородным топливом по п. 1, отличающийся тем, что ошибку вычисления колебательной температуры $\Delta T_{C_2^*}^i$ получают в соответствии с выражением:

$$\Delta T_{C_2^*}^i = T_{C_2^*}^i(\Delta v=1/\Delta v=0) - T_{C_2^*}^i(\Delta v=-1/\Delta v=0),$$

где $\Delta T_{C_2^*}^i$ - ошибка вычисления колебательной температуры C_2^* , $T_{C_2^*}^i(\Delta v=1/\Delta v=0)$ - колебательная температура радикалов C_2^* найденная по отношению полосы с $\Delta v=-1$ к полосе с $\Delta v=0$, $T_{C_2^*}^i(\Delta v=1/\Delta v=0)$ - колебательная температура радикалов C_2^* , найденная по отношению полосы $\Delta v=-1$ к полосе $\Delta v=0$, i - номер шага при корректировке значения температуры частиц сажи, вычисляют величину, на которую необходимо скорректировать температуру частиц сажи, при помощи функции оптимизации, которую рассчитывают на основании выражения:

$$f_{opt}^i = \frac{\theta_1 \cdot \Delta T_{C_2^*}^i}{\exp((\Delta T_{C_2^*}^i / |\Delta T_{C_2^*}^i|) \cdot \theta_2 \cdot \Delta T_{C_2^*}^i)},$$

где θ_1 и θ_2 - параметры функции оптимизации, корректируют величину температуры частиц сажи в соответствии с выражением:

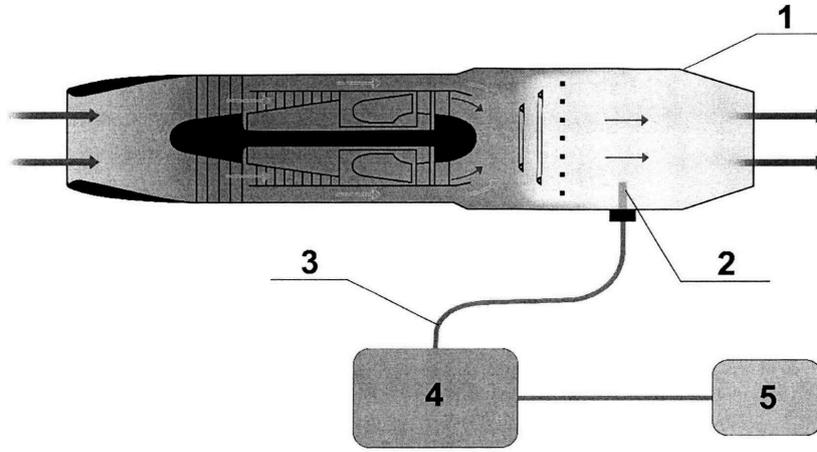
$$T^{i+1} = T^i + f_{opt}^i,$$

вышеперечисленные действия, используя скорректированное значение температуры частиц сажи, повторяют до тех пор, пока значение функции оптимизации не станет удовлетворять выражению:

$$f_{opt}^i < 0.1 K,$$

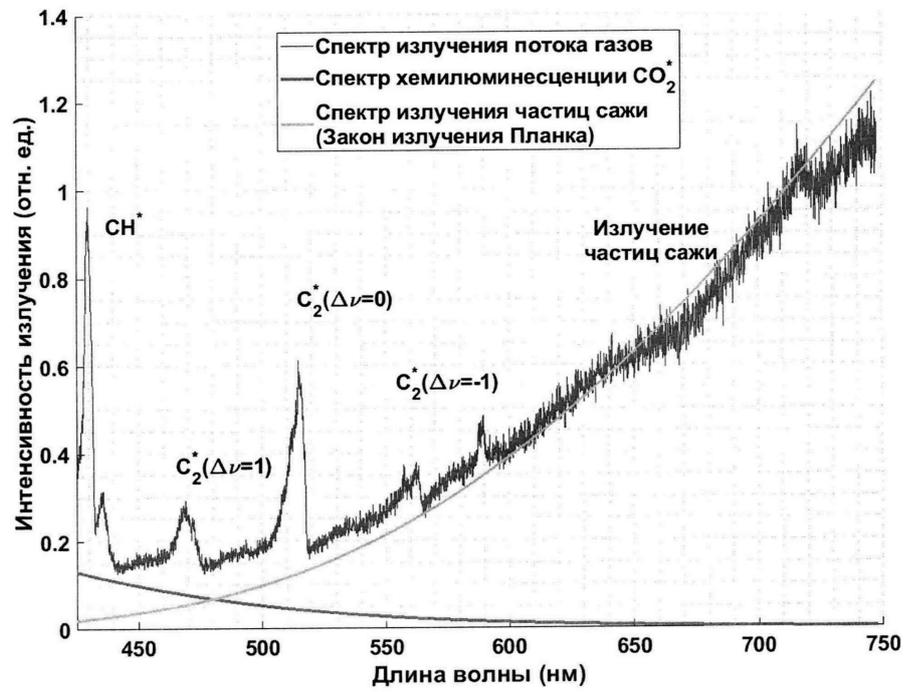
где К - единица измерения «Кельвин», а значение температуры частиц сажи, при котором колебательные температуры C_2^* обеспечивают указанное выражение, принимается за достоверное значение искомой температуры потока газов.

1

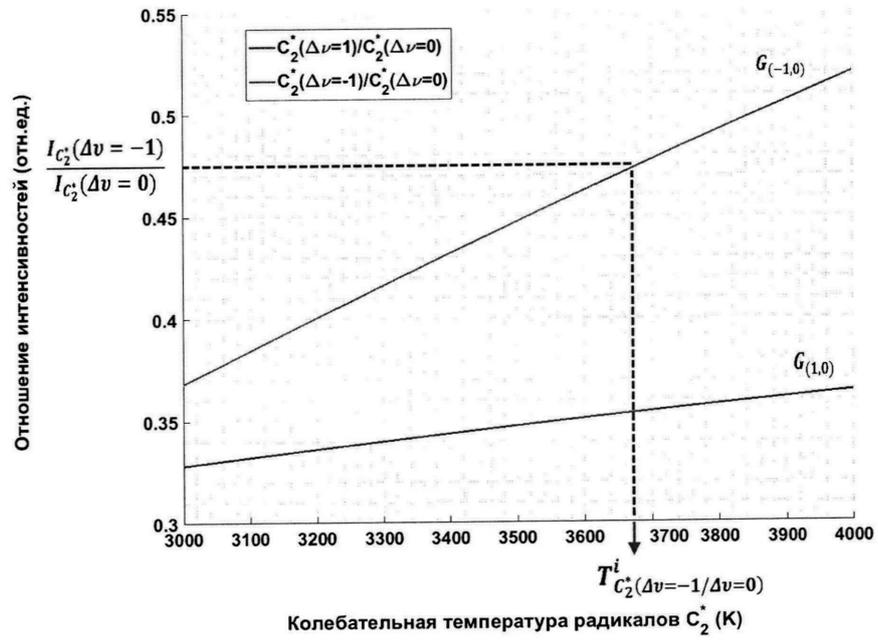


ФИГ.1

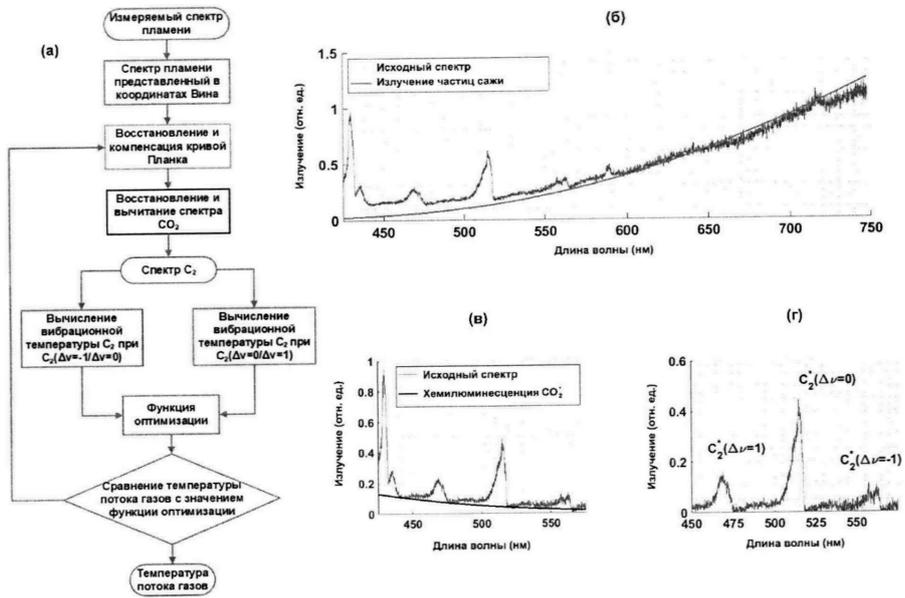
2



ФИГ.2



ФИГ.3



ФИГ.4