



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*G01K 17/00* (2022.01); *B23K 26/351* (2022.01)

(21)(22) Заявка: 2021116555, 08.06.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
08.06.2021

Дата регистрации:  
15.03.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 08.06.2021

(45) Опубликовано: 15.03.2022 Бюл. № 8

Адрес для переписки:

119526, Москва, пр-кт Вернадского 101, корп.1,  
ИПМех РАН, патентный отдел, Храмцова  
Елена Георгиевна

(72) Автор(ы):

Котов Михаил Алтаевич (RU),  
Лаврентьев Сергей Юрьевич (RU),  
Соловьев Николай Германович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем  
механики им. А.Ю. Ишлинского Российской  
академии наук (ИПМех РАН) (RU)

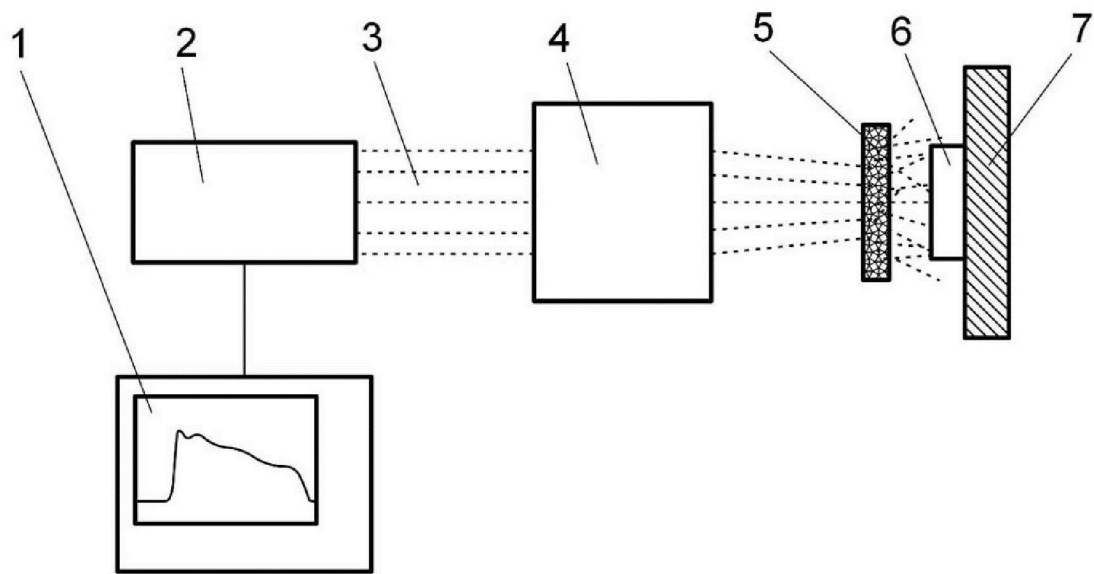
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 7005601 B2, 28.02.2006. US  
5823682 A, 20.10.1998. US 3785875 A, 15.01.1974.  
RU 149457 U1, 10.01.2015. RU 2676722 C1,  
10.01.2019. RU 2225285 C2, 10.03.2004. RU  
2698484 C1, 28.08.2019. RU 2368878 C2,  
27.09.2009.

(54) Способ лазерной калибровки датчиков теплового потока с имитацией экспериментальной нагрузки

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу калибровки датчиков теплового потока при помощи лазерного излучения и может найти применение в высокоскоростных газодинамических экспериментах, в газовой динамике, в исследовании пламени и химических реакций с выделением тепла. Технический результат – повышение точности и быстроты проведения калибровки и ее упрощение. В оптический тракт подают лазерное излучение в виде параллельного пучка. Изменяя интенсивность лазерного излучения, моделируют тепловой поток на датчик, имитируя потоки, полученные в реальных

экспериментах. Установленным в оптическом тракте преобразователем излучения меняют форму, размер и угол расширения или сжатия лазерного пучка. Перед датчиком устанавливают рассеивающий оптический элемент. Поверхность датчика и рассеивающего оптического элемента располагают преимущественно перпендикулярно оси падающего на них лазерного излучения, при этом датчик поддерживают при заданной температуре размещением на теплоотводящей пластине, а тепловое воздействие осуществляют с заданной периодичностью. 1 ил.



Фиг. 1

RU 2766410 C1

RU 2766410 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*G01K 17/00* (2006.01)  
*B23K 26/351* (2014.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC  
*G01K 17/00 (2022.01); B23K 26/351 (2022.01)*

(21)(22) Application: **2021116555, 08.06.2021**

(24) Effective date for property rights:  
**08.06.2021**

Registration date:  
**15.03.2022**

Priority:

(22) Date of filing: **08.06.2021**

(45) Date of publication: **15.03.2022 Bull. № 8**

Mail address:

**119526, Moskva, pr-kt Vernadskogo 101, korp.1,  
IPMekh RAN, patentnyj otdel, Khramtsova Elena  
Georgievna**

(72) Inventor(s):

**Kotov Mikhail Altaevich (RU),  
Lavrentev Sergei Iurevich (RU),  
Solovov Nikolai Germanovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhetnoe  
uchrezhdenie nauki Institut problem mekhaniki  
im. A.Iu. Ishlinskogo Rossiiskoi akademii nauk  
(IPMekh RAN) (RU)**

(54) **METHOD FOR LASER CALIBRATION OF HEAT FLOW SENSORS WITH SIMULATION OF EXPERIMENTAL LOAD**

(57) Abstract:

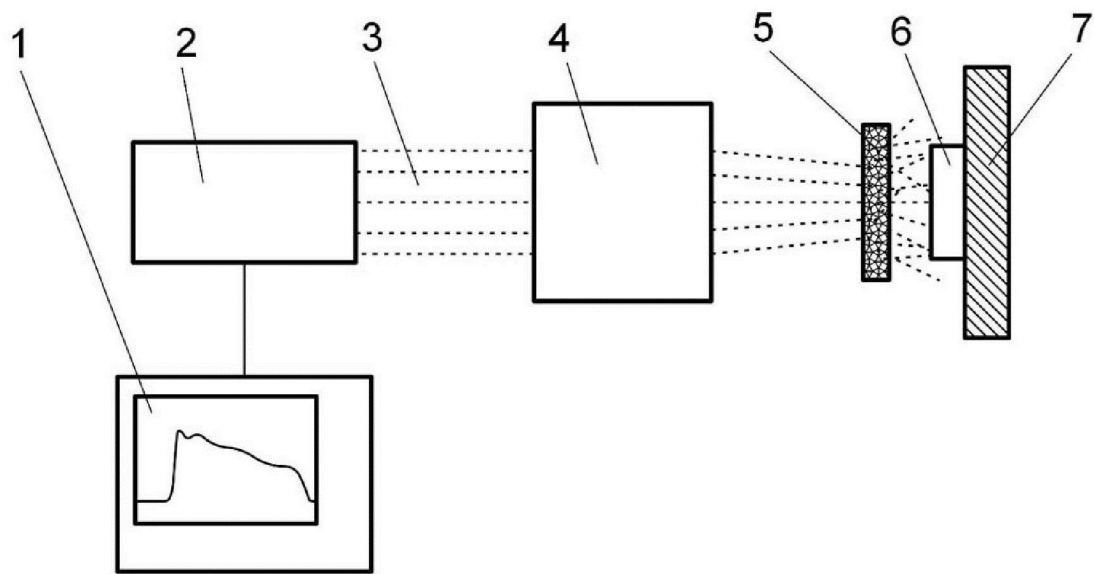
FIELD: calibration of sensors.

SUBSTANCE: invention relates to a method of calibrating heat flow sensors using laser radiation and can be used in high-speed gas-dynamic experiments, in gas dynamics, in studying flame and chemical reactions with heat release. Laser radiation is fed into the optical path in the form of a parallel beam. By varying the intensity of the laser radiation, the heat flux to the sensor is simulated by simulating the fluxes obtained in real experiments. A radiation converter installed in the optical path changes the shape, size and

angle of expansion or contraction of the laser beam. A diffusing optical element is installed in front of the sensor. Surface of the sensor and the scattering optical element are arranged mainly perpendicular to the axis of the laser radiation incident on them, note here that said transducer is kept at preset temperature by placing it on heat-removing plate while heat is applied at preset intervals.

EFFECT: improving accuracy and speed of calibration and its simplification.

1 cl, 1 dwg



Фиг. 1

RU 2766410 C1

RU 2766410 C1

Заявляемый способ калибровки датчиков теплового потока направлен на упрощение процесса калибровки и улучшение характеристик, а именно, на повышение точности и быстроты проведения калибровки.

Измерения температуры поверхности и теплового потока играют очень важную роль при проведении исследований процессов теплообмена. Регистрация изменения тепловых потоков в газодинамическом эксперименте в течение ультракоротких временных периодов является одним из наиболее существенных факторов при постановке и проведении исследований теплопередачи в импульсных сверх- и гиперзвуковых течениях. Характерные временные значения в таких газодинамических экспериментах составляют от сотен микросекунд до нескольких миллисекунд. В экспериментах, проводимых в ударных трубах, модель испытывает внезапную сильную тепловую нагрузку в очень коротком временном масштабе измерения. Чтобы откалибровать термодатчики для таких условий набегающего потока, проводятся эксперименты путем приложения тепловой нагрузки от лазерного луча с известной выходной мощностью. Для импульсных газодинамических процессов метод лазерной калибровки является наиболее подходящим, поскольку позволяет очень быстро подавать на датчик желаемое значение теплового потока. Используемое значение мощности излучения является фиксированным и может быстро меняться в процессе калибровки. Получаемая вольт-ваттная характеристика датчика используется для его последующего применения при рассматриваемых режимах течения газа – короткие временные интервалы и высокие температурные нагрузки.

Известен способ калибровки датчиков теплового потока, принятый за аналог, приведенный в [1-3] ([1] Jan A. Gatowski, Mark K. Smith, Alex C. Alkidas. An Experimental Investigation of Surface Thermometry and Heat Flux, Experimental Thermal and Fluid Science 1989, 2, [2] David R Buttsworth et al. 2005 Meas. Sci. Technol. 16 1487, [3] Penty Geraets, R. T., et al. Calibration and Processing Techniques for a Robust Fast-Response Surface Heat Transfer Gauge. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018). Используемые калибровочные стенды имеют лазерный источник излучения и оптическую схему. По приходу лазерного излучения на калибруемый датчик теплового потока начинается процесс записи сигнала, выдаваемого датчиком. Оптическая ось располагается параллельно горизонту, калибруемый датчик помещается вертикально и подключается к регистрирующему устройству через усилитель сигнала.

Известен способ калибровки датчиков теплового потока, принятый за аналог, приведенный в [4] ([4] Y. Heichal et al. Experimental Thermal and Fluid Science 30, 2005). При данном способе калибруемый датчик теплового потока располагается на горизонтальной платформе. Сфокусированный лазерный луч светит сверху, оптическая ось располагается перпендикулярно к горизонту.

Недостатком описанных выше способов является неоднородность характерного профиля мощности излучения лазерного пучка, приходящего на калибруемый датчик. В оптических схемах отсутствуют элементы гомогенизации лазерного излучения для задания однородного распределения мощности на площадке калибруемого датчика. Этот факт затрудняет оценку мощности теплового потока, приходящего на датчик. Вследствие такой неоднородности калибрующий сигнал, получаемый от потока лазерного излучения, неравномерно приложенного к чувствительному элементу, будет отличаться от реальных условий, моделируемых в эксперименте. Получаемая при такой калибровке вольт-ваттная характеристика не может иметь высокую степень достоверности при применении датчика в реальном газодинамическом эксперименте.

Известен способ калибровки датчиков теплового потока [5] ([5] Патент RU 75467

U1), приведенный в [6] ([6] S. Sapozhnikov, V. Mityakov, A. Mityakov. Heatmetry: The Science and Practice of Heat Flux Measurement. Springer Nature 2020). При данном способе в качестве элемента подвода лазерного излучения к калибруемому датчику в оптической схеме использовался зеркальный расширитель пучка. За счет известного из уровня техники свойств гомогенизации излучения зеркальный расширитель может улучшать пространственные характеристики градиентов мощности излучения и сглаживать резкие локальные границы их переходов, обусловленных такими неоднородностями.

Недостатком данного способа является отсутствие возможности перемещения лазерного луча по поверхности калибруемого датчика, что не позволяет моделировать тепловое воздействие, аналогичное возникающему в высокоскоростных газодинамических экспериментах.

Известен способ калибровки датчиков теплового потока, принятый за прототип, приведенный в [7] ([7] Dean Jennings, Patent US 7005601 B2 02/28/2006). В данном способе для размещения калибруемого датчика используется горизонтальная платформа, которая является подвижной в одном горизонтальном направлении. Благодаря этому имеется возможность двигать лазерный луч для задания при процессе калибровки датчика линии непрерывного теплового нагружения.

Недостатком данного способа является отсутствие возможностей регулировки положения лазерного излучения в широких пространственных и временных диапазонах. Данные ограничения обусловлены техническими характеристиками устройств, реализующих подвод и движение излучения, и также не позволяют моделировать тепловое воздействие, аналогичное возникающему в высокоскоростных газодинамических экспериментах.

Заявляемый способ лазерной калибровки датчиков теплового потока с имитацией экспериментальной нагрузки направлен на упрощение процесса калибровки и улучшение характеристик, а именно, на повышение точности и быстроты проведения калибровки.

Указанный результат достигается тем, что в способе лазерной калибровки датчиков теплового потока с имитацией экспериментальной нагрузки в оптический тракт подают лазерное излучение в виде параллельного пучка, при этом изменяя интенсивность лазерного излучения, моделируют тепловой поток на калибруемый датчик, имитируя потоки, полученные в реальных экспериментах, также установленным в оптическом тракте преобразователем излучения меняют форму, размер и угол расширения или сжатия лазерного пучка, а перед калибруемым датчиком устанавливают рассеивающий оптический элемент, причем поверхность калибруемого датчика и рассеивающего оптического элемента устанавливают перпендикулярно оси падающего на них лазерного излучения, сам калибруемый датчик поддерживают при заданной температуре размещением на теплоотводящей пластине, а тепловое воздействие лазерным излучением осуществляют с заданной периодичностью.

Сущность заявляемого изобретения поясняется примерами его реализации и графическими материалами.

На фиг. 1 представлен вариант осуществления изобретения.

Способ лазерной калибровки датчиков теплового потока с имитацией экспериментальной нагрузки реализуется устройством, которое состоит из генератора сигналов произвольной формы 1, управляющего мощностью излучения лазера 2, генерирующего параллельный пучок лазерного излучения 3; оптического тракта с установленным преобразователем излучения 4, который предназначен для изменения формы, угла расширения или сжатия лазерного пучка и представляет собой прибор, состоящий, например, из комбинации линз и диафрагм, в том числе, известных из уровня

техники аподизирующих диафрагм, задающих форму лазерного излучения, попадающего на рассеивающий оптический элемент 5. Проходя через рассеивающий оптический элемент 5, пучок лазерного излучения равномерно распределяется по поверхности калибруемого датчика 6. Калибруемый датчик 6 установлен на теплоотводящей пластине 7. Температура пластины 7, а значит, и калибруемого датчика 6, может поддерживаться постоянной при помощи воздушного или водяного охлаждения, а тепловое воздействие лазерного излучения на калибруемый датчик 6 осуществляют с заданной периодичностью.

Изобретение работает следующим образом. Известным из уровня техники генератором сигналов произвольной формы 1 формируют электрический сигнал, соответствующий по форме полученному экспериментально сигналу теплового потока в ударной трубе или в каких-либо других экспериментах, для которых предназначается калибруемый датчик. В качестве генератора сигналов произвольной формы 1 может быть использован, например, генератор GK101, форму импульса которого можно задавать по точкам, а затем воспроизводить с нужной частотой повторения.

Электрический сигнал с генератора сигналов 1 с заданным периодом подают на вход лазера 2, интенсивность выходного излучения которого периодически повторяет форму этого электрического сигнала. Известные из уровня техники технологические лазеры в большинстве своем позволяют таким способом управлять мощностью лазерного излучения от внешнего источника сигналов. Сформированный таким образом пучок лазерного излучения 3 направляют в виде параллельного пучка в преобразователь излучения 4, в котором меняют форму, размер и угол расширения или сжатия лазерного пучка 3 с целью максимального использования энергии лазерного излучения для воздействия на калибруемый датчик 6. В случае если лазерный пучок 3, генерируемый лазером 2, имеет неравномерное распределение интенсивности в поперечном сечении, как, например, известный из уровня техники гауссов пучок, в преобразователе излучения 4 используют также аподизирующую диафрагму, поглощение которой в различных областях поверхности пропорционально интенсивности лазерного излучения в этой области. Таким образом, формируется равномерный пучок лазерного излучения, соответствующий по форме и размерам калибруемому датчику 6. Перед калибруемым датчиком 6 устанавливают рассеивающий оптический элемент 5. Необходимость использования рассеивающего оптического элемента 5 заключается в следующем.

Когерентное излучение лазера образует на поверхности объектов, в данном случае, на поверхности калибруемого датчика 6, так называемую спекл-структуру – случайную интерференционную картину, которая образуется при взаимной интерференции когерентных волн, имеющих случайные сдвиги фаз. На такой картине, как правило, можно отчетливо наблюдать светлые и темные пятна, называемые спеклами, размеры которых могут быть сопоставимы с размерами калибруемого датчика 6. Вследствие такой неоднородности калибрующий сигнал, получаемый от потока лазерного излучения, неравномерно приложенного к калибруемому датчику 6, будет отличаться от реальных условий, моделируемых в эксперименте. Рассеивающим оптическим элементом 5 хаотично изменяют направления лазерного излучения, интенсивно перемешивая и усредняя сигнал от различных участков на поверхности калибруемого датчика 6. Рассеивающий оптический элемент 5 может представлять собой, например, прозрачный материал с матовой поверхностью, полупрозрачный материал с объемным заполнением рассеивающим материалом, матрицу из микролинз. Рассеивающий оптический элемент 5 и калибруемый датчик 6 располагают преимущественно перпендикулярно падающему на них лазерному излучению с целью попадания большей

части лазерного излучения на поверхность калибруемого датчика 6. Для увеличения коэффициента поглощения лазерного излучения возможно покрытие поверхности калибруемого датчика 6 поглощающим материалом.

5 Пучок лазерного излучения проходит через рассеивающий оптический элемент 5 и попадает на калибруемый датчик 6, вызывая на нем тепловой импульс, аналогичный тепловому импульсу при воздействии ударной волны. Указанный тепловой импульс повторяют периодически, задавая требуемую частоту повторения генератором сигналов произвольной формы 1. Калибруемый датчик 6 устанавливают на теплоотводящей пластине 7 с целью охлаждения датчика между воздействием тепловых импульсов.

10 В отличие от ударной волны, действующей на датчик однократно, периодическое воздействие позволяет оперативно откалибровать датчик 6 при различных мощностях лазерного излучения, скоростях нарастания теплового воздействия, формы и длительности теплового импульса, которые можно варьировать в широких пределах изменением формы электрического импульса, задаваемого генератором сигналов произвольной формы 1, а также формы, размера и угла расширения или сжатия лазерного пучка преобразователем излучения 4.

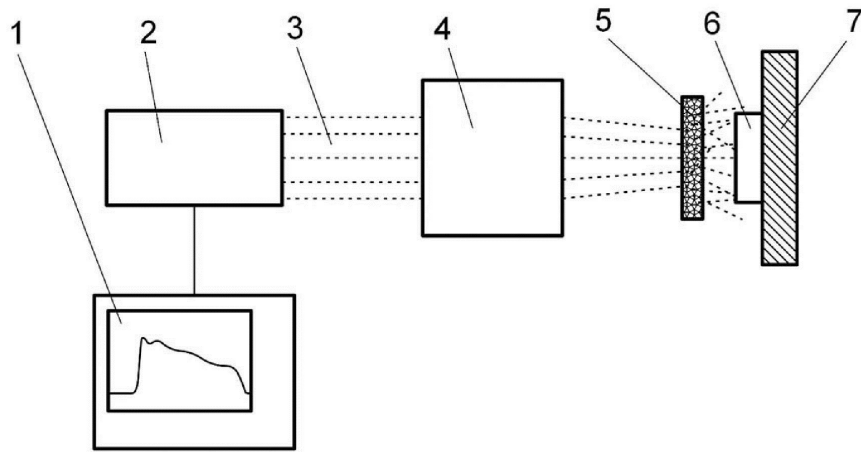
15 Из-за возможной температурной зависимости свойств калибруемых датчиков 6 теплоотводящая пластина 7 поддерживается при постоянной температуре воздушным или водяным охлаждением, либо элементами Пельтье, либо другими известными из уровня техники способами.

20 Характерная особенность заявляемого изобретения состоит в простом способе моделирования тепловой нагрузки на калибруемый датчик, аналогичной возникающей в высокоскоростных газодинамических экспериментах, с помощью излучения лазера, управляемого генератором сигналов произвольной формы, имитирующим форму реального теплового воздействия, полученного в эксперименте. Для устранения интерференционных искажений лазерного излучения на поверхности калибруемого датчика, перед ним устанавливают рассеивающий оптический элемент. В отличие от трудоемких и дорогостоящих однократных газодинамических экспериментов заявляемое изобретение позволяет в многократно повторяющемся режиме точно измерять отклик калибруемого датчика на тепловой поток, что существенно повышает точность и скорость калибровки.

#### (57) Формула изобретения

35 Способ лазерной калибровки датчиков теплового потока, включающий подачу лазерного излучения в виде параллельного пучка в оптический тракт, отличающийся тем, что моделируют тепловой поток на калибруемый датчик, изменяя интенсивность лазерного излучения, и имитируют потоки, полученные в реальных экспериментах, при этом установленным в оптическом тракте преобразователем излучения изменяют форму, размер и угол расширения или сжатия лазерного пучка, причем перед 40 калибруемым датчиком устанавливают рассеивающий оптический элемент, при этом поверхность калибруемого датчика и рассеивающего оптического элемента располагают перпендикулярно оси падающего на них лазерного излучения, а калибруемый датчик поддерживают при заданной температуре путем размещения на теплоотводящей пластине, а тепловое воздействие лазерным излучением осуществляют с заданной 45 периодичностью.





Фиг. 1