

УДК 681.7.013

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА СКОРОСТИ В СОСТАВЕ ПИРО-МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

В.А.Карачинов, К.А.Зверев, Д.В.Карачинов, М.В.Казакова, Д.А.Евстигнеев

## MODELLING THE FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF A SPEED SENSOR AS A PART OF THE PYRO-MEMS SYSTEM BASED ON SILICON CARBIDE

V.A.Karachinov, K.A.Zverev, D.V.Karachinov, M.V.Kazakova, D.A.Evstigneev

*Институт электронных и информационных систем НовГУ, Polnovo @ yandex. ru*

Разработана физическая модель датчика скорости нагретого газового потока в составе пиро-микромеханической измерительной системы на основе карбида кремния. В интервале температур 800÷1200°C в рамках компьютерного эксперимента получены функциональные характеристики, позволяющие оптимизировать ее конструкцию с учетом особенностей эксплуатации и технологии измерения по изображению.

**Ключевые слова:** *микросистема, карбид кремния, измерение, скорость, моделирование, диффузионное пламя, телевизионный пирометр, датчик, изображение*

The authors developed a physical model of the speed sensor for the heated gas stream consisting of pyro-MEMS measuring system based on silicon carbide. Within the framework of computer simulation, in the temperature range of 800÷1200°C the authors obtained some functional characteristics, which allow optimizing the model construction taking into account the specifics of operation and measurement by image processing.

**Keywords:** *microsystem, silicon carbide, dimension, speed, modeling, diffusion flame, television pyrometer, sensor, image*

### Введение

Методы диагностики раскаленных газовых потоков (пламен) являются научной базой, которая представляет значительный интерес при осуществлении как фундаментальных, так и прикладных исследований низкотемпературной плазмы, процессов горения, газовых потоков при гиперзвуковых скоростях, а также различных технических систем — газовых турбин, горелок, теплообменников и др. Существует определенное число электрических методов измерения температуры и скорости нагретых газовых потоков с помощью термосопротивлений, термопар, различных анемометров, а также оптические методы, использующие собственное излучение потока или стороннего источника [1-4].

Известными достоинствами оптических методов является повышенная информативность и быстродействие, а также возможность проведения дистанционных измерений в реальном масштабе времени [5-7]. Для измерения скорости потоков в факеле пламени наиболее часто используются известные методы теп-

ловой и лазерной анемометрии [8-9]. В то же время в научной литературе отсутствуют сведения о методах измерения скорости раскаленного газового потока (пламени) по изображению. В данном сообщении приводятся результаты исследований, направленных на разработку методики расчета функциональной характеристики датчика скорости раскаленного газового потока энергонезависимой измерительной микросистемы, которая адаптирована к условиям эксплуатации и технологии измерения по изображению.

### Методика исследований

Принцип измерения скорости и температуры газового пламени по изображению пиро-микромеханической системы (ПМС) показан на рис.1. С помощью газовой системы, включающей источник газа (1) и форсунку (2) формируется диффузионное пламя (3) с классической структурой, содержащей ядро, зону восстановления и факел [3]. В исследованиях использовалась конструкция ПМС, изготовленная из карбида кремния и состоящая из

вилочного держателя (4) и маятника (5) в виде пирометрического зонда с ограничением кондуктивной связи [10]. Ввод и перемещение ПМС в пламени осуществляется с помощью позиционера (6) по сигналу от контроллера (7), связанного ПЭВМ (9). Под действием силы давления (напора) газового потока маятник отклоняется от вертикального положения на угол пропорционально скорости газового потока.

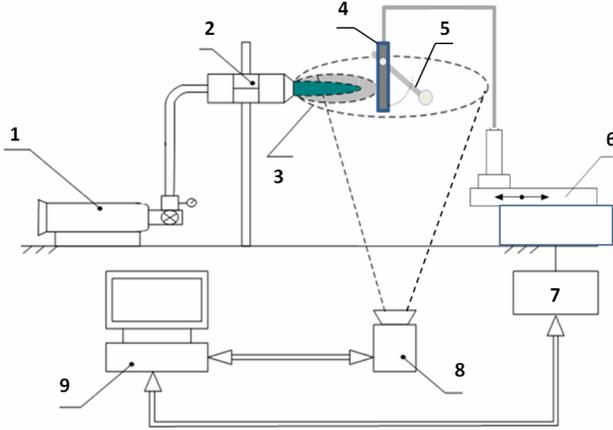


Рис.1. Структурная схема измерительного стенда

Регистрируя с помощью телевизионного пирометра (8) изображение ПМС и используя цифровые методы его обработки, измеряют угол отклонения маятника от вертикально ориентированного вилочного держателя с последующим расчетом значения скорости потока. А по регистрируемому яркостному контрасту круглой излучающей площадки маятника определяется температура пламени [3,5].

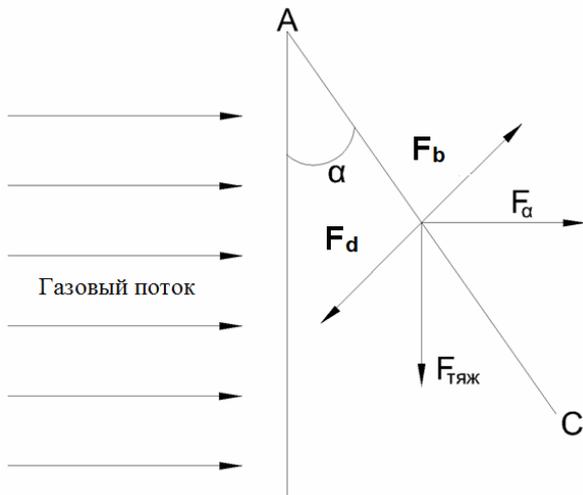


Рис.2. Физическая модель датчика скорости пиро-микромеханической системы

Геометрическая модель маятника датчика скорости рассматривается как абсолютно гладкая однородная пластина, которая под действием газового потока и температуры не деформируется и не изменяет свою форму. На рис.2 приведена упрощенная физическая модель датчика скорости. В ней показано действие на маятник (AB) двух основных сил: силы давления потока  $F_a$ , которая заставляет отклоняться его на некоторый угол  $\alpha$  от вертикали, и силы тяжести  $F_g$ ,

направленной от центра тяжести датчика вниз. В модели не учитывается коэффициент гидравлического (лобового) сопротивления, который зависит от формы датчика и его положения относительно потока, а также не учитывается сила трения датчика об ось держателя. Для получения уравнения, устанавливающего связь между скоростью газового потока и углом отклонения маятника, выполним несложные преобразования. В положении равновесия маятника (AC) силы  $F_d = F_a \cdot \cos(\alpha) = p \cdot S \cdot \cos^2(\alpha)$  и  $F_b = F_g \cdot \sin(\alpha) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$  оказываются равными, следовательно:

$$p \cdot S \cdot \cos^2(\alpha) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha), \quad (1)$$

где  $p$  — давление газового потока, Па;  $S$  — площадь фронтальной (торцевой) поверхности маятника,  $m^2$ ;  $m$  — масса маятника, кг;  $g$  — ускорение свободного падения.

Выразим давление газового потока через его плотность ( $\rho$ ,  $кг/м^3$ ) и скорость ( $v$ ,  $м/с$ ) с учетом влияния температуры ( $T, K$ )  $p = \rho(T) \cdot v^2$  [11], тогда (1) примет следующий вид:

$$\rho \cdot v^2 \cdot S \cdot \cos^2(\alpha) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha). \quad (2)$$

Окончательно скорость газового потока будет равна:

$$v = \sqrt{\frac{m \cdot g}{\rho \cdot S \cdot \cos(\alpha)} \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}. \quad (3)$$

### Результаты исследований и их обсуждение

С целью получения функциональной характеристики датчика скорости ПМС в графической форме при помощи ПО «MathCad 15» была выполнена серия расчетов для маятника из карбида кремния (плотность  $\rho = 3211 \text{ кг/м}^3$ ; масса  $m = 3211 \cdot 3 \cdot 10^{-9} \approx 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ ; фронтальная площадь,  $S = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ) с учетом условий в типичных зонах пламени (см. табл.).

Значения температуры и вязкости в разных зонах диффузионного пламени [11]

	Ядро	Зона восстановления	Область факела
Температура $T$ , °C	300-500	1200-1500	700-1000
Вязкость $\nu$ , $10^6 \text{ м}^2/с$	48-79	233-280	115-177

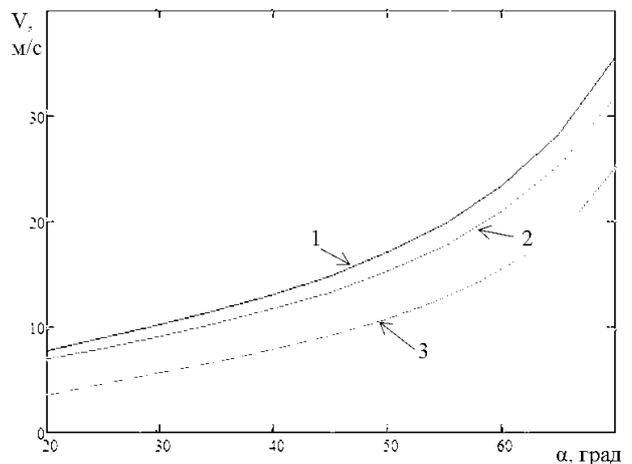


Рис.3. Графики зависимости скорости газового потока от угла отклонения маятника пиро-микромеханической системы при различных температурах газа. Расчет ПО «MathCad 15». (1 —  $T = 1200^\circ\text{C}$ ; 2 —  $T = 900^\circ\text{C}$ ; 3 —  $T = 500^\circ\text{C}$ )

Диапазон изменения угла маятника датчика в компьютерном эксперименте составлял  $\alpha = 10^\circ \div 70^\circ$ . Результаты моделирования приведены на рис.3. Достаточно хорошо видно, что функциональные характеристики SiC-датчика скорости при различных температурах газового потока нелинейны и зависят от плотности газа. Принципиально важным для телевизионных измерений являются пороговые значения скорости газа, когда маятник датчика отклоняется на угол  $\alpha \rightarrow 90^\circ$  (максимальное значение). В рамках рассматриваемой модели данные скорости были оценены и их значения приблизительно составили соответственно:  $T = 1200^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{пор}} = 8758$  м/с;  $T = 900^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{пор}} = 7804$  м/с;  $T = 500^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{пор}} = 6341$  м/с.

### Вывод

Разработанная методика расчета функциональной характеристики датчика скорости раскаленного газового потока энергонезависимой ПМС позволяет оптимизировать ее конструкцию с учетом особенностей эксплуатации и технологии измерения по изобращению.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 16-47-530820 р\_а, 17-47-530020 р\_а.*

1. Гиль В.В. Оптические методы исследования процессов горения. М.: Наука, 1984. 169 с.
2. Магунов А.Н. Теплообмен неравновесной плазмы с поверхностью. М.: Физматлит, 2005. 312 с.
3. Карачинов В.А., Карачинов Д.В., Торицин С.Б. Зондовые методы телевизионной пирометрии нагретых газовых потоков. В.Новгород: НовГУ, 2006. 108 с.
4. Карачинов В.А., Карачинов Д.В., Ильин С.В. Методы телевизионной термометрии гетерогенных систем. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 298 с.
5. Патент №2466362 РФ, МПК G01J 5/28. Способ измерения пространственного распределения температуры РФ № 2010154349/28 / В.А.Карачинов, Д.В.Карачинов. Заявл. 29.12.2010. Оpubл. 10.11.2012. Бюл. №19.
6. Алексеев М.М., Алексеев М.В., Самсонов В.П., Семенов О.Ю. Моделирование гидродинамических явлений, сопровождающих распространение фронта пламени в трубе за поршнем //ЖТФ. 2014. Т.84. Вып.1. С.53-60.
7. Riza N.A. Hybrid Optical Sensor for Extreme Temperature Measurement in Next Generation Higher Efficiency Greener Power Plants // AMA Conferences. Nuremberg, Germany, 19-21 May. 2015. P.511-513.

8. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков / Под ред. В.А. Фабриканта. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 288 с.
9. Диденко А.А. Лазерно-оптические методы диагностики процессов горения: Учебное пособие. Самара: СГА-КУ. 2006. 187 с.
10. Патент №2466361 РФ. Класс МПК G01J 5/00. Микроизлучатель. РФ № 2011126230/28 / В.А.Карачинов, Д.В.Карачинов. Заявл. 24.06.2011. Оpubл. 10.11.2012. Бюл. №31.
11. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1977. 344 с.

### References

1. Gil' V.V. Opticheskie metody issledovaniia protsessov goreniia [Optical methods for investigating combustion processes]. Moscow, "Nauka" Publ., 1984. 169 p.
2. Magunov A.N. Teploobmen neravnovesnoi plazmy s poverkhnost'iu [Heat exchange between non-equilibrium plasma and the surface]. Moscow, "Fizmatlit" Publ., 2005. 312 p.
3. Karachinov V.A., Karachinov D.V., Toritsin S.B. Zondovye metody televizionnoi pirometrii gazovykh potokov [Probe methods of the gas flow television pyrometry]. Veliky Novgorod, 2006. 108 p.
4. Karachinov V.A. Karachinov D.V., Il'in S.V. Metody televizionnoi termometrii geterogennykh sistem [The methods of television thermometry of heterogeneous systems]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 298 p.
5. Karachinov V.A. Karachinov D.V. Sposob izmereniia prostranstvennogo raspredeleniia temperatury [Method of measuring spatial distribution gas temperature]. Patent RF, no. 2466362, 2012.
6. Alekseev M.M., Alekseev M.V., Samsonov V.P., Semenov O.Iu. Modelirovanie gidrodinamicheskikh iavlenii, soprovozhdaishchikh rasprostranenie fronta plameni v trube za porshnem [Simulation of hydrodynamic phenomena attendant on the flame front propagation in a tube behind a piston]. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics, 2014, vol. 59, no. 1, pp. 52-59.
7. Riza N.A. Hybrid optical sensor for extreme temperature measurement in next generation higher efficiency greener power plants. Proc. AMA Conf. Nuremberg, 2015, p.511-513.
8. Rinkevichius B.S.; Fabrikant V.A., ed. Lazernaia diagnostika potokov [Laser diagnostics of flows]. Moscow, MEI Publ., 1990. 288 p.
9. Didenko A.A. Lazerno-opticheskie metody diagnostiki protsessov goreniia [Laser and optical methods for diagnostics of combustion process]. Samara, SGA-KU Publ., 2006. 187 p.
10. Karachinov V.A., Karachinov D.V. Mikroizluchatel' [Micro Transmitter]. Patent RF no. 2466361, 2012.
11. Mikheev M.A., Mikheeva I. M. Osnovy teploperedachi [Heat-transfer principles]. Moscow, "Energiia" Publ., 1977. 344 p.