ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 20 1982 № 6

УДК 532.574

ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СКОРОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Жилин В. Г., Ивочкин Ю. П., Огородников В. П., Осипов В. В.

Описана конструкция оптико-механического преобразователя скорости, предназначенного для исследования турбулентных потоков жидких металлов. Проанализирована его структурная схема, представлены результаты калибровки в потоке ртути опытного образца, чувствительный элемент которого имеет диаметр ~50 мкм и эффективную длину ~1,5 мм. Дана оценка динамических характеристик преобразователя.

В настоящее время не существует достаточно надежного метода измерения структуры турбулентных потоков жидких металлов, в частности течений в магнитном поле. Попытки применить наиболее распространенный термоанемометрический метод для измерений в жидких металлах наталкиваются на принципиальные трудности. Они связаны с тем, что наличие теплового контактного сопротивления на границе чувствительный элемент — жидкий металл приводит к нестабильности коэффициента передачи [1], а малая величина числа Прандтля, характерная для жидких металлов, приводит к большой толщине теплового пограничного слоя вблизи чувствительного элемента, что значительно ухудшает пространственное разрешение и динамические характеристики прибора [2]. Простые по конструкции кондукционные анемометры с внешним магнитным полем [3] имеют также неопределенный коэффициент передачи, так как выходной сигнал зависит не только от величины скорости, но и от плотности электрических токов, замыкающихся через жидкость и не поддающихся измерению. Кондукционные анемометры с собственным магнитным полем [4] имеют значительные размеры, сложную конструкцию и в основном сохраняют недостатки, присущие кондукционным анемометрам с внешним магнитным полем.

В данной статье описывается двухкомпонентный оптико-механический преобразователь скорости [5], который в условиях умеренных температур и давлений может быть использован для исследования структуры турбулентных жидкометаллических потоков как с наложением магнитного поля любой конфигурации, так и в отсутствие магнитного поля.

Конструкция преобразователя представлена на рис. 1. Чувствительный элемент — тонкостенный стеклянный конус *1*, внутри которого находится стеклянный указатель *2*, жестко закрепленный в торце конуса. Преобразователь перемещения свободного конца указателя состоит из четырех одинаковых светопроводов, которые расположены так, что одна пара светопроводов, состоящая из осветительного светопровода *3*, оптически связанного с источником света *7*, и приемного светопровода *4*, соединенного с приемником света *8*, образует в зазоре луч света цилиндрической формы. Вторая пара светопроводов *5* и *6*, соединенных с источником света *7* и приемником света *9*, образует цилиндрический луч света, перпендикулярный первому лучу. Свободный конец указателя зачернен и расположен относительно светопроводов так, что частично перекрывает оба луча. Под действием скорости набегающего потока чувствительный элемент *1* прогибается, и указатель *2*, перемещаясь, изменяет величины световых потоков, поступающих в приемники света *8* и *9*. Таким образом, величины сигналов фотоприемников *8* и *9* функционально связаны с величинами двух компонент скорости набегающего потока.

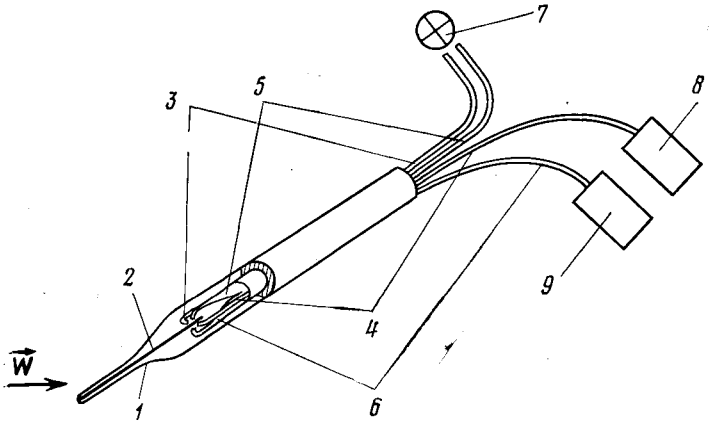

Рис. 1. Конструкция оптико-механического преобразователя скорости

Проанализируем структурную схему, представленную на рис. 2. Преобразователь *1* вектора скорости потока **V** в силу лобового сопротивления **F** имеет коэффициент передачи, связывающий модуль вектора силы лобового сопротивления $|\mathbf{F}|$ с модулем вектора скорости $|\mathbf{V}|$ набегающего потока [6]

$$|\mathbf{F}|=C(\mathrm{Re})\rho(\overline{V}\overline{V}/2)d_{\text{н}}l, \tag{1}$$

где $C(\mathrm{Re})$ — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса; $\mathrm{Re}=|\overline{V}|d_{\text{н}}/\nu$ — число Рейнольдса; ρ — плотность жидкости; $d_{\text{н}}$ — наружный диаметр чувствительного элемента; l — его эффективная длина; ν — кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Направление силы лобового сопротивления совпадает с направлением проекции вектора скорости на плоскость, перпендикулярную оси чувствительного элемента. Из (1) следует, что преобразователь *1* (рис. 2) имеет нелинейную характеристику.

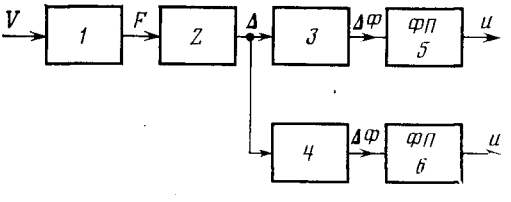

Рис. 2. Структурная функциональная схема оптико-механического преобразователя скорости. Преобразователи: *1* – скорость – сила лобового сопротивления; *2* – сила лобового сопротивления – перемещение указателя; *3*, *4* – перемещение указателя – изменение светового потока; *5*, *6* – световой поток – электрический сигнал

Преобразователь *2* силы лобового сопротивления чувствительного элемента в перемещение (рис. 2) также нелинеен. Принимая, что чувствительный элемент имеет цилиндрическую форму, перемещение конца указателя Δ можно определить по формуле [7]

$$\Delta=L\sin\left(\frac{|\mathbf{F}|l^2}{6EI}\right)-\frac{|\mathbf{F}|l^3}{8EI}, \tag{2}$$

где L — длина указателя *2* (рис. 1); E — модуль упругости материала чувствительного элемента; $I\simeq 0{,}05d_{\text{н}}^4(1-\beta^4)$ — момент инерции сечения чувствительного элемента; β — отношение внутреннего диаметра чувствительного элемента к наружному.

Перейдем к преобразователю двух компонент вектора перемещения конца указателя *2* (рис. 2) в изменение светового потока. Предположим, что оба луча света являются круговыми цилиндрами. В этом случае зависимость величины светового потока, поступающего в фотоприемник **Ф** от

величины перекрытия луча указателя h, можно описать соотношением

$$\Phi(h)=\Phi_0\left(1-\frac{\arccos(1-h/r_0)}{\pi}+\frac{r_0-h}{\pi r_0^2}\sqrt{r_0^2-(r_0-h)^2}\right), \qquad (3)$$

где Φ_0 — световой поток, поступающий в фотоприемник, когда указатель находится вне луча; r_0 — радиус луча; h — часть диаметра луча, перекрытая указателем.

Как видно из (3), коэффициенты передачи преобразователей *3* и *4* (рис. 2) также нелинейны. Если в качестве фотоприемников использовать

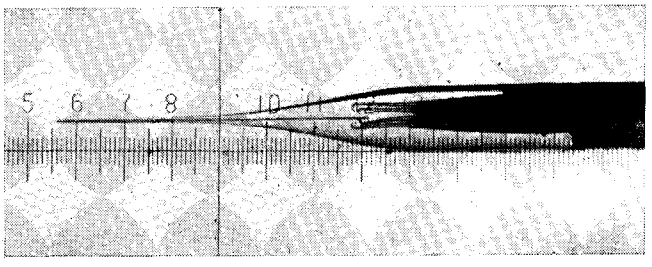

Рис. 3. Фотография опытного образца оптико-механического преобразователя скорости

фотодиоды или ФЭУ, то коэффициенты передачи преобразователей светового потока в электрический сигнал можно считать линейными, причем эти преобразователи практически не будут вносить частотных искажений.

Из проведенного анализа следует, что суммарный коэффициент передачи описанного анемометра в силу его нелинейности следует определять экспериментально.

На рис. 3 представлена фотография опытного образца преобразователя скорости со следующими геометрическими размерами: $d_н$=50 мкм, L=3 мм, β=0,85 и $l\simeq$1,5 мм. Все элементы преобразователя изготовлены из стекла и склеены эпоксидной смолой.

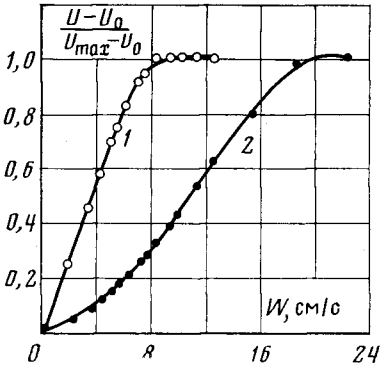

Рис. 4. Результаты тарировки по скорости оптико-механического анемометра

Результаты калибровки образца в затопленной струе ртути представлены на рис. 4. Результаты калибровки даны в относительных единицах (U — сигнал фотоприемника, U_0 — то же при нулевой скорости, $U_{макс}$ — максимальный сигнал, когда указатель выходит из луча). Кривая *1* (рис. 4) соответствует случаю, когда вектор скорости направлен вдоль одного луча света, а кривая *2* получена при совпадении вектора скорости с направлением другого луча. Из рис. 4 видно, что суммарная нелинейность коэффициента передачи невелика. Как показали специальные эксперименты, взаимное влияние измерительных каналов друг на друга отсутствует. Таким образом, предлагаемое устройство может быть использовано для независимого измерения двух компонент постоянной во времени скорости, причем осреднение измеряемых величин проводится по цилиндрическому объему диаметром ~50 мкм и длиной ~1,5 мм. Насколько известно авторам, другие типы двухкомпонентных анемометров имеют худшее пространственное разрешение.

Однако наибольший интерес представляют измерения переменной во времени скорости потока (например, турбулентных пульсаций скорости). Здесь существенными являются также динамические характеристики пре-

образователя, в значительной степени определяемые резонансными частотами чувствительного элемента и указателя, которые в первом приближении можно рассматривать как цилиндрические консольные балки с жесткой заделкой. В этом случае резонансная частота $\omega_{рез}$ [8]

$$\omega_{рез}=1{,}875^2(EI/\rho_c S)^{1/2}l^{-2}. \quad (4)$$

При определении резонансной частоты чувствительного элемента следует учитывать наличие указателя, который, обладая массой и создавая момент на конце чувствительного элемента, уменьшает его резонансную частоту на ~30%. При этом резонансные частоты чувствительного элемента и указателя отличаются почти на порядок (для данного случая соответственно ~3000 и ~400 Гц).

Другой важной величиной, определяющей динамические характеристики, является коэффициент затухания α [8], зависящий от плотности и вязкости окружающей колеблющееся тело среды. Что касается указателя, окруженного воздухом, то для него величина $\alpha\simeq0{,}05$, т. е. весьма мала, и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) указателя имеет резко выраженный максимум при совпадении частоты возмущающей силы с резонансной. При этом АЧХ в диапазоне 0—0,5 $\omega_{рез}$ практически не зависит от величины α: максимальное отличие для $\alpha=0$ и $\alpha=0{,}1$ при $\omega/\omega_{рез}=0{,}5$ не превосходит 1,5%. Для чувствительного элемента, окруженного плотной жидкостью (например ртутью), характерны значительные коэффициенты затухания, возрастающие с увеличением скорости потока и достигающие величины $\alpha\sim3$ [1] при $V=10$ см/с. Поэтому АЧХ для чувствительного элемента имеет вид монотонно падающей с увеличением ω кривой. Однако и в данном случае не возникает необходимости иметь точные данные о величине α. В лабораторных установках с жидкими металлами частота пульсаций скорости не превосходит 100 Гц, а резонансная частота чувствительного элемента ~3000 Гц и динамические искажения сигнала в рабочем диапазоне частот не выходят за 1% даже при значении $\alpha\simeq5$. Таким образом, АЧХ преобразователя полностью определяется АЧХ указателя и может быть с достаточной точностью (2—3%) скорректирована относительно простой электронной схемой, настроенной на $\alpha=0$.

Необходимо, однако, иметь в виду одно принципиальное ограничение предлагаемого преобразователя при измерениях турбулентных пульсаций. Известно, что при поперечном обтекании цилиндра для $Re=Vd_н/\nu\geqslant50$ образуется так называемая вихревая дорожка Кармана. Периодические силы, связанные с отрывом вихрей, могут быть по порядку величины соизмеримы с силой лобового сопротивления и приводить к появлению паразитного переменного сигнала. Поэтому существует верхний предел скорости обтекания $V_{макс}=50\nu/d_н$, выше которого измерения турбулентных пульсаций затруднены. Если рабочая жидкость — ртуть, то при $d_н=50$ мкм $V_{макс}=0{,}1$ м/с. При этом в канале с эквивалентным диаметром ~50 мм могут быть реализованы течения при значении Re до $5\cdot10^4$.

Таким образом, проведенные расчетные и экспериментальные исследования образца оптико-механического преобразователя скорости позволяют надеяться на возможность его применения для исследования турбулентных потоков жидких металлов и других жидкостей.

Предлагаемую конструкцию отличают высокое пространственное разрешение, приемлемый рабочий диапазон частот, безразличие к калорическим и электрофизическим свойствам жидкости, малая чувствительность к неизбежным загрязнениям чувствительного элемента. Эти преимущества, на наш взгляд, компенсируют основные недостатки — сложность конструкции и связанные с ней трудности изготовления.

Авторы выражают благодарность А. А. Оксману за разработку и изготовление вторичной электронной аппаратуры.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
5.X.1981

[1] Оценки α проведены по методике, аналогичной описанной в [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малкольм Д. Дж.* Магнитная гидродинамика, 1970, № 2, с. 55.
2. *Маркова Л. Г.* Магнитная гидродинамика, 1974, № 3, с. 141.
3. *Корсунский Л. М.* Магнитная гидродинамика, 1974, № 4, с. 148.
4. *Повх И. Л.* Аэродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1974.
5. *Жилин В. Г., Огородников В. П., Осипов В. В.* Авт. свид. № 684448. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки, 1979, № 33, с. 183.
6. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
7. Справочник машиностроителя/Под ред. И. С. Ачеркана. Т. 3. М.: Машгиз, 1963.
8. *Филиппов А. П.* Колебания деформируемых систем. М.: Машиностроение, 1970.
9. *Жилин В. Г., Огородников В. П., Осипов В. В.* ТВТ, 1980, т. 18, № 2, с. 387.