

УДК 551.508.5

В. К. НОВИК, Ю. М. РОМАНОВСКИЙ, В. Н. СОКОЛОВ

## ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Описано устройство для измерения турбулентных пульсаций в жидкости. Пироэлектрический датчик из керамики ЦТС-19 измеряет флуктуации температуры, которые вызваны изменениями скорости обтекания. Эффективность работы датчика обусловлена искусственным подогревом. Приведен простейший расчет выходного сигнала в случае, когда пульсации являются гармоническими.

Одним из главных приборов для исследования турбулентных пульсаций в потоке жидкости или газе является в настоящее время проволоочный или пленочный термоанемометр.

Основной недостаток такого датчика заключается в осаждении солей на его рабочей поверхности вследствие электролиза, который особенно интенсивен при измерениях в морской воде. Меры борьбы с электролизом связаны с усложнением и увеличением электронной аппаратуры.

Рассматриваемый в настоящей работе датчик, пироанемометр, регистрирует изменения температуры, происходящие в результате пульсаций скорости в турбулентном потоке. В качестве преобразования температурных колебаний в электрические используется пироэлектрик — диэлектрическая пластина, на обкладках которой возникают разноименные заряды при быстром изменении средней по ее толщине температуры [1].

Так как турбулентные пульсации скорости потока обуславливают колебания коэффициента теплообмена между пластиной и потоком, то пироанемометр является фактически датчиком теплообменного типа. При использовании датчика применялся искусственный подогрев, который обеспечивает заметное превышение средней температуры пластины над средней температурой потока жидкости или газа. Такой нагрев может производиться различными способами.

Ниже приводятся теоретические и экспериментальные результаты, полученные для пироэлектрической пластины из керамики ЦТС-19, расположенной заподлицо со стенкой плоской трубы, по которой пропускается турбулентный поток воды. При этом подогрев пластины производится с торца, противоположного потоку (см. рис. 1).

Для того чтобы произвести расчеты пироэлектрического сигнала датчика, необходимо прежде всего записать закон изменения коэффи-

коэффициента теплообмена  $\alpha$  между нагреваемой пластинкой, являющейся участком стенки плоской трубы, и потоком жидкости:

$$\alpha(t) = \alpha_0 (1 + K \sin \omega t), \quad (1)$$

где  $K \ll 1$ .

Величина пиросигнала однозначно связана с изменением средней температуры датчика по формуле (см. [1])

$$E_{\text{пир}} = \gamma^\sigma \frac{\Delta T_{\text{ср}}}{C_{\text{эл}}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{пир}}$  — пирозлектрическая э. д. с. датчика,  $C_{\text{эл}}$  — электрическая емкость пластинки датчика,  $\Delta T_{\text{ср}}$  — изменение средней по толщине тем-

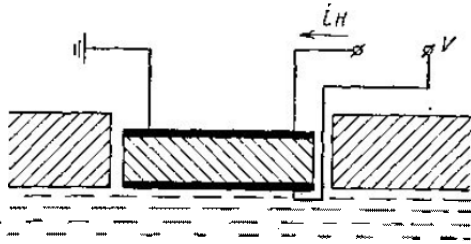


Рис. 1. Схема датчика

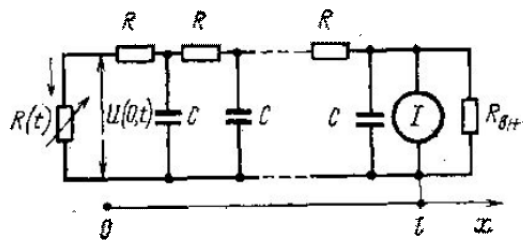


Рис. 2. Эквивалентная схема рассмотрения тепловых процессов при нагреве пластины со стороны, обратной потоку

пературы,  $\gamma^\sigma$  — пироккоэффициент при постоянном механическом напряжении.

Таким образом, первым этапом расчета является определение  $T_{\text{ср}}$ . Для этого удобно керамическую пластину по толщине рассматривать как распределенную систему, представимую в виде аналоговой длиной  $l$ , нагруженной на конце на сопротивление  $R_{\text{вн}}$  (рис. 2). На схеме сопротивления  $R$  соответствуют термическому сопротивлению керамики на единицу длины,  $C$  — удельная теплоемкость керамики на единицу объема,  $u(x, t)$  — распределение температуры по толщине пластины,  $I$  — суммарный тепловой поток от пленки-нагревателя,  $R_{\text{вн}}$  — термическое сопротивление при отдаче тепла пластинкой в воздух через слой теплоизоляции;  $R(t)$  является аналогом переменного термического сопротивления, фактически обуславливающего появление сигнала. В соответствии с (1)  $R(t)$  имеет такой вид:

$$R(t) = \frac{R_0}{1 + K \sin \omega t}, \quad (3)$$

где  $R_0 = 1/\alpha_0$ .

Решение этой задачи в общем виде оказывается весьма громоздким, поэтому дальнейшие расчеты сделаны при условии, что  $R_0 \ll Rl \ll R_{\text{вн}}$ . В этом случае можно считать, что тепловой поток, протекающий через сопротивление  $R(t)$ , равен

$$b \cdot I = \text{const},$$

где  $b \leq 1$  — коэффициент, учитывающий отток тепла через  $R_{\text{вн}}$ , а также через боковую поверхность пластины.

Отсюда для напряжения, действующего на входе линии, имеем

$$u(0, t) = bIR(t) = \frac{bIR_0}{1 + K \sin \omega t} \simeq bIR_0 (1 - K \sin \omega t).$$

Используя математический аппарат, существующий для расчета длинных линий [2], найдем изображение функции  $u(x, t)$  по Лапласу:

$$\bar{U}_{x,p} = \frac{bIR_0}{p} \frac{\text{ch}[\mu(x-l)]}{\text{ch}(\mu l)} = \frac{bIR_0 \omega \text{ch}[\mu(x-l)]}{(p^2 + \omega^2) \text{ch}(\mu l)},$$

где  $\mu = \sqrt{pRC}$ . После перехода от изображения к оригиналу и усреднения переменного члена по толщине пластины  $l$  получим следующее выражение для переменной составляющей средней температуры:

$$\langle u \rangle = \frac{\sqrt{2} I k b R_0 \sqrt{\text{sh}^2(vl) + \sin^2(vl)}}{lv [\text{ch}(vl) + \sin(vl)]} \cos(\omega t + D). \quad (4)$$

Здесь

$$v = \sqrt{2\omega RC}, \quad D = \text{arctg} \left[ \frac{\text{sh}^2(vl) + \sin^2(vl)}{\text{sh}(vl) - \sin(vl)} \right].$$

Для реальных величин можно положить  $[R \simeq 10^4 \text{ см} \cdot \text{с} \cdot \text{гр}/\text{кал}; C \simeq 1,2 \text{ кал}/\text{см}^3 \cdot \text{гр}; l = 0,4 \text{ см}; \omega = 120 \text{ с}^{-1}$ . Тогда  $vl \simeq 700$ , и поэтому выражение (4) можно упростить:

$$\langle u \rangle = \frac{I k b R_0}{l \sqrt{\omega RC}} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right). \quad (5)$$

Экспериментальная установка состояла из плоской металлической трубы, по которой пропускался поток воды, датчика (см. рис. 1), переходной  $rC$ -цепочки и осциллографа С1-15 с высокочувствительным предусилителем. Подогрев пластины осуществлялся постоянным электрическим током  $0 \div 360 \text{ мА}$ , пропускавшимся по константановой проволоке сопротивлением  $14 \text{ Ом}$ . Как уже говорилось, нагрев пластины со стороны, противоположной потоку, не является единственно возможным — в ходе работы, например, была сделана попытка расположить нагреватель на стороне пластины, обращенной к потоку. Можно теоретически показать, что такой способ нагрева является менее эффективным.

Средняя скорость потока воды  $\langle v \rangle$  изменялась от  $19$  до  $47 \text{ см}/\text{с}$  (с точностью до  $5\%$ ); этим скоростям при размерах сечения трубы  $28,5 \times 12,5 \text{ мм}$  соответствуют числа Рейнольдса от  $3100$  до  $7700$ , определенные по формуле

$$Re = \frac{\langle v \rangle D_{\text{экв}}}{\nu},$$

где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $D_{\text{экв}}$  — эквивалентный размер канала, определяемый при помощи таблиц, данных в [3]. Даже при нижней из упомянутых скоростей течение воды в трубе можно считать вполне турбулизированным.

Полоса частот регистрируемых турбулентных пульсаций определяется максимальным и минимальным значениями  $L$  — характерного размера турбулентного вихря в соответствии с известным соотношением

$$\Delta f \sim \frac{\langle v \rangle}{L_{\text{max}}} \div \frac{\langle v \rangle}{L_{\text{min}}}. \quad (6)$$

Очевидно,  $L_{\max} \sim D_{\text{эпв}}$ , а минимальные размеры вихря, еще «различаемого» пластиной датчика диаметром  $d$ , имеют величину  $L_{\min} \sim d$ . Отсюда для полосы исследуемых частот получаем  $\Delta f \sim 10-50$  Гц.

В ходе эксперимента выяснилось, что пьезоэлектрический датчик, обладая пьезоэлектрическими свойствами, весьма чувствителен к акустическому шуму трубы, в которой он жестко закреплен. Поэтому попутно пришлось решать задачу фильтрации вредного пьезосигнала по частотному принципу (пьезоэлектрический шум имел частоты порядка сотен герц).

Именно с этой целью на входе предусилителя осциллографа была поставлена RC-цепочка. На рис. 3 приводится эквивалентная схема такого включения датчика, на ней  $r_{\text{вх}}$  — входное сопротивление осциллографа (входной емкостью которого можно пренебречь), а смысл  $E_{\text{шум}}$  и  $C_{\text{эл}}$  был пояснен выше.

Для рабочей полосы частот с учетом того, что  $C_1 \gg C_{\text{эл}} = 400$  пкФ, а  $r_1 \sim r_{\text{вх}} \sim 1$  МОм, получим

$$V_{\text{вых}} = \frac{I_{\text{н}} k b R_0 \gamma^{\sigma}}{i C_1 V \omega R C} \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{4} \right). \quad (7)$$

В данной работе была сделана попытка экспериментально исследовать зависимость величины выходного сигнала  $V_{\text{вых}}$ , во-первых, от тока нагрева  $i_{\text{н}}$  и, во-вторых, от скорости потока  $\langle v \rangle$ . Если в первом случае теоретический вид зависимости очевиден (так как тепловой поток  $I \sim i_{\text{н}}^2$ ), то во втором — это не так. Дело в том, что выражение (7) получено для определенной частоты  $\omega$ , что, конечно же, не имеет особого смысла для реального случайного процесса турбулентных пульсаций.

На рис. 4 показаны осциллограммы сигнала при различных  $\langle v \rangle$  и  $i_{\text{н}}$ : а —  $\langle v \rangle = 0,19$  м/с,  $i_{\text{н}} = 360$  мА; б —  $\langle v \rangle = 0,31$  м/с,  $i_{\text{н}} = 240$  мА; в —  $\langle v \rangle = 0,47$  м/с,  $i_{\text{н}} = 120$  мА. На всех трех снимках масштаб по горизонтали 200 мс/см. Рост амплитуды сигнала с увеличением  $i_{\text{н}}$  очевиден, что доказывает его пьезоэлектрическую природу. Из приведенных осциллограмм можно также сделать вывод об обогащении спектра сигнала высокими частотами при увеличении  $\langle v \rangle$ . Кроме того, на рис. 4, б и 4, в видно, что наблюдаемый сигнал является суперпозицией пьезоэлектрического и пьезоэлектрического сигналов, последний из которых, однако, почти полностью подавлен и при скорости  $\langle v \rangle = 0,19$  м/с практически незаметен.

Наконец, на рис. 5 приведены графики зависимости условной «средней» амплитуды  $V_0$  пульсаций на экране осциллографа от тока нагрева  $i_{\text{н}}$ . Эта зависимость, как было уже замечено, должна быть квадратичной. Величина «средней» амплитуды определялась при фотометрировании снимка с выдержкой 30 с, сделанного с экрана осциллографа с отключенной разверткой.

Опыты показали, что пьезоэлектрический датчик вполне может быть использован для регистрации турбулентных пульсаций скорости в потоке жидкости. При этом весьма существенным является подогрев пьезоэлектрической пластины для поддержания постоянного теплового по-

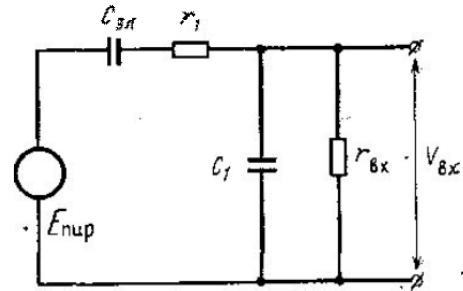


Рис. 3. Эквивалентная схема пьезоэлектрического включения датчика

тока от нее к исследуемой среде. Колебания коэффициента теплообмена и обеспечивают при этом изменения средней температуры пластины, что является причиной образования пиросигнала.

Перспективность пироанемометра определяется прежде всего простотой измерительной схемы, которая при современном уровне миниатюризации может быть без труда конструктивно совмещена с чув-

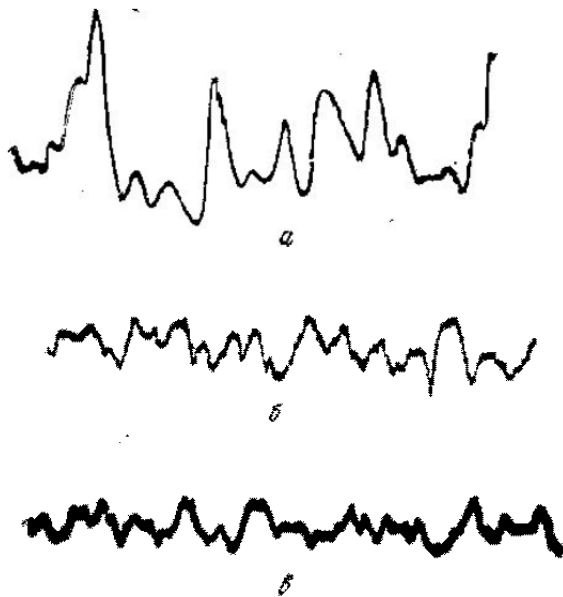


Рис. 4. Осциллограммы выходного сигнала датчика при разных средних скоростях потока  $\langle v \rangle$  и разных токах нагрева  $i_H$

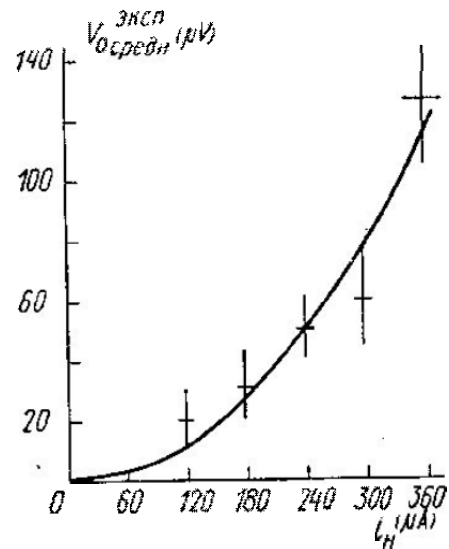


Рис. 5. Экспериментальные кривые зависимости «средней» амплитуды выходного сигнала от тока нагрева

ствительным элементом датчика. При уменьшении его линейных размеров можно будет, например, помещать его непосредственно в поток воды без существенного изменения самого потока. При этом в качестве нагревателя пироэлемента целесообразно использовать тонкую пленку из металла с высоким удельным сопротивлением.

Другим полезным усовершенствованием датчика явится создание такой схемы дифференциального включения датчика [4] наряду с пироэлектрическим, которая позволила бы использовать пьезоэлектрические свойства пластины для регистрации локальных турбулентных пульсаций давления в потоке жидкости при полном подавлении пьезоэлектрического «шума», приходящего из трубы. Это дало бы возможность получать информацию о пульсациях скорости и давления, происходящих в одном и том же элементарном объеме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Новик В. К., Гаврилова Н. Д. «Электронная техника», вып. 8, 1970.
2. Конторович М. А. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. М., 1955.
3. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М., 1958.
4. Гарин О. В., Новик В. К. «Электронная техника», вып. 8, 1970.

Поступила в редакцию  
16.10 1974 г.

Кафедра  
общей физики для мехмата