

С. И. КРЕЧМЕР

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИИ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 24 VI 1948)

Для измерения быстрых пульсаций скорости воздушного потока обычно применяется термоанемометр, действие которого основано на зависимости температуры (сопротивления) тонкой металлической нити, подогреваемой током, от скорости потока.

Рассмотрение теплового баланса нити приводит к дифференциальному уравнению, описывающему изменение сопротивления нити во времени при заданных внешних условиях (сила тока, ветер) (1, 2)

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\bar{R} - R}{M}, \quad (1)$$

где \bar{R} — „равновесное“ сопротивление нити, соответствующее данной силе тока и скорости ветра, а M — постоянная времени нити — величина, определяющая ее тепловую инерцию.

Для решения ряда проблем, связанных с применением термоанемометра, и в частности вопроса об учете или компенсации инерции нити, весьма важно знать точное значение M (1). Используя уравнение теплового баланса нити совместно с соотношением между ее температурой и сопротивлением, можно получить теоретическое значение M (2, 3):

$$M = \frac{4,18 ms}{i^2 R_0^2 \alpha} (\bar{R} - R_0), \quad (2)$$

где m — масса нити, s — удельная теплоемкость, i — ток, подогревающий нить, R_0 — сопротивление нити при температуре T_0 , \bar{R} — ее среднее сопротивление при средней температуре T и α — температурный коэффициент. Однако теоретическое определение M связано с большими ошибками вследствие того, что из-за малых размеров очень трудно точно установить массу нити, а малейшие примеси или сильный подогрев заметно меняют ее удельную теплоемкость и температурный коэффициент, от которых M существенно зависит.

В настоящей работе предлагается экспериментальный метод определения постоянной времени термонити для любых сечений нити, токов и скоростей обдувания и приводятся результаты наших измерений.

Уравнение (1) совместно с начальным условием $R = R_0$ при $t = t_0$ описывает процесс установления сопротивления нити при определенных физических условиях (скорость ветра и сила тока), если в какой-то момент $t = t_0$ произошло изменение одного из этих параметров

за время значительно меньшее, чем время процесса установления. Решением уравнения в этом случае будет;

$$R = (R_0 - \bar{R})e^{-t/M} + \bar{R}. \quad (3)$$

Если поместить нить в одно из плеч симметричного мостика Уитстона, то напряжение в диагонали моста при небольших отклонениях сопротивления нити от равновесного значения, как показывает элементарный расчет, будет пропорционально этому отклонению при условии, что ток в цепи мостика не меняется:

$$V = K\Delta R. \quad (4)$$

Выберем такой ток и ветер, чтобы \bar{R} нити соответствовало балансу моста. Тогда отклонение от балансного значения равно разности мгновенного значения сопротивления нити и сопротивления при установившемся режиме:

$$\Delta R = R - \bar{R}. \quad (5)$$

Используя соотношения (3), (4) и (5), получаем:

$$V = K(R_0 - \bar{R})e^{-t/M}. \quad (6)$$

Легко видеть, что если каким-либо путем получена кривая, соответствующая уравнению (6), $V = f(t)$, то достаточно взять на ней две точки с координатами (V_1, t_1) и (V_n, t_n) , чтобы определить значение постоянной вре-

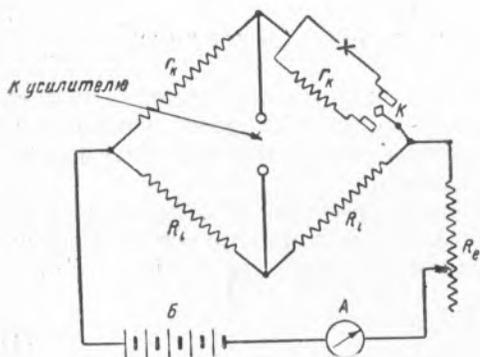


Рис. 1. Принципиальная схема установки для определения постоянной времени термоанемометра

мени:

$$M = \frac{t_n - t_1}{\ln n}, \quad (7)$$

где $n = V_1/V_n$.

Изложенный выше принцип определения M был осуществлен при помощи следующей схемы (рис. 1). Три плеча симметричного мостика Уитстона состояли из двух равных сопротивлений R_1 и контрольного переменного сопротивления r_k . В четвертое плечо моста можно было включать или эквивалентное сопротивление, балансирующее мост (равное r_k), или же исследуемую нить. Переключение осуществлялось перекидным джеком K с большой скоростью. Постоянство тока в нити обеспечивалось включением достаточно большого балластного сопротивления R_1 в цепь питания.

К диагонали мостика подключался вход усилителя вертикальной развертки катодного осциллографа*. Фотографирование экрана осциллографа производилось светосильным объективом на высокочувствительную пленку. Перед экспозицией в мостике устанавливался ток, подогревающий нить при данном ветре до сопротивления, балансирующего мостик, и подбирались соответствующие усиление и скорость развертки. После такой подготовки выключалось анодное напряжение осциллографа (чтобы погасить экран), и в мостик вместо нити под-

* В установке использовался катодный осциллограф типа «Дюмонд». Горизонтальная развертка обеспечивалась внутренним устройством осциллографа, которое синхронизировалось и контролировалось частотой переменного тока городской сети (50 периодов/сек.).

ключалось эквивалентное сопротивление. При экспозиции включалось анодное напряжение осциллографа, и вслед за ним в мостике вместо эквивалентного сопротивления подключалась исследуемая нить, после чего анодное напряжение выключалось.

При этом действительно получается, что в момент подключения нити t_0 ее сопротивление R_0 соответствует температуре окружающего воздуха T_0 , а при установившемся режиме ее сопротивление равно \bar{R} . Напряжение же в диагонали изменяется пропорционально $\Delta R = \bar{R} - R$ и при установившемся режиме равно нулю. На экране осциллографа, таким образом, прочерчивается кривая исчезновения диагонального тока, соответствующая установлению заданного сопротивления нити (рис. 2).

Этим методом было произведено определение M для платиновой проволоки диаметром 0,02 мм и длиной 25 мм, припаянной на концах к медным стерженькам диаметром 1 мм. Фактическое сопротивление

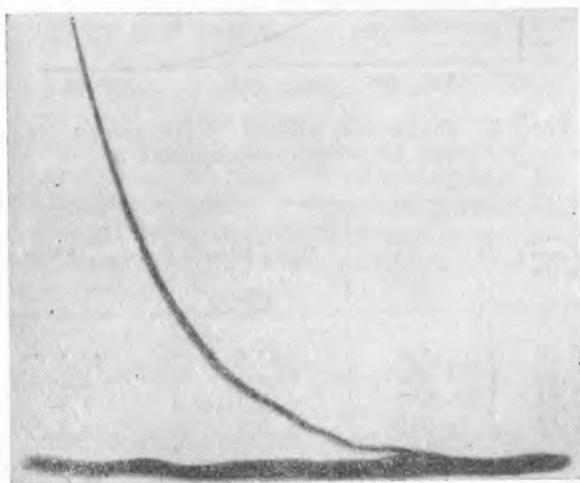


Рис. 2. Кривая, характеризующая процесс установления сопротивления нити при включении

этой нити при температуре окружающего воздуха 20°C составляло $8,82 \Omega$ *. Измерения производились для трех контрольных сопротивлений: 13, 17 и 20Ω , что соответствует температурам 121, 238 и 324°C , если принять температурный коэффициент $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$ согласно таблице физических величин (4).

M измерялось в отсутствие обдувания и при скоростях обдувающего ветра от 3 до 16 м/сек. В первом случае точность определения инерции была несколько ниже вследствие невозможности учета отдачи тепла, вызванного конвекцией и незначительными колебаниями воздуха. Обработка кривых, соответствующих установлению сопротивления нити, производилась на основании формулы (7) для $n = 2, 3, 4$, и бралось среднее из соответствующих трех значений инерции нити (см., например, рис. 3).

Для тех же условий, при которых M определялось экспериментально, вычислялось ее теоретическое значение по формуле (2), причем m, s и α брались по таблице в тех же пределах, что и у авторов (1, 4), а \bar{R}, R_0 и i определялись условиями эксперимента. Данные, полученные тем и другим способом, приводятся в табл. 1.

* Табличное значение сопротивления для такой нити дает величину $8,01 \Omega$.

При сравнении наблюдаемых и вычисленных значений видно, что отношение наблюдаемых значений к вычисленным в условиях обду-

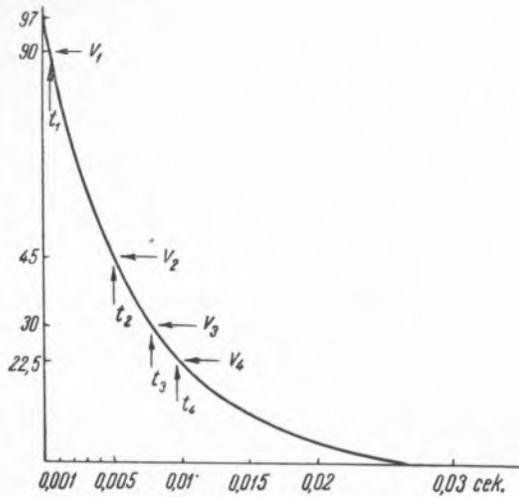


Рис. 3. Обработка кривой установления для одного из случаев определения M

Таблица 1

r_k	Скорость обдувания в м/сек.	i , мА	$M_{\text{экс}} \cdot 10^8 \text{сек.}$	$M_{\text{теор}} \cdot 10^8 \text{сек.}$	$M_{\text{экс}} : M_{\text{теор}}$
13	0,06	128	41,0	17,5	2,32
	5,52	251	7,4	4,6	1,61
	7,95	270	6,1	3,9	1,56
	9,24	291	5,7	3,4	1,68
17	0,02	170	36,5	19,8	1,84
	0,02	170	37,7	19,8	1,91
	0,06	160	34,6	22,3	1,55
	7,02	325	8,0	5,4	1,48
	11,60	350	6,5	4,7	1,38
	11,60	350	6,9	4,7	1,47
	16,30	375	6,2	4,1	1,51
20	0,03	190	36,1	22,1	1,63
	0,03	190	33,3	22,1	1,51
	2,52	341	9,6	6,8	1,41
	2,52	341	9,6	6,8	1,41
	3,39	356	8,1	6,3	1,29
	5,90	390	7,4	5,2	1,42
	5,90	390	6,8	5,2	1,31
	8,12	414	6,1	4,6	1,33

вания нити близко к $3/2$. Указанное обстоятельство дает основание предполагать, что во многих случаях, где M только вычислялось, а не измерялось, его значение бралось заниженным по сравнению с истинным.

Геофизический институт
Академии Наук СССР

Поступило
17 VI 1948

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. Г. Захаров, Е. М. Минский и М. С. Филиппов, Тр. ЦАГИ, в. 402 (1939). ² H. L. Dryden and Kuethe, NASA Rep., No. 320 (1929). ³ С. Г. Попов, Измерение воздушных потоков, 1947. ⁴ Таблицы физических величин, под ред. А. П. Афанасьева, ГТТИ, 1933.