

УДК 536.5

**А.В. Скоробогатов**

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА  
ПРОВЕДЕНИЯ ХОЛОДОВОЙ ПРОБЫ**

Семинар № 23

---

**И**змерение температуры является одной из важных задач современной науки. Практически в любом физическом процессе температура является основным показателем, характеризующим сам процесс. Но при этом температура не может быть измерена непосредственно. Об её изменении судят по изменению других физ. свойств тел (объёма, давления, электрического сопротивления, ЭДС, интенсивности излучения и др.), связанных с температурой определёнными закономерностями. Поэтому методы измерения температуры являются по существу методами измерения указанных выше термометрических свойств, которые должны однозначно зависеть от температуры и измеряться достаточно просто и точно. При разработке конкретного метода или прибора необходимо выбрать термометрическое вещество, у которого соответствующее свойство хорошо воспроизводится и достаточно сильно изменяется с температурой.

Для измерения температуры (при любом методе) необходимо определить температурную шкалу. Методы измерения температуры разнообразны; они зависят от принципов действия используемых приборов, диапазонов измеряемых температур, условий измерений и требуемой точности. Их можно разделить на две основные группы: контактные методы — соб-

ственно термометрия, и бесконтактные методы — термометрия излучения, или пирометрия.

Общим и существенным для всех контактных методов измерения температуры является то, что всякий прибор, измеряющий температуру среды, должен находиться с ней в тепловом равновесии, т. е. иметь одинаковую со средой температуру. Основными узлами всех приборов для измерения температуры являются: чувствительный элемент, где реализуется термометрическое свойство, и связанный с ним измерительный прибор, который измеряет численные значения этого свойства.

Основной проблемой при измерении температуры кожного покрова является проблема «хорошего» контакта между поверхностью датчика, с помощью которого измеряется температура и поверхностью кожи. Кожный покров представляет собой сложную структуру и состоит из двух слоев. Наружный слой представляет собой многослойный плоский ороговевающий эпителий — эпидермис. Под ним находится собственно кожа. Собственно кожа в свою очередь имеет два слоя: поверхностный — сосочковый и глубокий — сетчатый. Сосочковый слой непосредственно прилежит к эпидермису и имеет многочисленные выпуклости — сосочки, которые богаты кровеносными сосудами и нервными окончаниями. Под кожей располагается

слой рыхлой соединительной ткани, богатой жировыми отложениями — подкожный жировой слой.

За счет такого строения кожный покров нельзя представлять обычной поверхностью, в данном случае требуется более сложная модель. Она будет рассмотрена ниже.

Рассмотрим взаимодействие организма с окружающей средой с точки зрения тепловыделения или теплоотдачи. Как известно теплообмен между поверхностью тела и соприкасающейся с ним средой (которая может рассматриваться как теплоноситель, так как в свою очередь также переносит тепло к другим телам) осуществляется конвекцией, теплопроводностью и лучистым теплообменом. Теплопередачу от тела человека можно рассматривать как теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их стенку или через поверхность раздела между ними. В качестве такой стенки или поверхности раздела выступают кожный покров.

#### *Описание процесса теплообмена*

Теплообмен включает в себя передачу теплоты от теплоносителя (крови) к поверхности раздела (коже) теплопроводность в самой поверхности раздела (коже, альвеолах) и теплоотдачу от поверхности к более холодной подвижной среде. Отдаваемая теплота при этом равна:

$$Q_T = (T_2 - T_1) / R_T \quad (1)$$

где  $T_2 - T_1$  — тепловой напор, разность температур поверхности и окружающей среды,  $R_T$  — полное термическое сопротивление.

Как следует из формулы тепловой поток от тела к среде возможен только при положительной разности температур. Термическое сопротивление зависит от площади охладителя: чем больше площадь, тем меньше сопротивление.

Термическое сопротивление зависит также от скорости потока охлаждающей среды, внешнего теплоносителя.

Еще одним «недостатком» кожи является высокое термическое сопротивление последней. Кожа — защитный покров человека. Ее назначение не только в чисто механической защите тканей, но и в тепловой защите. Кожа должна демпфировать резкие колебания температуры окружающей среды.

#### *Постановка задачи*

Рассмотрим конструкцию, показанную на рис. 1.

1.  $t_1$  — температура на границе датчика и его корпуса ;

2.  $t_2$  — температура на границе корпуса датчика и кожного покрова ;

3.  $t_3$  — температура на границе кожного покрова и кровеносной системы ;

4.  $q_1, q_2, q_3$  — тепловой потоки на границах сред, [Вт].

5. толщины слоев  $L_1, L_2, L_3$  [м]; ( $L_1$  — толщина корпуса датчика,  $L_2$  — толщина границы между датчиком и кожным покровом,  $L_3$  — толщина кожного покрова.

Температуры измеряются в градусах Кельвина.

Задача состоит в том, чтобы рассчитать сопротивление теплопередаче  $R_o$ , [ $m^2 K / Вт$ ].

Исходные данные следующие:

1. температура  $t_1$  [K]; (показание датчика)

2. толщины слоев  $L_1, L_2, L_3$  [м]; ( $L_1$  — толщина корпуса датчика,  $L_2$  — толщина границы между датчиком и кожным покровом,  $L_3$  — толщина кожного покрова.

3. коэффициенты теплопроводности материалов слоев  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , [Вт / м K], ( $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности материала датчика,  $\lambda_2$  —

$\Delta t, [K]$	Значения $\lambda_{en}, [Вт / мК], при L3, [м]$			
	0,01	0,02	0,05	0,07
1	0,023	0,024	0,049	0,063
2,5	0,023	0,031	0,062	0,079
5	0,024	0,037	0,073	0,094
10	0,026	0,044	0,087	0,112
15	0,028	0,049	0,097	0,123
20	0,03	0,052	0,104	0,133
25	0,033	0,056	0,109	0,141
30	0,034	0,058	0,115	0,147

коэффициент теплопроводности среды между материалом датчика и кожным покровом,  $\lambda_3$  — коэффициент теплопроводности кожного покрова.

$$Q = \frac{\Delta t}{R_T} \Rightarrow R_T = \frac{\Delta t}{Q} \quad (2), (3)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Поток от границы корпуса датчика ( $t_2$ ) до самого датчика ( $t_1$ ):

$$Q_1 = q_1 = \alpha_1 (t_2 - t_1) \quad (4)$$

Поток от границы ( $t_3$ ) кровеносной системы до кожного покрова (14):

$$Q_2 = q_2 = \alpha_2 (t_3 - t_4) \quad (5)$$

Для слоя внешней поверхности (кожный покров) тепловой поток (поток от границы кожного покрова ( $t_4$ ) до корпуса датчика ( $t_2$ )) распадается на две составляющие:

$$Q_3 = q_{луч} + q_{кон}$$

$$\text{При этом } \alpha_1 = \frac{\lambda_1}{L_1}, \quad \alpha_2 = \frac{\lambda_2}{L_2} \quad (\alpha_1 —$$

коэффициент теплоотдачи материала датчика,  $\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи среды между материалом корпуса датчика и кожным покровом,

Соответственно

$$q_{луч} = \alpha_3 (t_4 - t_2), \quad q_{кон} = \alpha_{кон} (t_3 - t_4), \quad \text{где}$$

$$\alpha_3 = \frac{C \left( \frac{t_4}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_2}{100} \right)^4}{t_4 - t_2}, \quad (7)$$

$$\text{где } C = \frac{1}{\frac{1}{C_{крс}} + \frac{1}{C_{кожи}} + \frac{1}{C_{чт}}}$$

Здесь  $\alpha_3$  — коэффициент теплоотдачи кожного покрова (при лучистом потоке);  $C$  — коэффициент, зависящий от отражательных свойств кожного покрова,  $[Вт / м^2 К]$ ;  $C_{крс}$  и  $C_{кожи}$  — коэффициенты излучения поверхностей кровеносных сосудов и кожного покрова,  $[Вт / м^2 К^4]$ ;  $C_{чт}$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела ( $5,7 [Вт / м^2 К^4]$ ).

Коэффициент ( $\alpha_{кон}$ ) теплоотдачи кожного покрова (при конвекционном потоке):

$$\alpha_{кон} = \frac{\lambda_{кп}}{L_3} \quad (8)$$

где  $\lambda_{кп}$  — коэффициент теплопроводности кожного покрова,  $[Вт / м К]$ ;  $L_3$  — толщина кожного покрова,  $[м]$ . В отличие от обычного коэффициента этот коэффициент величина не постоянная, а зависит от толщины кожного покрова и разности температур на поверхностях кожного покрова. Приблизительно его значение можно найти по формуле:

$$\lambda_{кп} = 0,02 + 6,1 \cdot 10^{-4} (t_3 - t_4) + 7,27 \cdot 10^{-1} \cdot L_3 + 2,69 \cdot 10^{-3} (t_3 - t_4) L_3 \quad (9)$$

Оно получено методом аппроксимации эмпирических данных, поэтому справедлива для значений  $\Delta t$ , изме-

няющихся в диапазоне от 1 до 30 [К], и для значений  $L$ , изменяющихся в диапазоне от 1 до 25 мм.

Данные, по которым проводилась аппроксимация, приведены в табл. 1 [Фокин, 1959].

В итоге имеем:

$$R_T = \frac{\Delta t}{Q},$$

где  $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = t_2 - t_1 + t_3 - t_4 + t_4 - t_2$ , а  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$  (10)

можем написать конечную формулу (11).

*Исследование условий влияющих на термосопротивление датчик — кожа*

Зависимости восстановления температуры кожного покрова в зависимости от силы прижатия датчика к коже:

*Описание измерительной установки*

Установка представляет собой панель с закрепленными датчиками в форме контура кисти человека. При их размещении учитывалось, что размер кисти у разных людей неодинаков и зависит от возраста, пола и от прочих параметров. На основе проведенных опытов была выведена «средняя» форма кисти человека. Для лучшего контакта пальцев с датчиками поверхность основания залита компаундом в форме руки. От данной конструкции выведен шнур, позволяющий подключать устройство считывания и вывода информации в компьютер или портативный автономный прибор с дисплеем.

$$R = \frac{t_3 - t_1}{\frac{\lambda_1}{L1}(t_2 - t_1) + \frac{\lambda_2}{L2}(t_3 - t_4) + \frac{1}{\frac{1}{C_{крс}} + \frac{1}{C_{кожи}} + \frac{1}{C_{шт}}} \left( \left( \frac{t_4}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_2}{100} \right)^4 \right) + \frac{\lambda_{кп}}{L3}(t_3 - t_4)} \quad (11)$$

где  $t_2 = f(t_3, S, z, P)$  в данной формуле  $S$  — это площадь соприкосновения кожного покрова с корпусом датчика, а  $P$  — сила давления с которой датчик прижат к кожному покрову.

### Закключение

Из всего вышесказанного можно сделать следующий вывод — предположить, что функция зависимости температуры восстановления от времени зависит от следующих факторов:

- 1) Силы прижима датчика к коже.
- 2) Площади соприкосновения корпуса датчика и кожного покрова.
- 3) По формуле (6) часть теплового потока от кожного покрова будет уходить методом конвекции.
- 4) Толщины слоев  $L1, L2, L3$  [м]; ( $L1$  — толщина корпуса датчика,  $L2$  — толщина границы между датчиком и кожным покровом,  $L3$  — толщина кожного покрова.

5) Коэффициентов теплопроводности материалов слоев  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , [Вт / м К], ( $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности материала датчика,  $\lambda_2$  — коэффициент теплопроводности среды между материалом датчика и кожным покровом,  $\lambda_3$  — коэффициент теплопроводности кожного покрова.

Как видно из графика, чем больше сила нажима датчика на кожный покров, тем быстрее происходит восстановление температуры кожного покрова, что вносит погрешность в определение температуры. За счет увеличения силы нажима происходит сдавливание верхнего слоя кожного покрова и увеличивается приток крови, а с ним происходит и увеличение температуры. А это в свою очередь приводит к тому, что

восстановление температуры кожного покрова происходит не в естественных условиях, а в условиях, ко-

гда кожа сдавлена и возникает ответная реакция организма на сдавливание тканей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева-Галанина Е.Ц., Дрогичина Э.А., Артамонова В.Г., Вибрационная болезнь, — Л.: 1961;
2. Руководство по профессиональным заболеваниям, под ред. Н.Ф.Измерова, т. 2, — М.: 1983.
3. Левин А.И. и Артамонова В.Г. Лечение профессиональных заболеваний, — М.: 1984;
4. Андреева - Галанина Е.Ц., Артамонова В.Г. Экспертиза трудоспособности при вибрационной болезни. — Л.: Медицина, 1983.
5. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение: Пер. с нем. — М.: Мир, 1989.
6. Бриндли К. Измерительные преобразователи./ Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Рашмер Р. Динамика сердечно-сосудистой системы. Москва.«Медицина». 1981г. С. 191—195.
8. Суворов Г.А., Шкарин А.Н., Денисов Э.И. «Гигиенические нормы производственных шумов и вибраций», 1984 г. Москва
9. Суворов Г.А., Прокопин А.В., «Вибрация и защита от нее», — М.: Ред.Журнала «Охрана труда», 2001 г.
10. Артамонова В.Г., Шатилов Н.Н. «Профессиональные болезни», 2-е издание, М.Медицина, 1988.
11. Минх А.А. Методы гигиенических исследований, М., 1971, с.35-42, 51-64.
12. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая теория неравновесных систем. — М.: Изд.-во МГУ, 1987, 559 с.
13. Вычислительная теплопередача. Самарский А.А., Вабишевич П.Н. 2003. Твердый переплет. 784 с.
14. Теплопроводность твердых тел. Карслоу Г., Егер Д. — М.: Наука, 1964.
15. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. Варгафтик В.П. и др. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
16. Справочник по теплопередаче. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. — М.: Энергоиздат, 1958. **ГЛАС**

#### Коротко об авторе

Скоробогатов А.В. – аспирант 2-го года обучения кафедры ЭИС, Московский государственный горный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 23 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. С.З. Шкундин.

