

## Време за отклик на термометъра<sup>1</sup>

В. Томсен

Времето за отклик на един измервателен уред често се пренебрегва, защото обикновено е много малко спрямо характерните времена, за които стават промените в изследваната система. В някои случаи обаче това не е добро предположение. Основният термодинамичен измервателен уред, термометърът, представлява в това отношение интересен пример. Неговото време за отклик не само че може да бъде съществено, но, за разлика от други измервателни уреди, това време силно зависи от природата и състоянието на системата (флуид), над която се провежда измерването.

Времето за отклик на един термометър се определя от Нютоновия закон за охлаждане, закон, който продължава да интересува общността, преподаваща природните науки. Следващото обсъждане може да осигури разбиране за важността на характеристиките на измервателния уред в процеса на експеримента. То също така дава едно интересно приложение на първия принцип на термодинамиката и на закона на Нютон.

### Време за отклик

Да разгледаме най-обикновената ситуация, при която едно твърдо тяло с начална температура  $T_0$  е потопено във флуид с температура  $T_f$ . Предаването на количество топлина протича *преди всичко* чрез конвекция и може да се приложи законът на Нютон  $Q = hS(T_f - T)$ , където  $S$  е площта на твърдото тяло, а  $h$  – коефициентът на топлопроводност.

Прилагайки първия принцип на термодинамиката, често цитиран като “придадената топлина = приетата топлина”, можем да приравним придаденото за интервал време  $dt$  чрез конвекция количество топлина от флуида и количеството топлина, приета от твърдото тяло:

$$(1) \quad hS(T_f - T)dt = mCdT,$$

където  $m$  и  $C$  са масата и специфичният топлинен капацитет на твърдото тяло.

Като означим с  $\tau$  константата:

$$(2) \quad \tau = \frac{mC}{hS},$$

която има размерност на време, уравнението (1) придобива вида:

$$(1a) \quad \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\tau}(T_f - T).$$

Решението на това обикновено линейно диференциално уравнение от първи ред се намира чрез разделяне на променливите и при начално условие  $T = T_0$  е:

$$(3) \quad T = T_f - (T_f - T_0)e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Оттук се вижда, че  $\tau$  играе роля на “времеконстанта” на уреда и представлява мярка за времето на неговия отклик.

<sup>1</sup> Учебното съдържание по физика често страда от недостатъка, че е твърде отдалечено от проблемите, с които човек се среща всекидневно. Така например процесите на топлопредаване се споменават съвсем елементарно, на качествено равнище само в човекът и природата в 6. клас и никъде в общозадължителната подготовка в по-горните класове. Предлагам превод на една статия от *The Physics Teacher* (9, 1998), в която се разглежда съществен практически въпрос. Въпреки че разглежданията надхвърлят рамките на общозадължителния минимум, на тяхна основа с малки модификации (напр. чрез замяна на функцията  $e^x$  с  $10^x$  и др.п.) по-инициативните читатели лесно биха разработили интересно лабораторно упражнение с изследователски характер за определяне термичното съпротивление на тяло или на коефициента на топлопроводност на вещество. (Бел. моя)

За конвективния топлопренос величината  $\frac{1}{hS}$  играе роля на “термично съпротивление”  $R_t$ . По аналогичен начин величината  $mC$  представлява “топлинен капацитет”  $C_t$  на термометъра. По такъв начин от (2) времеконстантата на уреда може да се представи във вида:

$$(4) \quad \tau = R_t C_t,$$

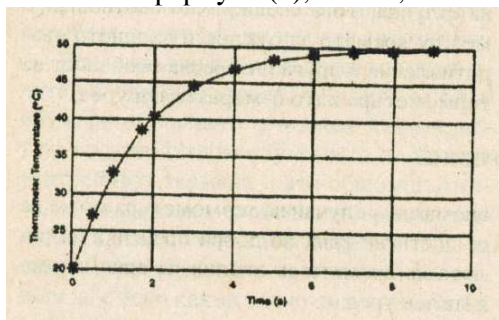
който е по-известен от изучаването на електричните вериги ( $\tau = RC$ ). В една електрическа верига, в която кондензатор се зарежда или разрежда през резистор, времеконстантата е равна на времето за достигане на 67% от крайния заряд. Времето за окончателно зареждане или разреждане се приема обикновено за  $5\tau$ .

### Термометърът

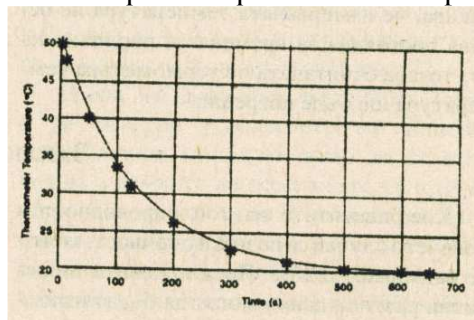
Твърдото тяло в по-горните разглеждания е живакът в стъклената тръбичка на термометъра, който е потопен във флуид. Показанието  $T$  на термометъра представлява температурата на живака, която ще бъде равна на  $T_f$  само при условие на температурно равновесие.

Цилиндричното резервоарче на един типичен лабораторен термометър има диаметър около 3 mm и е дълго 12 mm. Това означава, че площта му е  $1,27 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , а обемът му –  $8,48 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$ . Плътността на живака е  $1,335 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$ , така че масата на живака е около  $1,15 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ . Специфичният топлинен капацитет на живака (при 25 °C) е  $139,4 \text{ J/(kg.K)}$ .

Нека термометър с начална температура 20 °C е потопен във вода, чиято температура се поддържа 50 °C. Коефициентът на топлопроводност за *неподвижна* вода е приблизително  $750 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$ . Времеконстантата на този термометър, пресметната по формула (2), е  $\tau = 1,7 \text{ s}$ . Откликът на термометъра е показан на фиг. 1.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Да разгледаме сега противоположния сценарий, при който същият термометър в началото е в равновесие с 50-градусова водна баня и след това се извади във въздуха, чиято температура е 20 °C. Коефициентът на топлопроводност за неподвижен въздух е от порядъка на  $10 \text{ W/(m}^2.\text{K)}$ . В този случай времеконстантата е около 125 s. Откликът на термометъра в този случай е показан на фиг. 2.

### Обсъждане

Интересно и поучително е да се отбележи, че времето за отклик на термометъра зависи съществено от средата, в която се прави измерването. Докато масата  $m$ , топлинният капацитет  $C$  и площта  $S$  са постоянни за всеки отделен термометър, коефициентът на топлопроводност не е.

Този факт поставя термометрите в едно твърде уникално положение сред измервателните уреди. Времето за отклик на всички други измервателни уреди зависи само от самите тях.

Ако експерименталната постановка е такава, че измерваната температура *не* остава постоянна за времена от порядъка на  $5\tau$ , тогава отчитаната по термометъра температура ще бъде погрешна.

За електричните измервателни уреди например влиянието им върху системата, над която се прави измерване, се определя от входното съпротивление (импеданса) на уреда. За точно измерване на напрежения се използват волтметри с високо входно съпротивление. Обратно, за да отчита с минимална грешка термометърът трябва да има малко термично съпротивление, определяне от коефициента на топлопроводност на флуида. Това специфично съотношение между времето за отклик и входното съпротивление е друга интересна особеност на термометъра като измервателен уред.

### **Заклучение**

Коефициентите на топлопроводност в повечето случаи са познати с точност, която не надминава  $\pm 25\%$ . Предложените теоретични разглеждания могат да бъдат използвани за разработване на лабораторни упражнения за опитно определяне на тези коефициенти. Чрез разглеждане на по-скоро аномалния случай на термометъра може да се постигне една по-добра преценка за ролята на времето за отклик на един измервателен уред.