

УДК 536.53, 536.63

**Д. А. Плахутина,**факультет математики, информатики, физики и технологии,  
Омский государственный педагогический университет  
Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доц. В. В. Дмитриев

## Определение времени тепловой инерции цифровых термометров с использованием видеосъемки

**Аннотация.** Описана экспериментальная установка по исследованию переходных термодинамических процессов и определению характерных времен реакции термометра на скачкообразное изменение температуры. Приведены результаты экспериментального и теоретического исследования двух цифровых термометров: ТП101 и ТМ902С, для которых определено характерное время тепловой инерции. В качестве количественной модели переходного процесса предложен цифровой фильтр Баттерворта.

**Ключевые слова:** термометрия, теплоемкость, теплопередача.

**П**ри решении разнообразных экспериментальных физических задач актуален контроль температуры изучаемого объекта или среды, для чего используются термометры различного типа [1]. Одной из причин возникновения погрешности в натурном эксперименте является переменность температуры объекта с течением времени. Тогда надо знать время реакции термометра на изменение температуры, т. е. изучать переходные термодинамические процессы и определять характерное время перехода от одной температуры к другой.

В настоящее время массовым становится использование цифровых термометров. К сожалению, в паспортных данных интересующие нас временные параметры не приводятся. Теоретический расчет также затруднителен: необходимо учитывать инерцию рабочего тела, время преобразования и обсчета сигнала в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), микропроцессоре и т. д. Тогда самый простой метод определения интересующих нас параметров — их экспериментальное оценивание. Следует учесть продолжительность исследуемых переходных процессов, по предварительной экспериментальной оценке ~10 с. Для репрезентативной выборки необходимы 20–30 «экспериментальных» точек, следовательно, измерения должны выполняться не реже 2–3 раз в секунду.

Учитывая сказанное, было принято решение использовать видеосъемку изменяющихся показаний на индикаторах термометров. Затем, при покадровом просмотре, можно получать экспериментальные данные с временным разрешением минимум 30 точек в секунду, что заведомо удовлетворяет требованиям решаемой задачи.

Экспериментальная установка включала в себя два термостата с горячей и холодной водой. Объем и теплоизолирующие свойства термостатов были таковы, что за время проведения измерений (до 60 с) их температуры можно было считать постоянными. Переходный термодинамический процесс реализовывался путем быстрого переноса термометров из одного термостата в другой, т. е. перепад температуры измеряемой среды можно было считать практически мгновенным.

Экспериментальному исследованию были подвергнуты три термометра: два цифровых (ТП101 и ТМ902С) и один ртутный. Паспортные параметры цифровых термометров приведены на сайтах фирм производителей [2; 3]. У термометра ТР101 фирменная маркировка изменена на ТР3001. Ртутный термометр выполнял роль контрольного прибора. Непосредственным результатом эксперимента стали зависимости  $T(t)$ : показания термометров —  $T$  от времени —  $t$ .

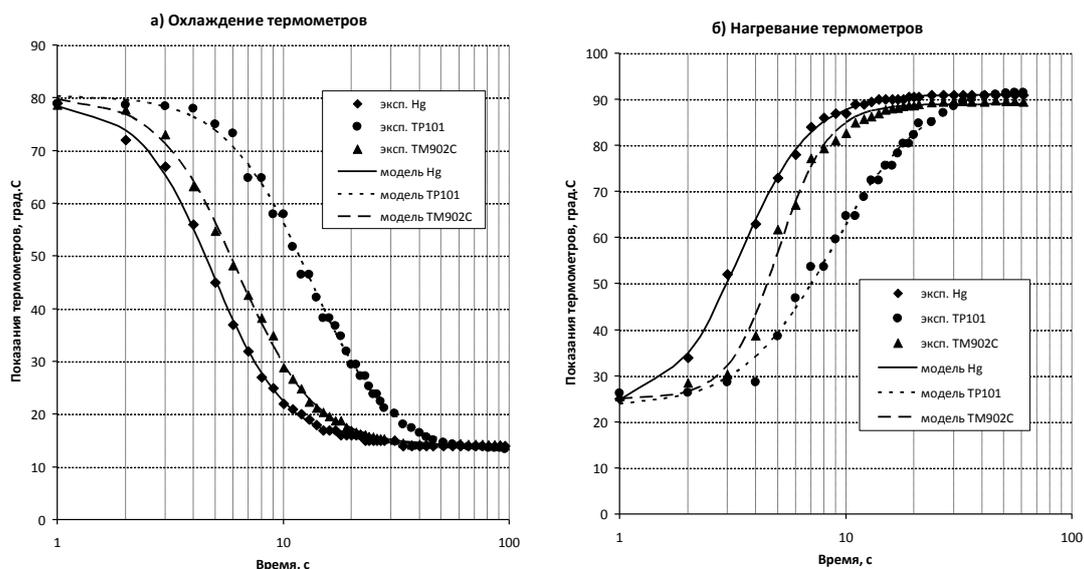
Зависимости моделировались цифровым фильтром Баттерворта [4]. Случай охлаждения термометра соответствует низкочастотному фильтру Баттерворта, случай нагревания соответствует высокочастотному фильтру:

$$T_{НЧ}(t) = A + \frac{B}{\left(1 + \left(\frac{t}{C}\right)^D\right)}, \quad T_{ВЧ}(t) = A + B \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{t}{C}\right)^D\right)}\right].$$

Здесь  $T(t)$  — зависимость температуры от времени, параметры  $A$  и  $B$  — начальная и конечная температуры теплового перехода, параметр  $D$  —

### Параметры теоретических моделей термометров

Параметры перехода с охлаждением (НЧ)	Параметры перехода с охлаждением (НЧ)			Параметры перехода с нагревом (ВЧ)	Параметры перехода с нагревом (ВЧ)		
	Hg	TP101	TM902C		Hg	TP101	TM902C
A	14,13	12,62	13,90	A	22,66	23,08	24,98
B	65,25	67,83	66,49	B	68,42	69,84	63,91
C	4,87	12,76	6,25	C	3,44	8,79	5,04
D	2,68	2,38	2,52	D	2,80	2,12	3,98



Изменение с течением времени показаний ртутного (Hg) и двух цифровых термометров (TP101 и TM902C). Маркерами показаны результаты эксперимента, линии соответствуют теоретическим (модельным) расчетам

скорость перехода,  $C$  — промежуток времени от начала теплового перехода до точки перегиба. Индексы означают фильтр низкой частоты (НЧ) и высокой частоты (ВЧ) соответственно. Параметр  $C$  имеет очевидный физический смысл — промежуток времени, за который совершается половина теплового перехода от начальной температуры к конечной. Этот параметр имеет смысл принять за характерное время тепловой инерции. Связь параметра  $C$  и стандартной постоянной времени  $\tau$  может быть записана с использованием элементарных математических соображений:  $C = \tau \cdot \ln(2)$ .

Для нахождения численных значений параметров моделей использовался метод оптимизации — алгоритм Ньютона. Параметры теоретических моделей приведены в таблице. Индексы

TP101 и TM902C обозначают модели исследуемых цифровых термометров. Индексом Hg обозначены результаты для контрольного ртутного термометра. На рисунке приведено сравнение эксперимента с модельными зависимостями.

Констатируем следующие результаты исследования. Во-первых, предложенная и реализованная экспериментальная установка и схема проведения эксперимента отвечают поставленным требованиям, т. е. с их помощью можно исследовать переходные термодинамические процессы. Во-вторых, из исследованных цифровых термометров более быстродействующим является термометр типа TM902C, поскольку его характерное время срабатывания в 1,5–2 раза короче.

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб. : Питер, 2003. — 608 с.

2. Сивухин Д. В. Общий курс физики : учеб. пособие для вузов : в 5 т. Т. 2 : Термодинамика и молекулярная физика. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. — 544 с.

3. TM-902C Цифровой термометр с датчиком // S-Line : офиц. сайт. 2023. — URL: <https://www.s-line.ru/catalog/Izmeritelifizicheskikhvelichin/779/> (дата обращения: 15.03.2023).

4. Электронный термометр TP3001 // Группа компаний «Теплоприбор» : офиц. сайт. 2023. — URL: <http://теплоприбор.рф/catalog/tr3001-karmannyj-termometr-tp3001> (дата обращения: 15.03.2023).