

УДК 621.317

**В. А. Куликов**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**В. Н. Сяктерев**, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ

*Рассматривается информационно-измерительная система, предназначенная для измерения коэффициента теплопроводности биологической ткани человека при проведении судебно-медицинской экспертизы давности наступления смерти.*

**Ключевые слова:** давность наступления смерти, биологическая ткань, система измерения теплопроводности.

**В** настоящее время при оценке давности наступления смерти (ДНС) человека в области малых времен (до суток) используется метод, основанный на исследовании динамики помертвой температуры тела. Наиболее точные оценки достигаются с применением моделей посмертного остывания тела, учитывающих теплофизические параметры внутренних тканей тела и их изменения во времени после смерти. Предложена специализированная информационно-измерительная система, позволяющая проводить измерения коэффициента теплопроводности биологической ткани на образцах, изымаемых при проведении патолого-анатомических исследований в судебном морге.

Для определения теплопроводности реализован метод плоского слоя с вертикальным распространением тепла в направлении сверху вниз [1]. Схема установки изображена на рис. 1.

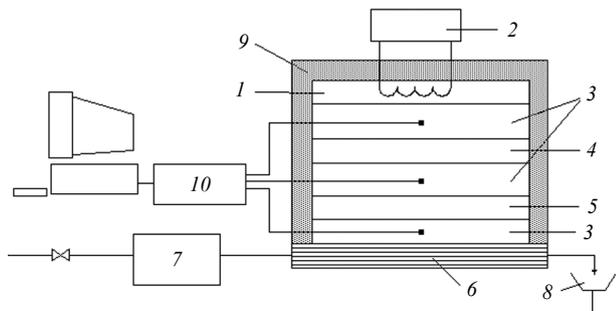


Рис. 1. Установка для измерения теплопроводности: 1 – нагревательный элемент; 2 – источник питания; 3 – термостатирующие пластины; 4 – датчик теплового потока; 5 – исследуемый образец; 6 – холодильник; 7 – жидкостный термостат; 8 – слив; 9 – теплоизолирующий экран; 10 – многоканальный термометр

Тепловая часть включает пакет цилиндрических деталей [2].

В качестве нагревательного элемента используется спираль из константановой проволоки, подключенная к источнику регулируемого стабилизированного напряжения. Термостатирующие пластины и холодильник представляют собой диски из дюралюминия диаметром 100 мм с теплопроводностью  $\lambda_{\text{дюр}} = 100 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . Толщина пластины между нагре-

вателем и датчиком составляет 10 мм, между датчиком и образцом (верхняя термостатирующая пластина образца) – 8 мм, общая толщина нижней термостатирующей пластины и холодильника, которые выполнены как единое целое, – 16 мм. Охлаждение осуществляется жидкостью, которая термостатируется жидкостным термостатом и протекает по каналам холодильника шириной 10 мм и глубиной 6 мм.

Образец располагается между верхней и нижней термостатирующими пластинами (рис. 2). Истекание жидкости из образца предотвращается тонкостенным охранным кольцом из оргстекла, которое входит в пазы термостатирующих пластин и герметизируется в нижнем пазу герметиком. Измерение толщины образца производится путем измерения толщины всего пакета пластин установки в трех точках по окружности, затем толщина конструктивов вычитается и результат усредняется.

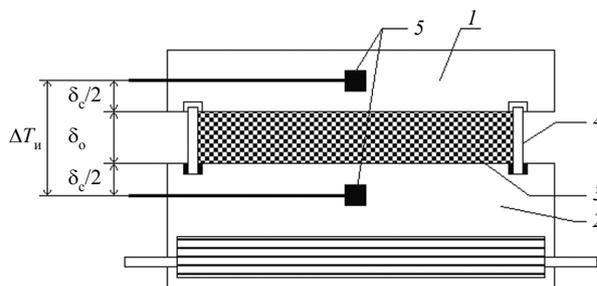


Рис. 2. Измерительная часть установки: 1, 2 – верхняя и нижняя термостатирующие пластины; 3 – образец; 4 – охранный кольцо; 5 – датчики температуры

Датчик теплового потока выполнен из стеклотекстолита толщиной  $\delta_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$ . Градуировка датчика производилась на воде [3].

Измерение температуры в установке производится многоканальным термометром высокого разрешения, сопряженным с компьютером.

Управляющая программа компьютера при запуске позволяет устанавливать период измерений температуры. Основная погрешность термометра составляет  $\pm 0,1 \text{ К}$ . Таким образом, благодаря применению компьютера процесс измерения теплопровод-

ности производится в автоматическом режиме. При этом существует возможность производить длительные (суточные и более) наблюдения за изменениями этого параметра.

Для определения формулы, по которой производится расчет теплопроводности образца, запишем выражение для удельного по площади термического сопротивления измерительной части установки (рис. 2):

$$R_{т.и} = \frac{\delta_{т.п}}{\lambda_{т.п}} + \frac{\delta_o}{\lambda_o}, \quad (1)$$

где  $\delta_{т.п}$ ,  $\delta_o$  – толщина термостатирующих пластин в измерительной схеме и толщина образца соответственно;  $\lambda_o$  – теплопроводность образца.

Перепад температуры на измерительной части установки можно выразить в виде

$$\Delta T_{т.и} = qR_{т.и}, \quad (2)$$

где  $q$  – плотность измерительного теплового потока.

Для плотности теплового потока датчика справедливо выражение

$$q = K_d \Delta T_d, \quad (3)$$

где  $K_d$  – градуировочный коэффициент датчика, значение которого 268 Вт/(мм · м · К) определено при градуировке установки;  $\Delta T_d$  – перепад температуры на датчике.

После подстановки выражений (2) и (3) в (1) для теплопроводности исследуемого образца находим:

$$\lambda_o = \delta_o \left( \frac{\Delta T_{т.и}}{K_d \Delta T_d} - \frac{\delta_{т.п}}{\lambda_{т.п}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

В реальных случаях при исследовании биоткани органов человека оказалось, что второе слагаемое в скобках выражения (4) значительно меньше (на два с половиной порядка) первого слагаемого и может не учитываться. Поэтому последнее выражение может быть упрощено и с учетом значения градуировочного коэффициента  $K_d$  записано в окончательном виде:

$$\lambda_o = 268 \delta_o \frac{\Delta T_d}{\Delta T_{т.и}}. \quad (5)$$

При измерении толщины исследуемого образца в миллиметрах результат имеет размерность Вт/м · К.

Исследования инструментальной погрешности установки показали, что суммарная погрешность, обусловленная погрешностью измерений толщины образца и температуры термостатирующих пластин, не превышает 4 %, а погрешность бокового оттока тепла – 0,5 %. На составных (измельченных) образцах появляется дополнительная погрешность, обусловленная степенью сжатия образца, которая может достигать 4 %.

Результаты измерений теплопроводности тканей тела приведены в таблице. Данные соответствуют

ДНС от 10 до 20 часов. Во всех случаях объекты исследований в предыстории не находились продолжительное время при отрицательных температурах, т. е. ткани исследуемых органов не пребывали в замороженном состоянии. Образцы были взяты от органов, не отличающихся значительными патологическими изменениями. Образцы использовались для измерения теплофизических параметров сразу же после изъятия из тела при анатомических исследованиях. Исследованию подвергались органы, расположенные в диагностическом сечении, соответствующем середине грудной клетки. По каждому из органов проведено не менее десяти исследований с образцами от разных объектов.

**Значения теплопроводности биоткани человека в посмертном периоде**

Тип ткани	Теплопроводность		
	$t_{ср}$ , °C	$\lambda$ , Вт/м·К	СКО, Вт/м·К
Печень	14,7	0,498	0,051
Почка	16,3	0,55	0,02
Жир	17,9	0,214	0,019
Мышца	18,6	0,46	0,03
Селезенка	15,8	0,577	0,024
Кость	–	–	–

Как следует из табл. 1, по теплопроводности существенно отличается от других жировая ткань. Теплопроводность жировой ткани примерно в два с половиной раза меньше соответствующих параметров других тканей. Другие органы имеют близкую теплофизику, поэтому, как показывают расчеты, не вносят существенных локальных искажений в температурное поле тела.

Исследовалась зависимость теплопроводности биоткани от температуры (рис. 3). В опытах использовалась ткань печени, которая занимает значительную часть (примерно половину) площади диагностического сечения тела и более других пригодна для изготовления (нарезки) плоских тонких образцов.

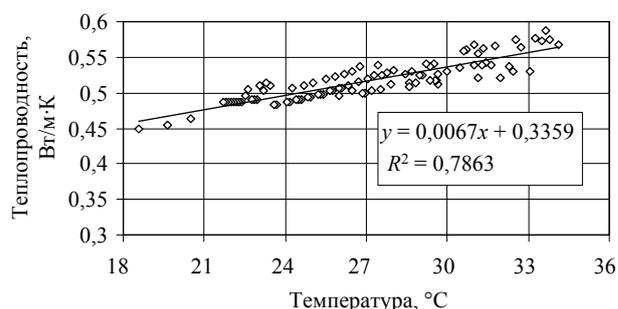


Рис. 3. Температурная зависимость теплопроводности ткани печени

Как видно из рисунка, по мере остывания объекта теплопроводность ткани печени падает, что необходимо учитывать при проведении расчетов ДНС.

Проводились также исследования влияния старения биоткани на значение теплопроводности. Для печени при двухсуточном непрерывном исследова-

нии обнаружено снижение теплопроводности примерно на 0,25 % в час.

Таким образом, впервые разработана специализированная ИИС для исследования теплопроводности биологических тканей человека в посмертном периоде и получены значения коэффициента теплопроводности внутренних органов, расположенных в зоне тела, которая является диагностической при оценке ДНС тепловым методом.

#### Библиографические ссылки

1. Практикум по теплопередаче : учеб. пособие для вузов / А. П. Солодов [и др.] ; под ред. А. П. Солодова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
2. Установка для измерения теплопроводности тканей биологических объектов / А. В. Благодатских [и др.] // Тез. докл. кафедры «Вычислительная техника» (Ижевск, 2–6 апр. 1996 г.). – Ижевск : Экспертиза, 1996. – С. 37.
3. Методика измерения теплофизических параметров тканей биологических объектов / А. В. Благодатских [и др.] // Тез. докл. кафедры «Вычислительная техника» (Ижевск, 2–6 апр. 1996 г.). – Ижевск : Экспертиза, 1996. – С. 36.

---

*V. A. Kulikov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

*V. N. Syakterev*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### System of Biological Tissue Thermal Conductivity Measuring

*The paper considers the information-measuring system designed to measure the human's biological tissue thermal conductivity when carrying out a forensic medical examination of death coming prescription.*

**Key words:** death coming prescription, biological tissue, system of thermal conductivity measuring.