

УДК 621.43.016.4(031)

DOI: 10.22213/2410-9304-2019-2-37-42

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ОСТЫВАНИЯ ИНЕРЦИОННОГО ОБЪЕКТА  
С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ MICRO-CAP\*

*В. А. Куликов*, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия  
*А. Ю. Вавилов*, доктор медицинских наук, профессор,  
Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России, Ижевск, Россия  
*В. Н. Сяктерев*, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия  
*В. В. Сяктерева*, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*В статье рассматривается оценка времени остывания инерционного объекта в постановке, относящейся к судебной медицине. Предложена электротепловая модель шара, который, в свою очередь, моделирует биологический объект в посмертном периоде. Приводится методика оптимизации электротепловой модели и методика оценки времени остывания шара. Для этого применяется компьютерная программа Micro-Cap, а моделью шара является электрическая схема, составленная из сопротивлений и конденсаторов, которая называется электротепловой моделью. Адекватность электротепловой модели показана путем сравнения результатов моделирования переходных процессов в схеме с точным аналитическим решением, опубликованным в литературе. Показано, что необходимая степень адекватности модели достигается при использовании при оптимизации элемента, моделирующего граничные условия третьего рода, двух экспериментальных точек на температурном тренде объекта исследования.*

*Проведены исследования влияния разрешающей способности термометра, применяемого при проведении судебно-медицинской экспертизы, на эффективность оптимизации, выполняемой программой Micro-Cap. Показано, что разрешающая способность при термометровании не должна быть хуже 0,01 К. При этом предполагается, что предложенный метод проведения экспертизы объекта с применением электротепловой модели и компьютерной программы Micro-Cap будет эффективен на протяжении первых суток после начала его остывания.*

**Ключевые слова:** инерционный объект, время остывания объекта, электротепловая модель, разрешающая способность термометра.

### Введение

В машиностроении, криминалистике, судебной медицине и других отраслях встречаются задачи определения времени остывания инерционных объектов по результатам измерений температуры и ее изменения во времени. Например, в криминалистике по времени остывания двигателя внутреннего сгорания автомобиля или другого транспортного средства возможно определять момент начала его остывания после аварии на дороге и таким образом время произошедшей аварии. В судебной медицине по динамике посмертной температуры определяют момент начала остывания тела человека, который интерпретируют как момент наступления смерти [1, 2]. Для решения последней задачи рассмотрен метод расчета времени остывания объекта судебно-медицинской экспертизы, основанный на применении метода электротепловой аналогии [3, 4] и программы схемотехнического моделирования Micro-Cap [5, 6].

В качестве диагностической зоны тела рассматривается геометрический центр головы. При этом голова представлена в виде шара, и предполагается, что остывает независимо от тела (доказано ранее [7]), т. е. тепловой процесс в диагностической зоне характеризуется своими показателями в сравнении с процессами в теле.

В программе Micro-Cap построена электротепловая модель шара с использованием теплофизических параметров, определенных для биологических тканей головы. Эталонный тренд температуры сформирован с использованием точного аналитического решения для температуры остывания шара с граничными условиями третьего рода [8] и использован для оценки адекватности электротепловой модели. Программа Micro-Cap производит оптимизацию модели путем коррекции параметра, определяющего значения граничных условий. Для оптимизации используется фрагмент температурного тренда, экспериментально определенный в процессе проведения судебно-медицинской экспертизы.

### Электротепловая модель шара

Модель шара, имеющего две оси симметрии, может быть представлена однокоординатной электротепловой схемой в виде цепочки резистивных и емкостных элементов, моделирующих теплофизические свойства (термические сопротивления и теплоемкости) вложенных друг в друга полых шаровых областей. Для расчета элементов модели использованы теплофизические параметры биологических тканей головы, полученные экспериментально. Взяты осредненные значения параметров: теплопро-

водность  $\lambda = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; удельная теплоемкость

$C_{\text{уд}} = 3,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ; плотность  $\rho = 1060 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ . Предпо-

лагается, что шар остывает при постоянной температуре среды в условиях естественной конвекции, то есть в модели могут быть заданы граничные условия третьего рода с коэффициентом теплоотдачи на поверхности, например,

на уровне  $\alpha = 5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ .

Расчет элементов электротепловой модели производился по формулам:

для термических сопротивлений

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right), \quad (1)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – внутренний и внешний диаметры вложенных шаровых областей; для теплоемкостей

$$C = C_{\text{уд}} \rho \frac{4}{3} \pi \left[ \left( \frac{d_2}{2} \right)^3 - \left( \frac{d_1}{2} \right)^3 \right]; \quad (2)$$

для термического сопротивления в схеме, реализующей граничные условия третьего рода:

$$R_{\text{тр}} = \frac{1}{\alpha 4\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $d$  – наружный диаметр шара, который может быть определен по окружности головы в лобно-затылочной части. Далее при моделировании использовано значение  $d = 0,18$  м.

На рис. 1 представлена электротепловая модель шара, элементы которой рассчитаны по формулам (1)–(3) и представлены в обозначениях, принятых в программе Micro-Cap.

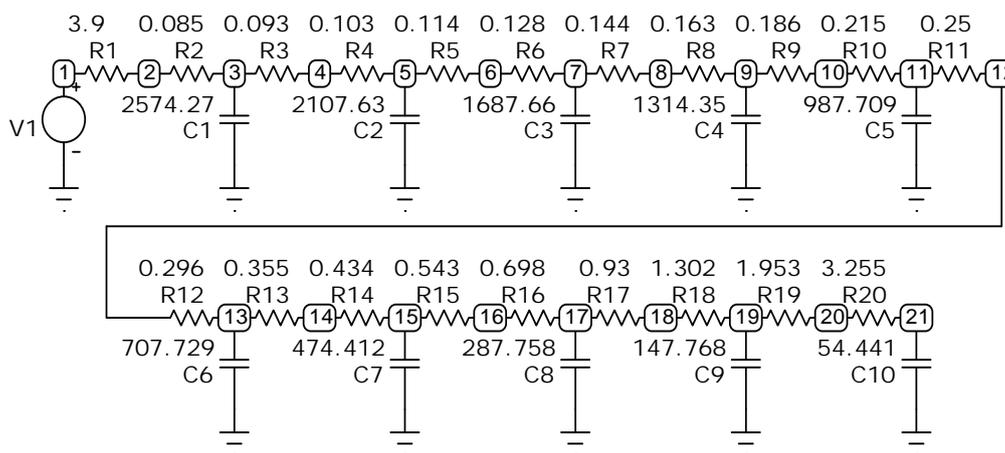


Рис. 1. Электротепловая модель шара

Здесь каждый шаровый объем представлен двумя термическими сопротивлениями и теплоемкостью, которым соответствуют два резистора и конденсатор. Параметры резисторов и конденсаторов численно (в системе СИ) совпадают с параметрами термических сопротивлений и теплоемкостей, на чем основан метод электротепловой аналогии. В схеме на рис. 1 значения сопротивлений представлены в омах, а емкостей – в фарадах. Таким образом, в модели использовано 10 вложенных шаровых областей. Точка 21 соответствует центральной шаровой области. Далее ее будем считать центром шара.

Резистор  $R_1$  вместе с импульсным источником напряжения  $V_1$  имитируют граничные условия. При этом напряжение источника в исходном состоянии задано равным  $37,5$  °С и далее

скачкообразно уменьшается до  $20$  °С, что создает условия остывания шара от  $37,5$  до  $20$  °С.

Для проверки адекватности модели производилось сравнение получаемого в Micro-Cap температурного тренда в первые сутки остывания шара с трендом, рассчитанным с использованием точного аналитического решения тепловой задачи, которое представлено экспоненциальным рядом [8]. Е. А. Коноваловым [9] показано, что в подобных условиях теплообмена шара достаточно ограничиться 20 членами ряда. При этом погрешность формирования эталонного тренда по шкале температур не будет превышать  $0,001$  К.

На рис. 2 представлена погрешность моделирования в Micro-Cap температурного тренда шара в его центре с использованием электротепловой модели в сравнении с точным аналитическим решением.

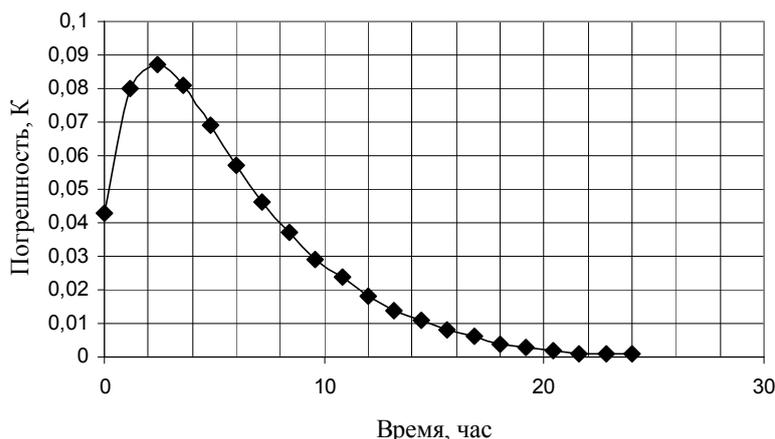


Рис. 2. Погрешность моделирования температурного тренда шара в Micro-Cap

Полагаем, что электротепловая модель адекватна объекту моделирования и может использоваться для дальнейших исследований.

#### Оценка времени остывания шара с использованием электротепловой модели и программы Micro-Cap

Первоначально в режиме анализа переходных процессов **Transient** программы Micro-Cap для модели на рис. 1 был получен температурный суточный тренд в точке 21, из которого были взяты две точки с температурами 25,706 и

25,555 °С, соответствующие моментам времени с начала остывания шара 55,2 и 55,4 кс. Предполагалось, что это экспериментально полученные на объекте экспертизы точки, снятые через временной интервал 1,2 кс (20 минут).

Далее был запущен модуль оптимизации **Optimize** программы Micro-Cap, в окне которого (рис. 3) был указан оптимизируемый параметр схемы модели  $R_1$ , значение которого соответствует коэффициенту теплоотдачи  $\alpha$  шара.

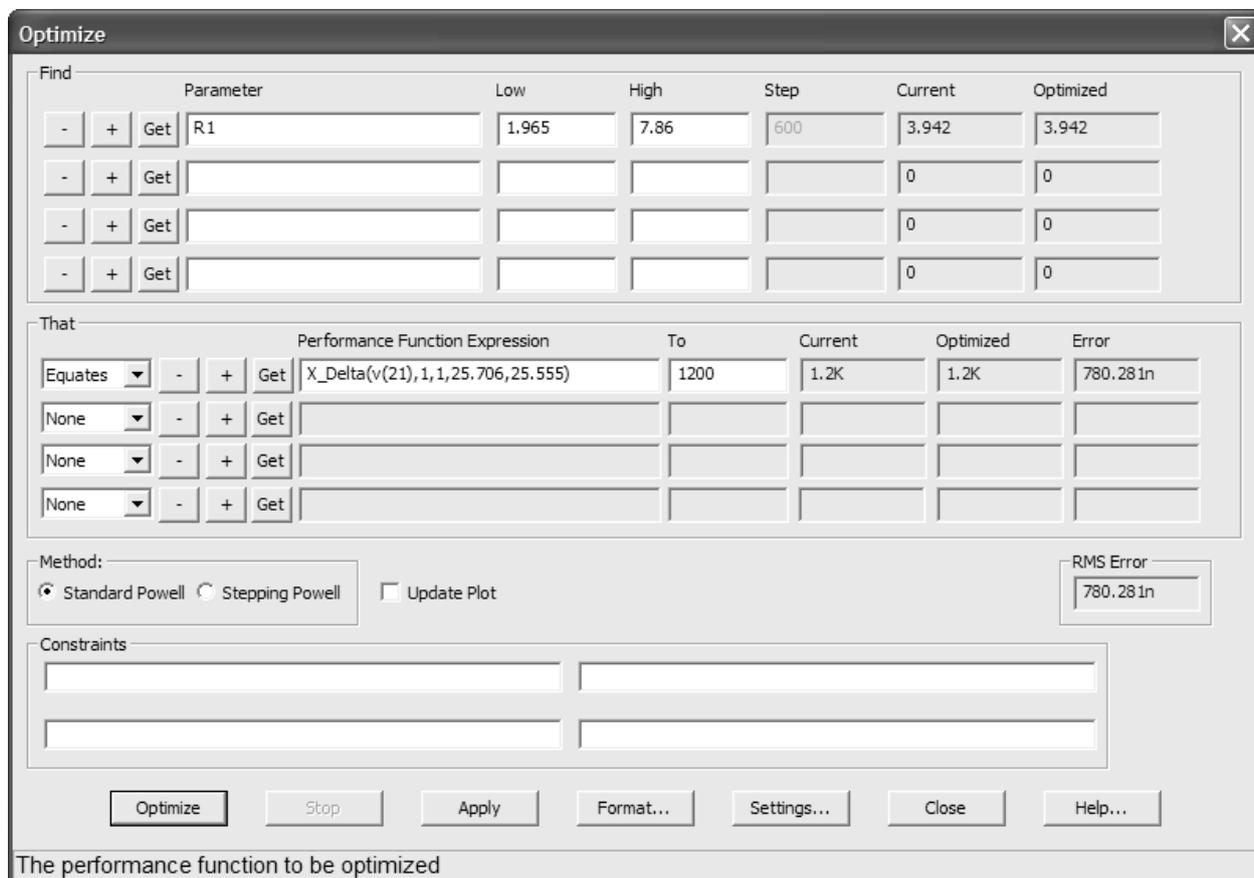


Рис. 3. Окно оптимизатора программы Micro-Cap

Также был указан критерий оптимизации  $X\_Delta$  – совпадение временного интервала между точками измерений температуры при моделировании и в эксперименте (1,2 кс). Оптимизация уточнила значение  $R_1$  до уровня 3,942 Ом.

Это значение далее было использовано в электротепловой модели, и был получен новый

температурный тренд в точке 21. По тренду по значению температуры 25,706 °С было определено время с начала остывания шара 55,338 кс (рис. 4). Сравнение параметра с исходным (55,2 кс) показывает, что после оптимизации погрешность времени остывания тела на момент измерения его температуры составляет 0,138 кс (менее трех минут).

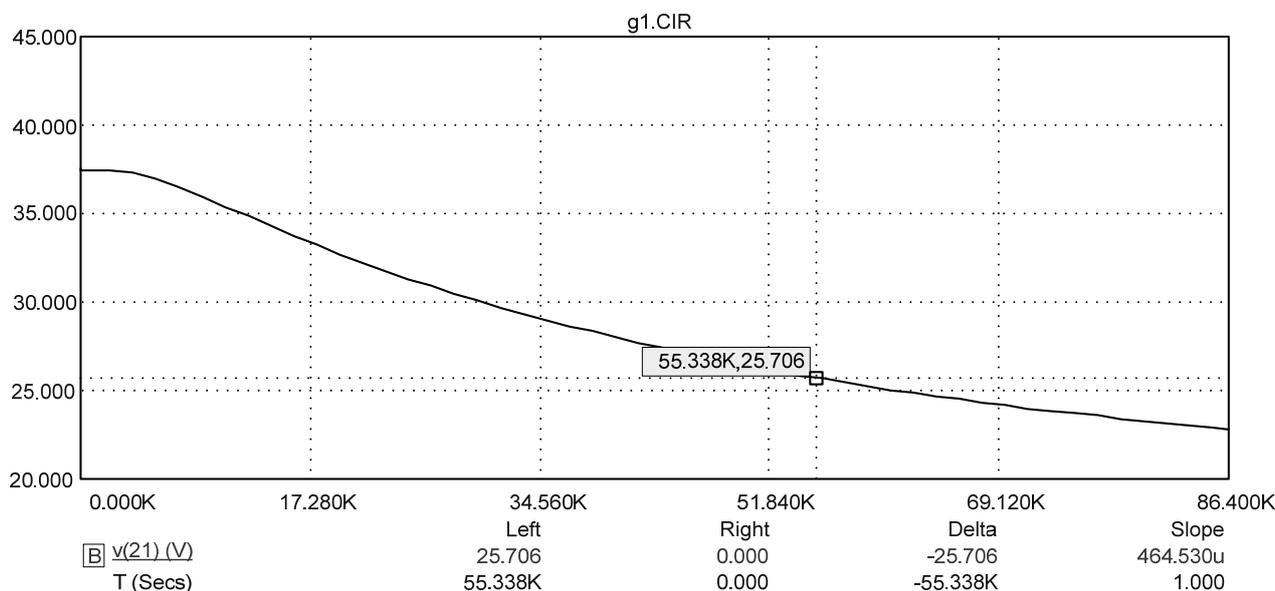


Рис. 4. Оценка времени остывания шара после оптимизации электротепловой модели

Проводились также модельные эксперименты, в которых исходное значение сопротивления  $R_1$  варьировалось в пределах единиц Ом, что соответствовало вариации коэффициента теплоотдачи шара в пределах  $1 \dots 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ . При этом при оптимизации указывались первоначальные («экспериментальные») точки температурного тренда, представленные выше. Каждый раз программа Micro-Cap давала одинаковый результат оптимизированного параметра  $R_1 = 3,942$  Ом.

Таким образом, с помощью программы Micro-Cap и электротепловой модели головы в виде шара существует возможность по двум экспериментальным точкам температурного тренда определять время остывания объекта экспертизы, то есть рассчитывать давность наступления смерти.

При проведении модельных экспериментов использовались значения температур, которые считались экспериментальными, с разрядностью три знака после запятой. Однако в практике судебно-медицинских экспертиз в бюро судмедэкспертизы обычно используют термометриче-

скую аппаратуру с разрешающей способностью 0,1 К [10]. Для того чтобы оценить влияние ограничений разрядности значений температуры, проведены модельные эксперименты по представленному выше алгоритму. В первом случае исходные (экспериментальные) значения температур были представлены одним разрядом после запятой, во втором случае – двумя разрядами. Оказалось, что в первом случае имеет место значительное отклонение оптимизированного параметра  $R_1$  от исходного, что ведет к погрешности в определении времени остывания шара на уровне 12,25 кс (3,4 часа). Во втором случае погрешность оказалась значительно меньшей и составила 550 с (0,15 часа), что, по-видимому, является приемлемым.

#### Заключение

Таким образом, рассмотрена задача оценки времени остывания шара с помощью компьютерной программы Micro-Cap в постановке, относящейся к судебно-медицинской экспертизе давности наступления смерти человека. В виде шара представлена диагностическая зона (голова) объекта экспертизы. Разработана и проверена на адекватность электротепловая модель шара. По двум точкам полученного на модели ис-

ходного температурного тренда его остывания, которые приняты экспериментальными, показана возможность оптимизации параметра электротепловой модели, рассчитываемого по коэффициенту теплоотдачи с поверхности шара, и далее возможность определять время с начала остывания шара. При построении исходной электротепловой модели допускается использование приближенных значений коэффициента теплоотдачи.

Исследовано влияние на погрешность оценки времени остывания шара разрешающей способности термометрической аппаратуры. Показано, что при давности наступления смерти до суток необходимо использовать термометры с разрешающей способностью не хуже 0,01 К.

#### Библиографические ссылки

1. Витер В. И., Куликов В. А. Некоторые особенности посмертной динамики температуры тела человека // Судебно-медицинская экспертиза. 1997. Т. 40. № 1. С. 11–13.
2. Henssge C., Brinkmann B // Arch. Criminol. 1984. Bd 174. № 3-4. Pp. 96-112.
3. Кузмин М. П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. М. : Энергия, 1974. 419 с.
4. Куликов, А. В. Особенности математического моделирования тепловых процессов на виртуальных электрических моделях // Межвуз. науч. сборник : Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Уфа : Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 2006. С. 122–126.
5. Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide. URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf> (дата обращения: 06.02.2018).
6. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 464 с.
7. Щепочкин О. В. Термометрия головного мозга в аспекте определения давности наступления смерти : автореф. дис. ... канд. мед. наук. Ижевск, 2001. 24 с.
8. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. 2-е изд. Л. : Энергия, 1976. 352 с.
9. Коновалов Е. А. Система для оценки давности наступления смерти человека : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб. : ЛЭТИ, 2012. 16 с.
10. Merckx B. Simplified Transient Hot-Wire Method for Effective Thermal Conductivity Measurement in Geo Materials: Microstructure and Saturation Effect / B. Merckx, P. Dudoignon, J. P. Garnier, D. Marchand // Advances in Civil Engineering, vol. 2012, 10 p.

#### References

1. Viter V.I., Kulikov V.A. [Some features of the post-mortem dynamics of human body temperature]. *Sudebno-medicinskaya ekspertiza* [Forensic Medical Expertise]. 1997, vol. 40, no 1, pp. 11-13 (in Russ.).
2. Henssge C., Brinkmann B. Bd 174 [Bd 174], 1984, no 3-4, pp. 96-112 (in Russ.).
3. Kuzmin M.P. *Elektricheskoe modelirovanie nestacionarnykh processov teploobmena* [Electrical simulation of non-stationary heat transfer processes]. Moscow, Energiya Publ., 1974 (in Russ.).
4. Kulikov A.V.. *Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya teplovykh processov na virtual'nykh elektricheskikh modelyakh* [Features of mathematical modeling of thermal processes in virtual electrical models]. *Elektromekhanika, elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy* [Proc. Electromechanics, electrical systems and systems], 2006, pp. 122-126 (in Russ.).
5. *Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide* [Micro-Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide], available at <http://www.spectrum-soft.com/down/ug11.pdf> (accessed February 06, 2018) (in Russ.).
6. Amelina M.A., Amelin S.A. *Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8* [Schematic simulation program Micro-Cap 8]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2007. (in Russ.).
7. Shchepochkin O.V. *Termometriya golovnogo mozga v aspekte opredeleniya davnosti nastupleniya smerti* [Thermometry of the brain in terms of determining the limitation of death]: PhD thesis. Izhevsk, 2001 (in Russ.).
8. Pekhovich A.I., Zhidkih V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the thermal regime of solids]. Leningrad: Energiya, 1976 (in Russ.).
9. Konovalov E.A. *Sistema dlya ochenki davnosti nastupleniya smerti cheloveka* [A system for assessing the age of occurrence of a person's death]: PhD thesis. Sankt-Peterburg, 2012 (in Russ.).
10. Merckx B., Dudoignon P., Garnier J. P., Marchand D. *Advances in Civil Engineering* [Advances in Civil Engineering], 2012, vol. 2012, p. 10.

\* \* \*

**Estimate of the Cooling Time of Inertia Object by Using Micro-Cap Computer Program***V. A. Kulikov*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU*A. Yu. Vavilov*, Doctor of Medicine, Professor, Izhevsk State Medical Academy*V. N. Syakterev*, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU*V. V. Syaktereva*, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

*This paper presents the estimate of the cooling time of the inertial object in the statement relating to forensic medicine. The electrothermal model of a sphere is offered which in turn models a biological object in the posthumous period. The technique of optimization of the electrothermal model and the technique of estimation of the cooling time of a sphere are presented. For this purpose the Micro-Cap computer program is used; and the model of the sphere is an electrical circuit composed of resistors and capacitors which is called the electrothermal model. The adequacy of the electrothermal model is shown by comparing the results of transient simulation in the scheme with the exact analytical solution published in the literature. It is shown that the necessary degree of adequacy of the model is achieved when using two experimental points on the temperature trend of the object of study within optimization of the element modeling the boundary conditions of the third kind.*

*The influence of the resolution of the thermometer used in the forensic medical examination on the efficiency of optimization performed by the Micro-Cap program was studied. It is shown that the resolution in the temperature measurement should not be as low as 0.01 K. It is assumed that the proposed method of object examination using the electrothermal model and the Micro-Cap computer program will be effective during the first day after the beginning of its cooling.*

**Keywords:** inertial object, cooling time of the object, electrothermal model, resolution in the temperature measurement.

Получено: 07.06.19