

На правах рукописи

Коновалов Евгений Алексеевич

СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ
ДАВНОСТИ НАСТУПЛЕНИЯ СМЕРТИ ЧЕЛОВЕКА

Специальность:

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена на кафедре «Вычислительная техника»
в ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВПО ИжГТУ, г. Ижевск).

Научный руководитель

Доктор технических наук, профессор, Куликов Виктор Александрович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, Цветков Эрик Иванович, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), профессор кафедры «Информационно-измерительные системы и технологии»

Кандидат технических наук, Виллевалде Анна Юрьевна, ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И.Менделеева, научный сотрудник.

Ведущая организация – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Защита состоится « ____ » _____ 2012 г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.238.09 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е.В. Садыкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из главных задач практической судебной медицины является определение давности (времени) наступления смерти человека (ДНС). В настоящее время определение ДНС в первые сутки после наступления смерти производится путем анализа динамики посмертной температуры тела и восстановления момента начала его остывания, который интерпретируется как момент наступления смерти.

Вопросам разработки тепловых моделей остывания тела и методик определения ДНС уделено большое внимание в работах как отечественных, так и зарубежных ученых.

Большинство моделей разработаны для стационарных внешних условий. Появляются модели и методики, позволяющие оперативно определять значение ДНС на месте экспертизы в условиях переменной температуры внешней среды, однако, для их применения требуются знания о колебаниях температуры окружающей среды за весь период остывания тела. На практике редко удается получить такие данные. В подобных случаях используется значение температуры среды на момент проведения экспертизы, которое может либо превышать среднюю температуру воздуха за период остывания, либо быть ниже ее. В первом случае это приводит к ошибочному уменьшению расчетного значения ДНС, а во втором – к ее увеличению. Проблема определения давности смерти при отсутствии информации об изменении температуры внешней среды по настоящее время не решена.

Еще одной причиной, ограничивающей возможность точного измерения ДНС тепловым методом, является отсутствие у исследователя знаний о значении температуры тела человека на момент смерти. Традиционно, в качестве прижизненных, используются значения температуры печени $37,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, прямой кишки $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ и головного мозга $36,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. При отличии реальных значений температуры тела на момент смерти от указанных получаемые результаты могут значительно отклоняться от действительного значения ДНС.

В стационарных внешних условиях, которые встречаются примерно в 80 % случаев проведения судебно-медицинских экспертиз (СМЭ), процесс остывания тела содержит нерегулярную и регулярную стадии. Первая характеризуется сильным влиянием начального состояния на температурное поле объекта. С течением времени это влияние уменьшается, и процесс теплообмена переходит в регулярную стадию, в которой закон изменения температуры приобретает простую экспоненциальную форму. Существующие методики приближенно учитывают нерегулярный этап, что так же вносит определенную погрешность в итоговое значение ДНС.

Известно, что процедура определения ДНС тепловым методом относится к области измерительных технологий. При реализации теплового метода на месте экспертизы необходимо выполнять измерение температуры тела и температуры среды. Ранее были разработаны опытные образцы устройств, предназначенных для определения ДНС, но из-за наличия определенных недостатков эти устройства не нашли широкого применения. В настоящее время в серийном

производстве отсутствуют специализированные термометры и приборы, предназначенные для этих целей и отвечающие всему комплексу требований, предъявляемых к ним. Обычно применяют ртутные термометры с разрешением 0,5 К и электрические портативные термометры с разрешением 0,1 К. Для реализации потенциальных возможностей теплового метода требуется существенно более высокое разрешение.

Таким образом, существует проблема совершенствования оперативного метода определения ДНС путем уточнения тепловой модели остывания тела и разработки специализированных средств термометрирования и расчета ДНС, которые вместе должны составлять информационно-измерительную систему. Исследования, представленные в настоящей работе, направлены на решение этой проблемы.

Цель данной работы является разработка метода и информационно-измерительной системы для оценки давности наступления смерти человека на месте проведения судебно-медицинской экспертизы, обеспечивающих оперативность и более высокую точность в сравнении с аналогами.

Для достижения поставленной цели определены следующие **задачи**:

- разработка эталонной математической модели остывания объекта;
- разработка метода оценки давности наступления смерти с учетом нерегулярной стадии теплообмена;
- разработка компонентов метрологического обеспечения системы оценки давности наступления смерти;
- разработка системы для измерения давности наступления смерти;
- экспериментальная апробация предложенных метода и системы.

Объектом исследования является информационно измерительная система для оценки давности наступления смерти человека по динамике посмертной температуры.

Предмет исследования – информационное, методическое, программно-алгоритмическое и аппаратное обеспечение системы.

Методы исследования. Исследование базируется на методах теории теплообмена, аналитического решения тепловых задач, электротеплового компьютерного моделирования, математического нелинейного программирования и теории погрешностей.

Новые научные результаты.

1. Эталонные математические модели остывания объекта, построенные на основе аналитического решения тепловой задачи и метода электротепловой аналогии, позволяющие выполнять анализ адекватности тепловых моделей остывания тела.

2. Метод оценки давности наступления смерти, учитывающий нерегулярную стадию остывания объектов в стационарных внешних условиях, и способ определения давности наступления смерти человека на его основе.

3. Оценки влияния источников погрешности на точность определения давности наступления смерти.

4. Алгоритм оптимизации значений параметров объекта (начальной температуры тела, температуры среды и коэффициента, учитывающего нерегуляр-

ную стадию теплообмена) для уточнения модели остывания тела в стационарных и квазистационарных внешних условиях.

5. Информационно-измерительная система для оценки давности наступления смерти в стационарных и квазистационарных условиях на месте проведения судебно-медицинской экспертизы.

Практическую ценность работы составляют:

1. Методика получения эталонной динамики температуры объекта экспертизы для стационарных и переменных внешних условий на основе аналитического решения тепловой задачи и метода электротепловой аналогии.

2. Методика расчета коэффициента, учитывающего нерегулярную стадию теплообмена тела в стационарных внешних условиях, по известным значениям геометрических размеров тела и постоянной времени остывания в регулярной стадии теплообмена.

3. Опытный образец информационно-измерительной системы для оценки ДНС на месте проведения судебно-медицинской экспертизы.

4. Результаты исследования погрешности измерений ДНС в условиях Бюро судебно-медицинской экспертизы.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Для анализа адекватности тепловых моделей остывания объекта судебно-медицинской экспертизы в стационарных и квазистационарных внешних условиях предложено использовать эталонные математические модели, построенные на основе аналитического решения тепловой задачи и метода электротепловой аналогии.

2. Для оценки давности наступления смерти в стационарных и квазистационарных внешних условиях получена новая методика, учитывающая иррегулярную стадию остывания объекта экспертизы, основанная на расчете поправочного коэффициента по данным измерений размера объекта и постоянной времени спада температуры в регулярной стадии.

3. Выполнена оценка влияния ошибок идентификации параметров объекта на точность определения ДНС, на основании которой выдвинуты требования к параметрам специализированного первичного термопреобразователя.

4. Для уточнения модели остывания тела в стационарных и квазистационарных внешних условиях разработан алгоритм оптимизации значений начальной температуры тела, температуры среды и коэффициента, учитывающего нерегулярную стадию теплообмена.

5. Разработана специализированная система для измерения температуры тела человека и среды и оперативного расчета ДНС на месте проведения судебно-медицинской экспертизы; получены результаты исследования погрешности измерений ДНС.

Внедрение результатов работы. Результаты работы внедрены в практическую деятельность Бюро судебно-медицинской экспертизы Удмуртской республики, Областного государственного учреждения здравоохранения «Свердловское областное бюро судебно-медицинской экспертизы» и в учебную деятельность на кафедре «Судебная медицина» ГОУ ВПО «Ижевская государственная медицинская академия».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Международной конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (С-Пб, 2007); Второй международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире - 2009» (С-Пб, 2009); Научно-технической конференции «Приборостроение в XXI веке» (Ижевск, 2006); Научно-технической конференции факультета «Информатика и вычислительная техника», посвященной 50-летию кафедры «Вычислительная техника» ИжГТУ (Ижевск, 2009), а так же на конференциях ученых и заседаниях кафедр «Вычислительная техника» ИжГТУ и «Судебная медицина» ИГМА.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 научных работах, из них: 3 статьи - в журналах, рекомендованных ВАК РФ [1, 2, 3], 2 статьи – в рецензируемых журналах [8, 13]; 2 статьи – в материалах международных научно-технических конференций [5, 6]; 2 статьи депонированы в ВИНТИ [9, 10]; 1 статья – в межвузовском сборнике научных трудов [4]; 4 статьи – в сборниках трудов региональных научно-технических конференций и конференций ученых ИжГТУ [7, 11, 12, 14]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа управления измерениями температуры и времени охлаждения объекта» [15]. Получено решение о выдаче патента на новый способ определения давности наступления смерти человека [16].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения, изложенных на 149 листах машинописного текста. В работу включены 53 рисунка, 24 таблицы, список литературы из 88 наименований. В приложении представлены акты об использовании результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулировку цели и задач исследований, основные положения, выносимые на защиту, и определяет основное содержание работы.

В первой главе выполнен анализ тепловых моделей остывания тела человека в посмертном периоде. Установлено, что существующие тепловые модели можно классифицировать по трем основным признакам:

- 1) модели с жестко заданными параметрами;
- 2) модели с параметрами, определяемыми при экспертизе судебным экспертом;
- 3) модели с параметрами, определяемыми при экспертизе судебным экспертом и специализированной программой.

Модели первой группы являются слишком упрощенными и, как следствие, определяют значение ДНС с большой погрешностью. Модели второй группы учитывают основные закономерности теплообмена тела, но предназначены для использования в стационарных внешних условиях, что не всегда является возможным. Модели третьей группы наиболее полно воспроизводят процесс остывания тела в стационарных и нестационарных условиях теплообмена, учитывают теплофизические параметры биоткани человека, требуют большого

объема входных данных и значительных вычислительных затрат, не являются оперативными для применения.

Принято решение о проведении исследований в направлении совершенствования модели, относящейся ко второй группе, на основе ее уточнения и оптимизации параметров и создания специализированной ИИС для измерения ДНС на мете проведения судебно-медицинской экспертизы.

Во второй главе предложена, обоснована и исследована модель регулярного режима теплообмена объекта экспертизы, учитывающая иррегулярную стадию. В качестве базы выбрана двухслойная модель Куликова В.А., которая в настоящее время широко используется судебными экспертами (Куликов В.А. Практическая методика измерения ДНС по методу регулярного теплового режима // Современные вопросы судебной медицины и экспертной практики. - Ижевск, 1998. – Вып. X – С. 115-120). В общем виде данная модель дает зависимость температуры тела от времени в следующем виде

$$T_T(\tau) = (T_{T0} - T_C)e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}(T_{T0} - T_C)e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} - \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2}(T_{T0} - T_C)e^{-\frac{\tau \cdot K}{\tau_1}} + T_C, \quad (1)$$

где T_{T0} - начальная (прижизненная) температура тела; T_C - температура внешней среды; В соответствии с этой моделью при ее упрощении расчет ДНС выполняется по формуле

$$\text{ДНС} = \tau_1 \text{Ln}\left(\frac{T_{T0} - T_C}{T_1 - T_C}\right) + \tau_1 \text{Ln}\left(\frac{K}{K - 1}\right), \quad (2)$$

где $\tau_1 = \frac{\Delta \tau}{\text{Ln}\left(\frac{T_1 - T_C}{T_2 - T_C}\right)}$ - постоянная времени экспоненты в регулярном режиме

теплообмена; $K = \frac{\tau_1}{\tau_2}$ - коэффициент, учитывающий нерегулярную стадию теплообмена и выбираемый из диапазона 4...15; τ_2 - постоянная времени экспоненты в нерегулярном режиме охлаждения; T_1 и T_2 - первая и вторая температуры тела, замеренные с интервалом времени $\Delta \tau$ в часах.

Источниками погрешности определения ДНС по данной модели являются – неопределенность начальной температуры T_{T0} , колебания температуры среды T_C в процессе остывания объекта и неопределенность в выборе коэффициента K , учитывающего нерегулярную стадию теплообмена.

Коэффициент K учитывает влияние раннего теплообмена, но для его определения необходимо знать динамику температуры тела в первые часы после смерти, что в момент проведения экспертизы невозможно. Предлагается исследовать и определить зависимость коэффициента K от других параметров, влияющих на процесс теплообмена объекта со средой, и далее, используя эту зависимость, при проведении экспертизы рассчитывать (уточнять) значение K .

Чтобы решить эту задачу необходимо располагать эталонными температурными трендами на этапе остывания объекта.

Для генерации эталонных трендов предложено использовать модели для постоянной и переменной температуры внешней среды, основанные на аналитическом решении тепловой задачи и методе электротепловой аналогии. При этом в качестве объекта моделирования рассматривается голова человека, которая в настоящее время используется как диагностическая зона при определении ДНС.

В качестве эталонного температурного тренда, описывающего процесс изменения температуры в центре головы, принимается температурный тренд в центре сплошного шара с теплофизическими параметрами, соответствующими параметрам биологической ткани головы. Шар находится в конвективном теплообмене с окружающей средой (граничные условия 3-го рода) и имеет равномерное начальное распределение температуры [5]. В этом случае температура шара определяется выражением

$$T_{ш}(\tau) = T_{T0} + \theta(\tau)(T_C - T_{T0}), \quad (3)$$

где $\theta(\tau) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu_n \cdot \eta} \cdot \sin(\mu_n \cdot \eta) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot F_0(\tau)}$ - безразмерный параметр температуры;

$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2 \cdot Bi \sqrt{(Bi-1)^2 + \mu_n^2}}{\mu_n^2 + Bi^2 - Bi}$ - амплитуды колебаний температуры;

$tg(\mu_n) = -\frac{1}{Bi-1} \cdot \mu_n$; μ_n - ряд величин, зависящих от критерия Био $Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$;

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ - коэффициент температуропроводности; $F_0(\tau) = \frac{a \cdot \tau}{R^2}$ - критерий Фурье;

T_{T0} , $T_{ш}(\tau)$ - начальная и текущая температура шара; T_C - температура внешней среды; α - коэффициент теплоотдачи (для естественной конвекции

$1..10 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$); R - радиус шара; λ - коэффициент теплопроводности тела ($0,498$

$\frac{Вт}{м \cdot К}$); c - удельная теплоемкость тела ($3,192 \frac{кДж}{кг \cdot К}$); ρ - плотность тела (1062

$\frac{кг}{м^3}$); η - безразмерная координата ($0..1$).

Для расчета температуры по формуле (3) в среде MathCAD была разработана процедура численного поиска коэффициентов ряда μ_n - положительных корней. Путем исследования модели (3) установлено, что для получения температурного тренда с погрешностью, пересчитанной в ДНС, не более 5-ти минут в выражении для $\theta(\tau)$ достаточно использовать 10 членов ($n=10$).

Модель (3) позволяет генерировать температурные тренды при постоянной температуре среды.

При построении эталона распределения температуры объекта, моделирующего теплообмен при переменной температуре внешней среды, был использован принцип электротепловой аналогии. Тело разбивается на ряд элементарных объемов, каждый из которых заменяется электрической ячейкой, состоящей из дискретных электрических компонентов, моделирующих термические сопро-

тивления элементарного объема вдоль осей координат и теплоемкость объема. Совокупность электрических ячеек, дополненная элементами, моделирующими граничные условия, представляет собой электротепловую модель.

В качестве среды для исследования электрической модели выбрано программное обеспечение MICRO-CAP. На рис. 1 представлена электрическая модель шара с граничными условиями третьего рода, состоящая из N слоев. Значения термических сопротивлений определяются по выражениям

$$R_N^1 = \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\frac{1}{D_N^1} - \frac{1}{D_N^{cp}} \right) \text{ и } R_N^2 = \frac{1}{2\pi\lambda} \left(\frac{1}{D_N^{cp}} - \frac{1}{D_N^2} \right), \text{ где } N - \text{ порядковый номер элементарного объема, } D_N^i - \text{ диаметр объема; теплоемкости объемов рассчитываются по формуле}$$

$$C_N = c_{yo}\rho \frac{4}{3} \pi \left[\left(\frac{D_2^N}{2} \right)^3 - \left(\frac{D_1^N}{2} \right)^3 \right]; \text{ граничное сопротивление}$$

$$\text{определяется в виде } R_{гр} = \frac{1}{\alpha 4\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2}.$$

Была проведена оценка погрешности моделирования шара для моделей с 5-ю, 10-ю и 20-ю элементарными ячейками. За точное принималось аналитическое решение тепловой задачи. Установлено, что уже при разбиении объекта на 20 элементарных ячеек электротепловая модель дает погрешность менее 0,01К.

Предложена методика определения зависимости коэффициента K в модели (3) от параметров, влияющих на теплообмен:

– используя эталонную модель изменения температуры (3), для заданных значений диаметра шара d и коэффициента теплоотдачи α вычисляются значения параметров τ_{II} и τ_1 , где τ_{II} - точка перегиба температурного тренда;

– используя двухслойную модель (1), определяется значение коэффициента K , как функции от найденных τ_1 и τ_{II} ;

– для различных значений диаметра шара d и постоянной τ_1 определяются значения K и строится зависимость

$$K(\tau_1, d) = (-0,1145d + 3,0554) \cdot \tau_1 + (0,0425d - 1,9563), \quad (4)$$

где d в см, τ_1 в часах.

Таким же способом была получена эквивалентная представленной зависимости K от диаметра d и коэффициента теплоотдачи α :

$$K(\alpha, d) = (-1,6429d + 56,28) \cdot \alpha^{0,0062 \cdot d - 1,0939}.$$

На рис. 2 представлена оценка влияния учета коэффициента K на погрешность определения ДНС. Через $\Delta\text{ДНС}_{стар}$ и $\Delta\text{ДНС}_{нов}$ отмечены погрешности расчета ДНС, полученные при использовании $K=12$ и коэффициенте K , вычисленном по формуле (4), соответственно. По графикам видно, что учет коэффициента K позволил существенно снизить погрешность определения ДНС с 1ч до 0,2 ч.

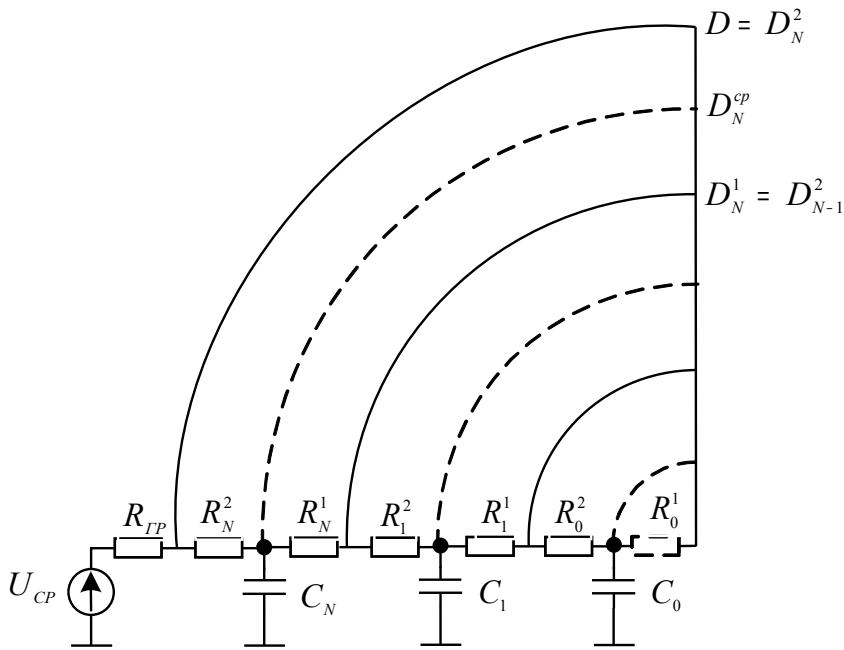


Рис. 1. Электротепловая модель шара

значениях начальной температуры тела, температуры среды и коэффициента K . При этом в процессе экспертизы ДНС требуется определять новый, ранее не учитываемый параметр – диаметр головы на уровне лобно-затыльной части [16].

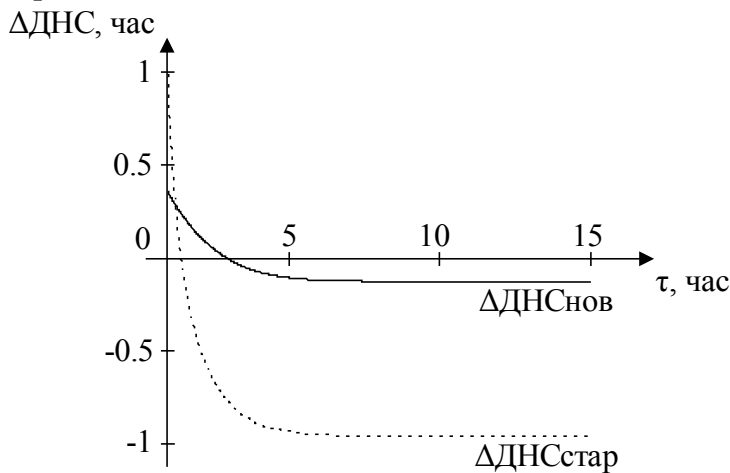


Рис. 2. Влияние учета коэффициента K на погрешность определения ДНС

метров объекта на результирующее значение ДНС. Установлено, что влияние погрешности идентификации начальной температуры на ошибку в определении ДНС составляет около 1 час/К. Влияние погрешности измерения температуры тела и среды с увеличением ДНС возрастает. Максимальное влияние составляет 10 час/К. Для определения ДНС с максимально допустимой погрешностью 0,5 часа, разрешающая способность измерительного устройства должна быть не хуже 0,05 К.

Определено, что погрешность установки датчика вносит ошибку в результирующее значение ДНС. Установлено, что если в качестве диагностической зоны принять интервал $(-0,19R; 0,19R)$ относительно центра головы радиу-

Таким образом, впервые получено выражение для уточнения коэффициента K , учитывающего нерегулярную стадию теплообмена, в процессе проведения экспертизы по постоянной времени в регулярной стадии теплообмена и размеру объекта судебно-медицинской экспертизы и подтверждена возможность эффективного использования двухслойной модели объекта при известных

В третьей главе представлена оценка влияния погрешности идентификации параметров объекта на погрешность измерения давности наступления смерти, а так же изложены результаты исследований эффективности оптимизации параметров тепловой модели регулярного режима.

Определено влияние ошибок идентификации пара-

сом R , то максимальная величина ошибки определения ДНС составит менее 0,1 часа. Таким образом, для среднего радиуса головы $R = 9$ см диагностическая зона будет лежать на отрезке (-1,75см; 1,75см), а для выполнения термометрирования необходимо использовать термопреобразователи с длиной чувствительного элемента, не превышающей 35 мм.

Применение электротепловой модели позволило установить, что при охлаждении объекта в переменных внешних условиях при расчете ДНС двухслойная модель дает существенную ошибку (порядка нескольких часов). В этом случае, для учета изменения температуры среды предлагается выполнять поиск оптимальных (уточненных) значений температуры среды, начальной температуры тела и коэффициента K с помощью алгоритмов оптимизации [13].

Задачей оптимизации является поиск таких уточненных значений параметров объекта по двухслойной модели (1), при которых минимизируются отклонения между экспериментально полученным и расчетным температурными трендами. В качестве целевой функции при выполнении оптимизации использовалось выражение:

$$F(X_n) = \left| \Delta \tau_{\text{расч}}(X_n) - \Delta \tau \right| \leq \varepsilon ; \quad (5)$$

где $\Delta \tau_{\text{расч}}(X_n) = \tau(X_n, T_2) - \tau(X_n, T_1)$; X_n - вектор независимых переменных (набор параметров модели, за счет выбора значений которых планируется достичь минимума целевой функции).

Для исследования алгоритма были получены температурные тренды объекта методом моделирования на основе электротепловой аналогии (рис. 1) при синусоидальном суточном изменении температуры внешней среды T_c . Использовались следующие исходные данные: диаметр объекта в виде шара $d = 18$ см; период колебаний температуры среды - 24 часа; постоянная составляющая температуры среды - 20 °С; начальная температура объекта $T_0 = 37$ °С; коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене объекта со средой $\alpha = 5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, что соответствует постоянной времени в регулярном режиме теплообмена $\tau_1 = 7$ часов и отражает реальный темп остывания объекта; интервал замера температур $\Delta \tau = 15$ мин.

Для оценки эффективности применения оптимизационного подхода при определении времени остывания объектов была выполнена серия расчетов ДНС на разных этапах охлаждения при различных амплитудах колебаний T_c . Были получены следующие результаты:

1) на ранних и средних этапах теплообмена применение оптимизации по методу Пауэлла позволяет существенно сократить среднее значение погрешности определения ДНС и СКО Δ ДНС;

2) на раннем этапе теплообмена результаты расчета ДНС с применением оптимизационного подхода не зависят от амплитуды колебаний температуры среды;

3) применение оптимизации на средних этапах остывания объекта позволяет получить приемлемые результаты погрешности расчета ДНС (Δ ДНС < 0,5 час.) при колебаниях температуры внешней среды с амплитудой не более 3 К;

4) на поздних этапах остывания применение оптимизации позволяет существенно уменьшить ошибку определения времени смерти, но абсолютное значение погрешности остается достаточно большим и может составлять от 1-го до 6-ти часов в зависимости от времени охлаждения и амплитуды колебаний температуры среды.

В четвертой главе представлена разработка портативного устройства, позволяющего выполнять термометрирование объектов экспертизы с высоким разрешением и производить расчет ДНС, а так же приводятся результаты проверки разработанной методики определения ДНС.

Установлено, что устройство, предназначенное для измерения ДНС должно удовлетворять следующему перечню технических требований:

- 1) диапазон измерения температуры тела и среды: $-50..+50$ °С;
- 2) разрешающая способность: не хуже $0,01$ °С;
- 3) устройство должно содержать микропроцессорный блок для выполнения многопараметрической оптимизации с последующим расчетом ДНС по модифицированной двухслойной модели;
- 4) должны присутствовать средства ввода и отображения информации.

На рис. 3 представлена структурная схема ИИС – измерителя ДНС [6]. Основными элементами являются измерительный канал, состоящий из термопреобразователя, промежуточного преобразователя, аналогового фильтра и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), микропроцессорный модуль, интерфейсный модуль и устройство ввода и отображения информации.

В качестве первичного преобразователя выбран термопреобразователь сопротивления (ТПС) с медным чувствительным элементом из микропровода, имеющий встроенный теплопроводящий каркас и обладающий минимальным саморазогревом под действием измерительного тока [10].

Преобразование сопротивления в напряжение осуществляется промежуточным преобразователем (ПП), выполненным в виде пассивного моста [2], вместе с АЦП формирующего на выходе линейную зависимость напряжения.

Выходной сигнал моста поступает на вход сигма-дельта АЦП AD7705(06) со встроенным усилителем. Схема допускает изменения сопротивления ТПС в диапазоне $50 \pm 26,94$ Ом, что в перерасчете на температуру дает интервал измерений $20 \pm 128,29$ °С. Измерительный ток в схеме составляет 4 мА, что снижает саморазогрев ТПС [10, 14]. Единице младшего разряда АЦП соответствует перепад температуры в $0,004$ °С, что удовлетворяет требованиям.

Разработанный прибор судмедэксперта выполнен в виде портативного устройства (рис. 4.). Установлено, что результаты измерений температуры не зависят от изменений температуры окружающей среды и напряжения питания в пределах разрешающей способности прибора. Прибор можно использовать в лабораторных и полевых условиях.

В течение двух лет прибор находился в опытной эксплуатации в Бюро судебно-медицинской экспертизы Удмуртской республики и использовался при определении ДНС реальных объектов.

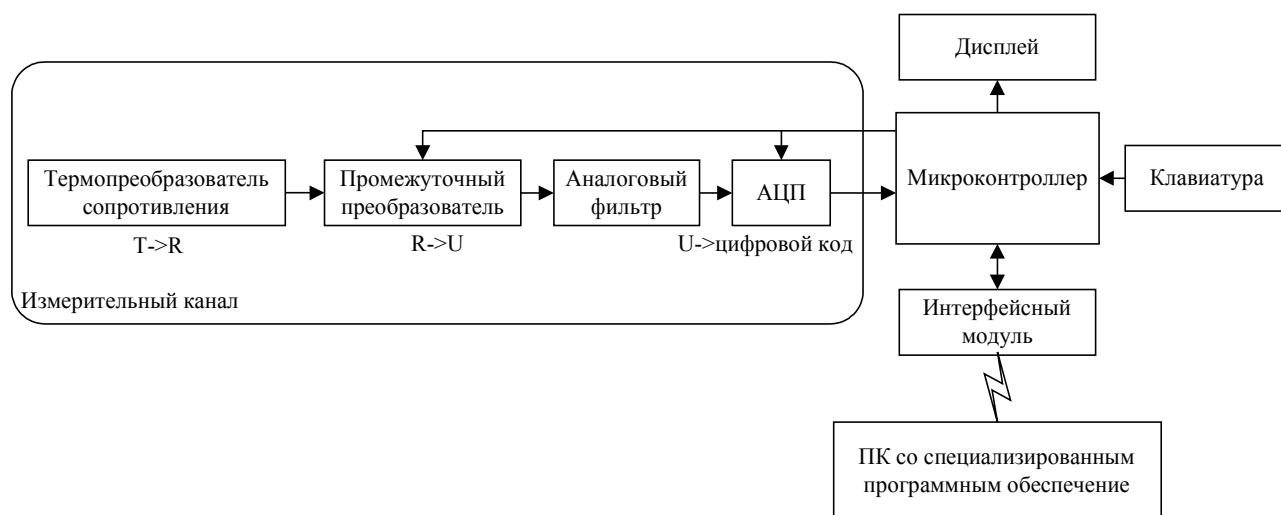


Рис. 3. Структурная схема портативного измерителя ДНС

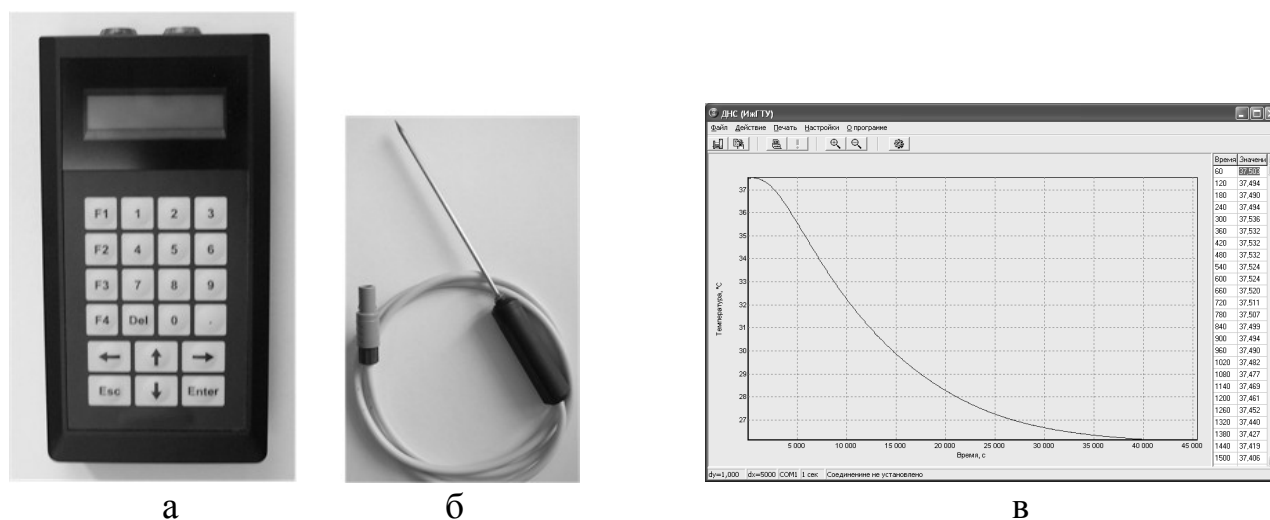


Рис. 4. Система измерения ДНС: а – измерительный блок; б – термопреобразователь сопротивления; в – главное окно программы при работе с прибором

В табл. 1 приведены исходные данные и результаты расчетов, полученные при проведении судебно-медицинских экспертиз: $ДНС_1$ – значения ДНС, найденные при номинальных значениях параметров $T_0=37\text{ °C}$, $T_C=20\text{ °C}$ и $K=12$ по формуле (2); $\Delta ДНС_1= ДНС_1-ДНС$ – погрешность расчета ДНС при номинальных значениях параметров; $ДНС_2$, $\Delta ДНС_2= ДНС_2-ДНС$ – значения, полученные с использованием оптимизации параметров $T_{0_П}$, $T_{C_П}$ и $K_{П}$ по методу Пауэлла.

Как видно из табл. 1 использование многопараметрической оптимизации методом Пауэлла по трем параметрам позволяет уменьшить среднее значение и СКО абсолютной погрешности определения ДНС с $1,29\pm 0,93$ час. до $-0,14\pm 0,37$ час.

Таблица 1

Результаты расчета давности наступления смерти без использования (ДНС1) и с использованием оптимизации трех параметров T_0 , T_c и K (ДНС2)

No	T_c , °C	T_1 , °C	T_2 , °C	ДНСр, час	ДНС1, час	ΔДНС1, час	$T_{0,п}$, °C	$T_{c,п}$, °C	$K_{п}$	ДНС2, час	ΔДНС2, час
1	12,100	29,200	28,876	3,50	3,89	0,39	35,332	13,602	10,6	3,41	-0,08
2	16,700	23,000	22,805	5,00	6,55	1,55	35,000	18,817	42,6	4,82	-0,17
3	18,300	26,200	25,951	4,00	4,82	0,82	37,000	22,060	4,8	4,06	0,06
4	21,112	30,188	30,054	5,60	6,96	1,36	36,037	26,057	10,8	4,94	-0,65
5	13,400	26,900	26,607	4,50	4,77	0,27	37,000	14,046	25,7	4,47	-0,02
6	20,800	24,800	24,708	7,50	10,46	2,96	35,000	23,000	3,4	7,10	-0,39
7	20,517	25,338	25,206	6,00	7,75	1,75	36,023	22,633	10,4	5,66	-0,33
8	19,000	26,600	26,385	4,00	5,38	1,38	39,375	23,000	42,6	4,16	0,16
9	22,146	27,864	27,746	7,50	8,10	0,60	37,500	24,361	11,8	6,89	-0,60
10	17,400	28,500	28,246	5,00	4,57	-0,42	37,500	18,270	11,8	4,81	-0,18
11	17,732	22,164	22,084	12,50	14,05	1,55	39,000	19,000	42,6	12,16	-0,33
12	17,000	25,800	25,546	3,00	5,05	2,05	33,583	20,375	52,4	3,16	0,15
13	17,200	29,600	29,401	4,00	5,50	1,50	39,000	26,060	11,6	3,99	-0,00
14	19,748	26,414	26,296	8,00	9,46	1,466	35,000	21,650	11,6	7,44	-0,55
15	12,600	18,800	18,696	11,50	14,19	2,69	39,000	15,030	9,8	11,66	0,16
16	15,000	23,000	22,873	8,50	11,25	2,75	39,000	19,500	10,4	8,19	-0,30
17	17,238	21,187	21,099	11,00	12,40	1,40	37,500	18,099	11,8	11,10	0,10
18	22,750	26,514	26,418	9,20	8,96	-0,23	37,500	22,750	11,8	9,38	0,18
19	19,831	21,743	21,681	11,00	11,41	0,41	36,989	20,366	3,7	10,11	-0,88
20	19,863	26,263	26,167	10,00	11,56	1,56	36,000	19,863	20,1	10,75	0,75
Среднее значение, час						1,29	Среднее значение, час				-0,14
СКО, час						0,93	СКО, час				0,37

Таким образом, практически подтверждается, что использование многопараметрической оптимизации позволяет значительно снизить погрешность определения ДНС, что, в свою очередь, позволяет рекомендовать применение этой методики на практике.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны математические модели остывания объекта, построенные на основе аналитического решения тепловой задачи и метода электротепловой аналогии, позволяющие объективно выполнять анализ адекватности тепловых моделей остывания тела.

2. Разработан новый способ определения давности наступления смерти, учитывающий нерегулярную стадию остывания объекта в стационарных внешних условиях за счет расчета поправочного коэффициента по результатам измерений постоянной времени в регулярной стадии теплообмена и размеру объекта судебно-медицинской экспертизы.

3. Исследовано влияние источников погрешности на точность определения давности наступления смерти, на основании чего выдвинуты требования к параметрам специализированного первичного термопреобразователя.

4. Предложено для уточнения модели остывания тела в стационарных и квазистационарных условиях применение оптимизации параметров – началь-

ной температуры тела, температуры среды и коэффициента, учитывающего нерегулярную стадию теплообмена, что обеспечивает снижение погрешности определения давности наступления смерти до уровня менее 1 часа на интервалах времен от 3-х до 18 часов при использовании головы в качестве диагностической зоны. Показана эффективность многопараметрической оптимизации по методу Пауэлла при решении задач теплообмена данного класса.

5. Определен комплекс требований к портативному прибору судмедэксперта, на основании которых разработан опытный образец устройства, испытанный в лаборатории и в реальных условиях при определении давности наступления смерти на месте проведения судебно-медицинской экспертизы.

6. Результаты диссертационной работы внедрены в ГУЗ «Бюро судебно-медицинской экспертизы Удмуртской республики» (г. Ижевска), в ГУЗ «Свердловское областное бюро судебно-медицинской экспертизы» (г. Екатеринбург) и на кафедре «Судебная медицина» ГОУ ВПО «Ижевская государственная медицинская академия», что подтверждено соответствующими актами. Результат диссертационной работы – оптимизация параметров модели остывания тела по методу Пауэлла – рекомендован к применению при проведении судебно-медицинских экспертиз в новой медицинской технологии «Диагностика давности наступления смерти термометрическим способом в раннем посмертном периоде», разрешение ФС №2011/227 от 04.08.2011 на применение которой дано Федеральной службой по надзору в сфере здравоохранения и социального развития.

Публикации автора в журналах, рекомендованных ВАК

1. Коновалов Е.А. Оценка эффективности применения оптимизационного подхода при расчете времени остывания объекта в переменных внешних условиях: Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. - №1(45). - С. 97-98.

2. Куликов В.А., Коновалов Е.А., Власов В.Г. Разработка измерительного канала термометра высокого разрешения // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. - 1(15). - С. 236-243.

3. Куликов В.А., Коновалов Е.А. Микропроцессорный прибор для измерения давности наступления смерти по методу регулярного теплового режима: Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. - 1(49). - С. 102-106.

Публикации автора в других изданиях

4. Коновалов Е.А. Особенности выбора микроконтроллеров для портативных регистраторов измерительных систем // Межвуз. сборник: электротехнич. комплексы и системы. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2006.

5. Коновалов Е.А. Модель динамики температуры инерционных объектов в стационарных условиях // Сборник трудов Четвертой международной конференции: Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности. – С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – Т. 11 – С. 188 – 192.

6. Коновалов Е.А. Система температурной диагностики для судебной медицины // Сборник трудов Второй международной научно-практической конференции: Измерения в современном мире. – С-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 119 – 122.

7. Коновалов Е.А., Куликов В.А. Выбор алгоритма оптимизации параметров тепловой модели при расчете времени остывания объекта // Информац. технологии в промышленности и образовании: сборник трудов науч.-техн. конф. факультета «Информатика и вычислительная техника», посвященной 50-летию кафедры «Вычислительная техника» ИжГТУ (25 апреля 2009 г.) / науч. ред. Ю.В. Веркиенко. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2009. – С. 277-285.

8. Куликов А.В., Вавилов А.Ю., Коновалов Е.А. Оценка погрешности измерения ДНС микропроцессорным прибором с терморезистивным датчиком // Проблемы экспертизы в медицине. – Ижевск, 2006, №1(20). С. 7-9.

9. Куликов В.А., Коновалов Е.А. Вопросы проектирования мостовых преобразователей сопротивления для термометров высокого разрешения: ИжГТУ. – Ижевск, 2006. – 9 с. - Деп. в ВИНТИ 28.02.2006, № 201-B2006.

10. Куликов А.В., Коновалов Е.А. Экспериментальные исследования малогабаритных термопреобразователей сопротивления высокого разрешения: ИжГТУ. – Ижевск, 2006. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 17.04.06, № 510-B2006.

11. Куликов В.А., Коновалов Е.А. Схемотехника измерительного канала системы температурной диагностики человека // Труды 3-ей науч.-тех. конф: Приборостроение в XXI веке. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2006.

12. Куликов В.А., Коновалов Е.А. Методика учета иррегулярной стадии при анализе теплообмена инерционных объектов // сборник трудов молодых ученых: Информационные системы в промышленности и образовании, Выпуск 3. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2008, с. 85-90.

13. Куликов А.В., Вавилов А.Ю., Коновалов Е.А. Оптимизационный подход уточнения давности наступления смерти в судебно-медицинской практике // Проблемы экспертизы в медицине. – Ижевск, 2009, №1(33). С. 9-11.

14. Калугин И.Е., Коновалов Е.А., Сяктерева В.В., Куликов В.А. Исследование алгоритма учета саморазогрева термопреобразователей сопротивления измерительным током // Информац. технологии в промышленности и образовании: сборник трудов науч.-техн. конф. факультета «Информатика и вычислительная техника», посвященной 50-летию кафедры «Вычислительная техника» ИжГТУ (25 апреля 2009 г.) / науч. ред. Ю.В. Веркиенко. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2009. – С. 270-277.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2010615565 от 30.08.2010 / Программа управления измерениями температуры и времени охлаждения объекта / Е.А. Коновалов, В.А. Куликов; Оpubл. – 30.12.2010. – Бюл. 4(73).

16. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2010145635 от 07.10.2011 / Способ определения давности наступления смерти человека. / В.А. Куликов, Е.А. Коновалов, А.Ю. Вавилов, В.И. Витер, А.В. Малков.