

УДК 340.624.4.6-053.31

<https://doi.org/10.35693/SIM624827>

© This work is licensed under CC BY 4.0

© Authors, 2024

Оценка давности наступления смерти методом краниоэнцефальной термометрии при однократном дискретном понижении внешней температуры

Г.В. Недугов

ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России (Самара, Россия)

Аннотация

Цель – разработка реализованного в формате компьютерной программы метода определения ДНС по КТ трупа в условиях его охлаждения при однократном дискретном понижении внешней температуры.

Материал и методы. Выполнено аналитическое и конечно-элементное моделирование динамики КТ при однократном дискретном понижении внешней температуры.

Результаты. Разработана математическая модель определения ДНС и неопределенности ее оценок при однократном дискретном понижении внешней температуры. Значения констант модельного уравнения и их дисперсий определены путем конечно-элементного моделирования динамики КТ в указанных условиях охлаждения. Вычислительный алгоритм данного метода определения ДНС и противопоказания к его применению реализованы на языке C# в виде программы Warm Bodies DSC.

Выводы. Разработанный метод и реализующее его приложение рекомендуются к использованию в судебно-медицинской практике для определения ДНС при однократном дискретном понижении внешней температуры.

Ключевые слова: охлаждение трупа, давность наступления смерти, краниоэнцефальная температура.

Конфликт интересов: не заявлен.

Для цитирования:

Недугов Г.В. Оценка давности наступления смерти методом краниоэнцефальной термометрии при однократном дискретном понижении внешней температуры. Наука и инновации в медицине. 2024;9(X):XX-XX.

<https://doi.org/10.35693/SIM624827>

Сведения об авторе

Недугов Герман Владимирович – д-р мед. наук, доцент, заведующий кафедрой судебной медицины.

<http://orcid.org/0000-0002-7380-3766>

Адрес: Самарский государственный медицинский университет, ул. Арцыбушевская, 171, г. Самара, Россия, 443001.

E-mail: nedugovh@mail.ru

Список сокращений

ДНС – давность наступления смерти; КТ – краниоэнцефальная температура.

Получено: 19.12.2023

Одобрено: 09.03.2024

Опубликовано: 17.05.2024

A postmortem interval estimation by cranioencephalic thermometry at a single discrete decrease in ambient temperature

German V. Nedugov

Samara State Medical University (Samara, Russia)

Abstract

Aim – to develop an estimation method and a computer program for determining the postmortem interval (PMI) by cranioencephalic temperature (CT) of a corpse under conditions of cooling with a single discrete decrease in ambient temperature.

Material and methods. We performed an analytical and finite element modeling of CT dynamics at a single discrete decrease in ambient temperature. Results. A mathematical model has been developed for determining the PMI and the uncertainty of its estimates at a single discrete decrease in the ambient temperature. The constants' values of the model equation and their variances

were determined on the basis of finite element modeling of CT dynamics under the specified cooling conditions. The computational algorithm of the specified method for determining PMI and limitations of its use were implemented in the Warm Bodies DSC program written on C#.

Conclusion. We can recommend using the developed method and software in forensic medicine to determine the PMI at a single discrete decrease in ambient temperature.

Keywords: corpse cooling, postmortem interval, cranioencephalic temperature.

Conflict of interest: nothing to disclose.

Citation

Nedugov G.V. A postmortem interval estimation by cranioencephalic thermometry at a single discrete decrease in ambient temperature. Science and Innovations in Medicine. 2024;9(X):XX-XX. <https://doi.org/10.35693/SIM624827>

Information about author

German V. Nedugov – PhD, Associate professor, Head of the Department of Forensic Medicine. <http://orcid.org/0000-0002-7380-3766>

Address: Samara State Medical University, 171, Artsybushevskaya st., Samara, Russia, 443001.

E-mail: nedugovh@mail.ru

Received: 19.12.2023

Accepted: 09.03.2024

Published: 17.05.2024

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время «золотым стандартом» определения давности наступления смерти (ДНС) в раннем посмертном периоде по-прежнему остается метод С. Ненсге, применение которого предполагает необходимость однократного измерения ректальной или

краниоэнцефальной (КТ) температуры [1–5]. Названный метод основывается на предложенном в 1962 году исследователями Т.К. Marshall и Ф.Е. Ноаре феноменологическом законе охлаждения глубоких тканей трупа при постоянной внешней температуре, имеющем вид трансцендентного уравнения:

$$\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = \frac{p}{p - k} e^{-kt} - \frac{k}{p - k} e^{-pt}, \quad (1)$$

где T – текущая температура ядра трупа, °C; T_a – температура внешней среды, °C; T_0 – начальная температура тела в диагностической точке в момент наступления смерти человека, °C; k – постоянная охлаждения, ч⁻¹; p – постоянная температурного плато, ч⁻¹; t – ДНС, ч [6].

В своих модификациях уравнения (1) С. Henssge использовал установленные им на основе анализа большого объема эмпирических данных линейные зависимости константы температурного плато от константы охлаждения, а также среднестатистические значения последней при различных условиях остывания мертвого тела [7, 8]. Наиболее важным условием корректности результатов данного метода, сильно ограничивающим область его практического применения, является постоянство температуры внешней среды. Указанное обстоятельство послужило причиной ряда исследований, посвященных разработке адаптаций метода С. Henssge к условиям изменяющейся внешней температуры [9–11].

Одним из актуальных для судебно-медицинской экспертной практики типовых изменений температуры окружающей среды является ее однократное дискретное понижение, под которым понимается однократное снижение внешней температуры при сохранении ее постоянства в дальнейшем [12]. Данное типовое изменение условий охлаждения обычно наблюдается в случаях термометрии трупа уже после его перемещения с места обнаружения в холодильную камеру с иными температурными условиями. В подобной ситуации обычно точно известны температура окружающей среды до и после перемещения трупа и промежуток времени после его перемещения и до термометрии, а также результат последней [9]. Проведя серию экспериментов на манекенах, L. Althaus и С. Henssge разработали феноменологическую модель определения ДНС в указанных условиях охлаждения, основанную на уравнении (1) и данных ректальной термометрии [9]. В последующем названная модель была оптимизирована и реализована в формате компьютерной программы, помимо изменения температурного режима дополнительно учитывавшей возможность смены и других условий охлаждения мертвого тела, а именно характера его одежды и ложа, а также наличие ветра или водотока [12].

В целом полученные данные позволили решать задачу определения ДНС при однократном дискретном понижении внешней температуры путем ректальной термометрии трупа. Однако для получения корректных оценок ДНС на основе ректальной термометрии трупа начальный температурный режим внешней среды при ее дискретном понижении не должен превышать 23,2 °C [9, 13]. По этой причине предложенный L. Althaus и С. Henssge подход не применим, если начальная внешняя температура выше указанной границы, что существенно ограничивает область применения разработанного метода.

В отличие от ректальной температуры динамика КТ характеризуется отсутствием влияния внешней температуры на связь констант температурного плато и охлаждения, которая для данной диагностической точки имеет вид пропорции

$$p = 8,425k. \quad (2)$$

Кроме того, определение ДНС методом краниоэнцефальной термометрии не требует измерения массы трупа [7, 8, 13]. Однако, несмотря на указанные преимущества, каких-либо технологий определения ДНС при однократном дискретном понижении внешней температуры путем краниоэнцефальной термометрии трупа до сих пор предложено не было. Между тем судебно-медицинская экспертная практика характеризуется потребностью в таких технологиях, имеющих, помимо прочего, реализации своих вычислительных алгоритмов в формате компьютерных программ.

■ ЦЕЛЬ

Разработка реализованного в формате компьютерной программы метода определения ДНС по КТ трупа в условиях его охлаждения при однократном дискретном понижении внешней температуры.

■ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологический дизайн исследования представляет собой разработку феноменологической модели определения ДНС при однократном дискретном понижении внешней температуры, выполненную на основе конечно-элементного моделирования динамики КТ в указанных условиях охлаждения трупа, с реализацией вычислительного алгоритма созданной модели в формате компьютерной программы.

В ходе математического моделирования в процессе охлаждения ядра трупа выделяли два периода: начальный и финальный, представляющие собой отрезки времени до и после изменения условий охлаждения соответственно. Модель динамики КТ в финальном периоде охлаждения трупа создавали на базе уравнения (1) с учетом линейной связи (2) его констант. Область значений констант уравнения (1) определяли путем численного поиска решений систем нелинейных уравнений (СНУ) Marshall – Hoare для двукратной термометрии трупа:

$$\begin{cases} T_{0_2} = \frac{(T_1 - T_{a_2})(p - k)}{pe^{-kt_2} - ke^{-pt_2}}, \\ T_{0_2} = \frac{(T_2 - T_{a_2})(p - k)}{pe^{-k(t_2 + \Delta t)} - ke^{-p(t_2 + \Delta t)}}, \end{cases} \quad (3)$$

где T_{a_2} – финальная внешняя температура, °C; t_2 – продолжительность финального периода охлаждения, ч; T_1 – КТ при первой термометрии трупа в конце периода t_2 , °C; T_2 – КТ при повторной термометрии трупа, °C; Δt – промежуток времени между термометриями трупа, ч (рисунок 1).

Для этого находили корни уравнения

$$\begin{aligned} & (T_1 - T_{a_2}) \left(pe^{-k(t_2 + \Delta t)} - ke^{-p(t_2 + \Delta t)} \right) - \\ & - (T_2 - T_{a_2}) \left(pe^{-kt_2} - ke^{-pt_2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

удовлетворяющие различным вариантам заданного типа охлаждения. Нелинейную оптимизацию полученных из СНУ (3) функций (4) с константами k и p в качестве переменных выполняли методом обобщенного понижающего градиента, реализованным в надстройке «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Office Excel 2016.

Значения остальных показателей СНУ (3) находили путем компьютерного моделирования методом конечных элементов температурного поля головы в условиях конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи, равным 6 Вт/(м²·К), для различных сочетаний начального и финального периодов охлаждения при отсутствии внешних и внутренних источников тепловыделения. Граничные значения параметров указанных вариантов охлаждения составили: начальный период – 10–35 °С, финальный период – 4–11 °С, разность начальной и финальной внешних температур – 2–26 °С, продолжительность начального периода охлаждения – 1–21 ч, финального – 1–10 ч, интервала времени между первой и повторной термометриями трупа – 0,5–2 ч. Шаг дискретизации для внешних температур равнялся 1 °С, продолжительности периодов охлаждения – 1 ч, интервала времени между термометриями трупа – 0,5 ч. Всего на основе сгенерированных данных были найдены решения 148 невырожденных вариантов СНУ (3).

Для компьютерного моделирования посмертной динамики КТ использовали двумерную конечно-элементную модель мозгового отдела головы в форме квадранта радиусом 98 мм, состоявшего из равномерно распределенных однородных слоев кожно-апоневротического лоскута (5 мм), костей свода черепа (5 мм), ликвора субарахноидального пространства (2 мм) и головного мозга (86 мм). Теплофизические параметры указанных биотканей, процедуры нахождения начального и посмертного температурного полей расчетной области и валидации конечно-элементной модели подробно описаны нами ранее [14]. За КТ принимали температуру в точке с нулевой радиальной координатой.

Конечно-элементное моделирование посмертного температурного поля головы осуществляли с помощью бесплатно распространяемой версии приложения ELCUT 6.5 (https://elcut.ru/free_soft_r.htm). Остальные вычислительные процедуры производили с использованием приложения Microsoft Excel пакета Office 2016. Операции математического анализа выполняли с применением бесплатного веб-приложения WolframAlpha (<https://www.wolframalpha.com>). Код компьютерной программы определения ДНС и погрешностей полученных оценок составляли на языке программирования C# с использованием бесплатно распространяемой версии приложения Microsoft Visual Studio (<https://visualstudio.microsoft.com/ru/downloads>).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В начальный период охлаждения динамика КТ протекает согласно уравнению (1) со значениями констант, установленными С. Henssge [7, 8, 13]. Поэтому, располагая информацией о КТ на момент понижения внешней температуры, можно определить продолжительность начального периода охлаждения, которая представляет собой корень неявно заданного уравнения

$$1,135e^{-0,127t_1} - 0,135e^{-1,07t_1} - \frac{T_{02} - T_{a1}}{T_{01} - T_{a1}} = 0, \quad (3)$$

где t_1 – продолжительность начального периода охлаждения, ч; T_{02} – КТ в момент смены режимов охлаждения, °С; T_{a1} – начальная внешняя температура, °С;

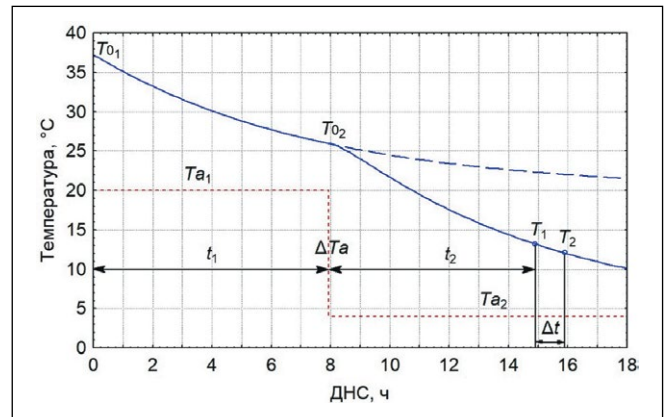


Рисунок 1. Динамика КТ для данных из примера 1 (сплошная синяя линия). Красной штриховой линией маркирована динамика внешней температуры. Штриховой синей линией показана условная динамика КТ при отсутствии смены режима охлаждения.

Figure 1. Dynamics of cranioencephalic temperature on the example 1 (solid blue line). The red dashed line marks the dynamics of ambient temperature. The dashed blue line shows the conditional dynamics of cranioencephalic temperature in the absence of a change in cooling modes.

T_{01} – начальная КТ, в соответствии с рекомендациями С. Henssge принимаемая равной 37,2 °С (**рисунок 1**).

Отсюда задача определения ДНС в заданных условиях сводится к задаче определения КТ в момент смены температурных режимов охлаждения.

Компьютерное моделирование охлаждения в рассматриваемых условиях показало, что в финальный период охлаждения динамика КТ также протекает согласно закону (1), но с неизвестными индивидуальными значениями констант охлаждения и температурного плато. Для нахождения областей значений констант k и p методом обобщенного понижающего градиента был выполнен поиск решений сгенерированных на основе конечно-элементной модели вариантов уравнения (4), удовлетворяющих заданным краевым условиям при различных режимах однократного дискретного понижения внешней температуры. Проведенный

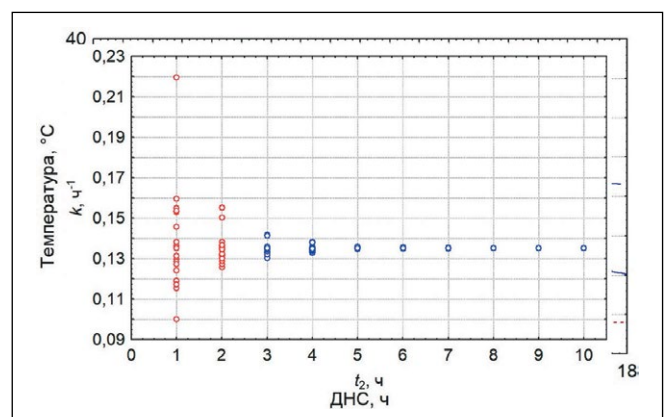


Рисунок 2. Зависимость константы охлаждения от продолжительности финального периода охлаждения по данным конечно-элементного моделирования охлаждения трупа при различных режимах однократного дискретного понижения внешней температуры. Красным маркированы значения k при $t_2 < 3$ ч и $\Delta T_a < 6$ °С.

Figure 2. Dependence of the cooling constant on the duration of the final cooling period according to finite element modeling of corpse cooling under various modes of a single discrete decrease in ambient temperature. The values of k at $t_2 < 3$ h and $\Delta T_a < 6$ °C are marked in red.

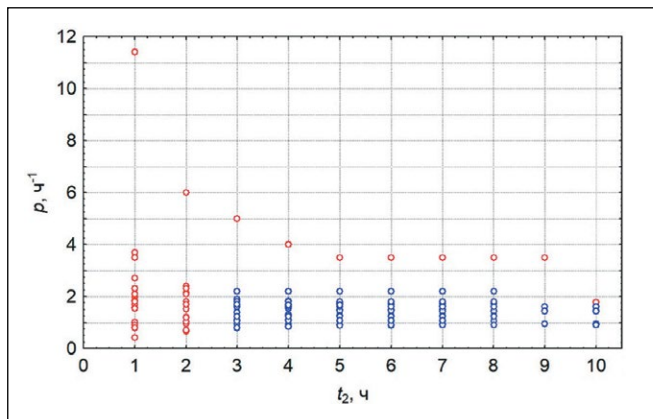


Рисунок 3. Зависимость константы температурного плато от продолжительности финального периода охлаждения по данным конечно-элементного моделирования охлаждения трупа при различных режимах однократного дискретного понижения внешней температуры. Красным маркированы значения p при $t_2 < 3$ ч и $\Delta T_a < 6$ °C.

Figure 3. The dependence of the temperature plateau constant on the duration of the final cooling period according to finite element modeling of corpse cooling under various modes of a single discrete decrease in ambient temperature. The values of p at $t_2 < 3$ h and $\Delta T_a < 6$ °C are marked in red.

поиск показал, что среднее значение константы k составляет $0,135$ ч⁻¹, а ее дисперсия, будучи максимальной в первые 2 ч финального периода охлаждения, затем резко убывает, после 5 ч стремясь к нулю (**рисунок 2**). Максимальное отклонение константы охлаждения от своего среднего значения в период от 3 до 10 ч после понижения внешней температуры составило $0,007$ ч⁻¹.

Значения константы p в первые 2 ч финального периода охлаждения, а также при разности ΔT_a начальной и финальной внешних температур менее 6 °C тоже характеризовались выраженной дисперсией, а при остальных вариантах рассматриваемых условий охлаждения распределение значений данной константы являлось равномерным со средним значением $1,4$ ч⁻¹ и максимальным отклонением от среднего $0,8$ ч⁻¹ (**рисунок 3**).

Полученные данные позволяют использовать установленные средние значения обеих констант при определении КТ в момент изменения внешней температуры с помощью любого из уравнений СНУ (3). Лучше использовать для этого первое уравнение, содержащее меньше аргументов и не требующее для выполнения расчетов повторной термометрии трупа. После расчета КТ на момент смены внешних температур продолжительность начального периода охлаждения определяется по формуле (5). Тогда искомая ДНС представляет собой сумму начального и финального периодов охлаждения: t , где t – ДНС, ч.

Пример 1. Труп обнаружен в помещении с температурой воздуха 20,0 °C, после чего доставлен в морг и помещен в холодильную камеру с температурой 4,1 °C, в которой спустя 7 ч после обнаружения и была выполнена краниоэнцефальная термометрия. КТ составила 14,0 °C. Необходимо определить ДНС на момент термометрии трупа.

Согласно СНУ (3), на момент изменения внешних температур КТ трупа равнялась

$$T_{0_2} = \frac{(14 - 4,1)(1,4 - 0,135)}{1,4e^{-0,135 \cdot 7} - 0,135e^{-1,4 \cdot 7}} = 27,115 \text{ °C}.$$

Подставив полученное значение КТ в уравнение (5), получаем выражение

$$1,135e^{-0,127t_1} - 0,135e^{-1,07t_1} - \frac{27,115 - 20}{37,2 - 20} = 0,$$

из которого находим $t_1 = 7,95$ ч. Отсюда ДНС на момент термометрии трупа равна

$$t = 7,95 + 7 = 14,95 \text{ ч}.$$

Из-за использования средних значений констант СНУ (3) полученные с помощью изложенного метода оценки КТ будут сопровождаться наличием погрешностей. На величину последних дополнительно окажут влияние ошибки термометрии трупа и внешней среды, а также ошибки измерения продолжительности финального периода охлаждения. КТ в момент смены режимов охлаждения согласно первому уравнению СНУ (3) можно рассматривать как функцию

$$T_{0_2} = F(k, p, t_2, T_{a_2}, T_1) \quad (6)$$

5 случайных величин. Тогда, предполагая отсутствие взаимной коррелированности ошибок аргументов данной функции, дисперсия погрешностей оценок КТ определяется из уравнения

$$\sigma_{T_{0_2}}^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial k}\right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial p}\right)^2 \sigma_p^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial t_2}\right)^2 \sigma_{t_2}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial T_{a_2}}\right)^2 \sigma_{T_{a_2}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial T_1}\right)^2 \sigma_{T_1}^2, \quad (7)$$

где σ^2 – дисперсия ошибок, а F – функция (6). При отсутствии информации о стандартных отклонениях ошибок их следует принимать равными одной трети от предельной погрешности соответствующего показателя.

Неопределенность оценок начального периода t_1 согласно данным [12] составляет

$$\sigma_{t_1} = 2,0889e^{-1,1411Q},$$

где Q – безразмерная температура, в рассматриваемом случае определяемая как

$$Q = \frac{T_{0_2} - T_{a_1}}{T_{0_1} - T_{a_1}}.$$

Итоговая дисперсия ошибок оценок определения ДНС является суммой дисперсий ошибок определения продолжительности начального и финального периодов охлаждения, а также КТ на момент смены режимов внешних температур:

$$\sigma_t^2 = \sigma_{t_1}^2 + \sigma_{t_2}^2 + \left(\frac{\partial f(t)}{\partial T_{0_2}}\right)^2 \sigma_{T_{0_2}}^2,$$

где $f(t)$ – неявная функция (5), частная производная которой по T_{0_2} определяется уравнением

$$\frac{\partial f(t)}{\partial T_{0_2}} = \left[(T_{a_1} - T_0) \left(0,14445e^{-1,07t_1} - 0,144145e^{-0,127t_1} \right) \right]^{-1}.$$

Зная дисперсию ошибок, можно рассчитать толерантный интервал ДНС:

$$ДНС = t \pm \sigma_t \cdot z_{1-\alpha},$$

Показатель x	Значение	Δx	σ	$\frac{\partial F}{\partial x}$	Произведения квадратов
$T_1, ^\circ\text{C}$	14	0,1	0,033333	2,324753	0,006004972
$T_{a2}, ^\circ\text{C}$	4,1	0,1	0,033333	-1,32475	0,001949966
$t_2, \text{ч}$	7	0,333333	0,111111	3,106631	0,119150105
$k, \text{ч}^{-1}$	0,135	0,007	0,002333	142,9162	0,111203002
$p, \text{ч}^{-1}$	1,4	0,8	0,266667	1,751952	0,218263764

Таблица 1. Промежуточные расчеты погрешности КТ в момент смены температурных режимов охлаждения трупа
Table 1. Intermediate calculations of the cranioencephalic temperature error at the time of changing the temperature regimes of cooling the corpse

где t – оценка ДНС, ч; z – стандартная нормальная переменная; α – уровень значимости.

Пример 2. Определить 95% толерантный интервал ДНС для данных из примера 1, приняв абсолютные предельные ошибки термометрии трупа и внешней среды равными 0,1 $^\circ\text{C}$, а финального периода охлаждения – 20 минутам (0,333 ч).

Результаты промежуточных расчетов дисперсии погрешностей КТ в момент смены температурных режимов охлаждения приведены в таблице 1.

Суммируя произведения квадратов, находим, что дисперсия КТ равна 0,4566.

Поскольку

$$Q = \frac{27,115 - 20}{37,2 - 20} = 0,4137,$$

то

$$\sigma_{t_1} = 2,0889e^{-1,1411 \cdot 0,4137} = 1,3029.$$

Отсюда

$$\sigma_t = \sqrt{1,3029^2 + 0,1111^2 + 0,4566 \left[(20 - 27,115) \left(0,14445e^{-1,07 \cdot 7,95} - 0,144145e^{-0,127 \cdot 7,95} \right) \right]^2} = 1,51 \text{ ч.}$$

Перемножая значение стандартной нормальной переменной, равное 1,960, на стандартное отклонение ошибок ДНС, находим 95% толерантный интервал последней:

$$\text{ДНС} = 14,95 \pm 2,95 \text{ ч.}$$

Изложенный вычислительный алгоритм был формализован на языке C# в компьютерной программе Warm Bodies SDC (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023687943). Данное приложение на основе предложенной математической модели вычисляет ДНС по КТ трупа при однократном дискретном понижении постоянной температуры внешней среды на 6 $^\circ\text{C}$ и более и продолжительности финального периода охлаждения от 3 до 10 ч. Помимо точечных программа находит двусторонние интервальные оценки ДНС для требуемого уровня доверительной вероятности. Величина рассчитываемых ошибок включает погрешности, вызванные возможными отклонениями индивидуальных условий охлаждения от среднестатистических, а также погрешности измерения входных параметров.

Предельные ошибки последних заданы равными 0,1 $^\circ\text{C}$ для показателей температуры и 5% для длины финального периода охлаждения. Вычисление продолжительности начального периода охлаждения приложение выполняет

итеративным методом Ньютона. При выявлении вырожденных вариантов охлаждения программа выполняет остановку расчетов с выводом соответствующего предупреждающего окна. Для работы с программой пользователю необходимо указать результат однократного измерения КТ трупа, начальную и финальную внешнюю температуру, интервал времени между моментом понижения внешней температуры и термометрией тела, начальную КТ, а также допустимую вероятность ошибки.

■ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное в рамках настоящего исследования компьютерное моделирование показало соответствие динамики КТ после однократного дискретного понижения внешней температуры уравнению (1) Marshall – Hoare. Указанный характер охлаждения в подобных условиях, видимо, присущ всем глубоким тканям трупа, поскольку такой же феномен отмечали L. Althaus и C. Henssge при изучении динамики ректальной температуры [9]. Однако из-за невозможности установить индивидуальные значения констант уравнения (1) в финальную фазу охлаждения указанные авторы при разработке своего метода определения ДНС прибегли к замене уравнения (1) собственным эмпирическим выражением.

В отличие от подхода L. Althaus и C. Henssge в предложенном в рамках настоящего исследования методе для определения КТ в момент смены температурных режимов охлаждения используется исходное уравнение Marshall – Hoare со средними значениями констант охлаждения и температурного плато, полученными путем компьютерного моделирования более широкого круга разнообразных вариантов дискретного понижения внешней температуры. Дополнительно метод предусматривает вычисление неопределенности как оценок КТ в момент смены режимов охлаждения, так и итоговых оценок ДНС на основе дисперсий констант уравнения (1), а также погрешностей измеряемых показателей температуры и времени.

Ограничениями к использованию разработанного метода могут быть возможные несоответствия реальных условий охлаждения смоделированным в компьютерном эксперименте. Причинами возможных несоответствий являются: 1) перенос теплоты за счет теплопроводности при наличии контакта охлаждаемой части тела с другими физическими телами; 2) конвекция в нестандартных условиях при иных коэффициентах теплоотдачи; 3) отличные от модельных теплофизические свойства тканей охлаждаемой области тела.

Однако выбранная для моделирования охлаждаемая часть тела наиболее устойчива к влиянию перечисленных факторов на результаты определения ДНС. Это объясняется тем, что форма головы очень близка к таковой шара, у которого с касательной плоскостью имеется всего одна общая точка. Данное обстоятельство позволяет пренебречь процессами теплопроводности при расположении головы трупа на ровной поверхности. Также анатомическое строение головы и учитываемых в ее геометрической модели слоев характеризуется минимальной вариабельностью. Кроме того, значения констант уравнения (1) для нестандартных вариантов охлаждения (наличие головного убора, сильный ветер, контакт с жидкостью) может быть уточнен

в дальнейших исследованиях путем конечно-элементного моделирования соответствующих условий охлаждения [15–17].

Разработанный метод противопоказан к использованию при продолжительности финального периода охлаждения менее 3 ч и при разности начального и финального температурных режимов внешней среды менее 6 °С. В первом из этих случаев в течении охлаждения не выражены экспоненциальная фаза и фаза выравнивания температур, а во втором – фаза температурного плато. Эти обстоятельства закономерно сопровождаются несоответствием математической модели (1) условиям охлаждения с увеличением дисперсии констант уравнения (1) и ростом погрешностей оценок ДНС. Оба указанных противопоказания легко устранимы на практике. Для этого в первом случае достаточно выполнять термометрию трупа спустя более длительный срок после его перемещения в другие условия охлаждения. Во втором случае целесообразно в расчетах принимать внешнюю температуру постоянной, равной среднему значению суммы начальной и финальной внешних температур, с предельной ошибкой ее измерения величиной 3 °С.

Также к числу противопоказаний относятся ограничения, присущие всем термометрическим методам определения ДНС, основанным на модификациях С. Henssge уравнения (1), например, инсоляция, значительные колебания внешней температуры в начальном и финальном периодах охлаждения, выраженные отклонения от нормотермического танатогенеза [7, 8, 13].

■ ВЫВОДЫ

1. Разработан метод определения ДНС и погрешностей ее оценок по КТ трупа в условиях его охлаждения при однократном дискретном понижении внешней температуры.

2. Вычислительный алгоритм предложенного метода определения ДНС и противопоказания к его использованию реализованы в формате прикладной программы Warm Bodies DSC.

3. Разработанный метод и реализующее его приложение рекомендуются к использованию в судебно-медицинской экспертной практике для термометрического определения ДНС при однократном дискретном понижении внешней температуры. ■

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	ADDITIONAL INFORMATION
Источник финансирования. Работа выполнена по инициативе авторов без привлечения финансирования.	Study funding. The study was the authors' initiative without external funding.
Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи.	Conflict of Interest. The author declares that there are no obvious or potential conflicts of interest associated with the content of this article.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Hubig M, Muggenthaler H, Mall G. Confidence intervals in temperature-based death time determination. *Leg Med (Tokyo)*. 2015;17(1):48-51. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2014.08.002>
- Schweitzer W, Thali MJ. Computationally approximated solution for the equation for Henssge's time of death estimation. *BMC Med Inform Decis Mak*. 2019;19(1):201. <https://doi.org/10.1186/s12911-019-0920-y>
- Potente S, Henneicke L, Schmidt P. Prism - A novel approach to dead body cooling and its parameters. *Forensic Sci Int*. 2021;325:110870. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2021.110870>
- Laplace K, Baccino E, Peyron PA. Estimation of the time since death based on body cooling: a comparative study of four temperature-based methods. *Int J Legal Med*. 2021;135(6):2479-2487. <https://doi.org/10.1007/s00414-021-02635-7>
- Wei T, Abraham J, Wang Y. Comment on the Marshall-Hoare-Henssge model for estimating the time since death. *J Forensic Sci*. 2023;68(2):676-681. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.15218>
- Marshall TK, Hoare FE. Estimating the time of death. The rectal cooling after death and its mathematical expression. *J Forensic Sci*. 1962;7(1):56-81.
- Henssge C. Death time estimation in case work. I. The rectal temperature time of death nomogram. *Forensic Sci Int*. 1988;38(3-4):209-236. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(88\)90168-5](https://doi.org/10.1016/0379-0738(88)90168-5)
- Henssge C. Rectal temperature time of death nomogram: dependence of corrective factors on the body weight under stronger thermic insulation conditions. *Forensic Sci Int*. 1992;54(1):51-66. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(92\)90080-G](https://doi.org/10.1016/0379-0738(92)90080-G)
- Althaus L, Henssge C. Rectal temperature time of death nomogram: sudden change of ambient temperature. *Forensic Sci Int*. 1999;99(3):171-178. [https://doi.org/10.1016/s0379-0738\(98\)00188-1](https://doi.org/10.1016/s0379-0738(98)00188-1)
- Bisegna P, Henssge C, Althaus L, Giusti G. Estimation of the time since death: sudden increase of ambient temperature. *Forensic Sci Int*. 2008;176(2-3):196-199. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.09.007>

- Nedugov GV. Double exponential model of corpse cooling under conditions of linearly varying ambient temperature. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2021;7(4):19-28. (In Russ.). [Недугов Г.В. Двойная экспоненциальная модель охлаждения трупа в условиях линейно изменяющейся внешней температуры. *Судебная медицина*. 2021;7(4):19-28]. <https://doi.org/10.17816/fm429>
- Nedugov GV. New computer technologies to determine postmortem interval by the Henssge method. *Russian Journal of Forensic Medicine*. 2021;7(3):152-158. (In Russ.). [Недугов Г.В. Новые компьютерные технологии определения давности наступления смерти по методу Henssge. *Судебная медицина*. 2021;7(3):152-158]. <https://doi.org/10.17816/fm406>
- Henssge C, Madea B. Estimation of the time since death in the early post-mortem period. *Forensic Sci Int*. 2004;144(2-3):167-75. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.04.051>
- Nedugov GV. Estimation of the postmortem interval by the method of finite element modeling of postmortem heat transfer in human head. *Science & Innovations in Medicine*. 2022;7(3):179-185. (In Russ.). [Недугов Г.В. Оценка давности наступления смерти методом конечно-элементного моделирования посмертного теплообмена головы. *Наука и инновации в медицине*. 2022;7(3):179-185]. <https://doi.org/10.35693/2500-1388-2022-7-3-179-185>
- Schenkl S, Muggenthaler H, Hubig M, et al. Automatic CT-based finite element model generation for temperature-based death time estimation: feasibility study and sensitivity analysis. *Int J Legal Med*. 2017;131(3):699-712. <https://doi.org/10.1007/s00414-016-1523-0>
- Subramaniam JS, Hubig M, Muggenthaler H, et al. Sensitivity of temperature-based time since death estimation on measurement location. *Int J Legal Med*. 2023;137(6):1815-1837. <https://doi.org/10.1007/s00414-023-03040-y>
- Ullrich J, Weiser M, Shanmugam Subramaniam J, et al. The impact of anatomy variation on temperature based time of death estimation. *Int J Legal Med*. 2023;137(5):1615-1627. <https://doi.org/10.1007/s00414-023-03026-w>