



УДК 340.624.4.6-053.31

DOI: 10.35693/2500-1388-2022-7-3-179-185



## Оценка давности наступления смерти методом конечно-элементного моделирования посмертного теплообмена головы

© Г.В. Недугов

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

### Аннотация

**Цель** – разработка двумерной конечно-элементной модели (КЭМ) посмертного теплообмена головы, предназначенной для определения давности наступления смерти (ДНС).

**Материал и методы.** С помощью приложения ELCUT 6.5 Student произведено конечно-элементное моделирование геометрии и посмертного теплообмена головы взрослого человека. В качестве геометрической модели мозгового отдела головы использовали полусферу с радиусом 98 мм, состоящую из равномерно распределенных однородных слоев: кожно-апоневротического лоскута, костей свода черепа, ликвора субарахноидального пространства и головного мозга. Валидация КЭМ осуществлялась путем оценки сходимости кривых охлаждения, полученных с помощью КЭМ и на основе законов охлаждения Marshall – Ноаге и Ньютона – Рихмана в условиях постоянной и линейно изменяющейся внешней температуры.

**Результаты.** Разработана масштабируемая двумерная КЭМ нахождения посмертного температурного поля головы. Она позволяет учитывать любые изменения внешней температуры, комбинированные условия теплообмена и зависимость теплофизических параметров биотканей от температуры внешней среды. Отладка КЭМ в стандартных условиях охлаждения показала максимальную сходимость результатов нахождения посмертного температурного поля с результатами валидных феноменологических математических моделей при задании на внешнем ребре только конвективного теплообмена с коэффициентом теплоот-

дачи, равным 6 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Разработанная КЭМ характеризуется устойчивостью результатов определения ДНС к отклонениям начального температурного поля расчетной области от своего физиологического уровня.

**Выводы.** Предложенную КЭМ целесообразно использовать в экспертной практике при определении давности наступления смерти.

**Ключевые слова:** охлаждение трупа, давность наступления смерти, математическое моделирование, метод конечных элементов.

**Конфликт интересов:** не заявлен.

### Для цитирования:

Недугов Г.В. Оценка давности наступления смерти методом конечно-элементного моделирования посмертного теплообмена головы. *Наука и инновации в медицине*. 2022;7(3):179-185.  
doi: 10.35693/2500-1388-2022-7-3-179-185

### Сведения об авторе

Недугов Г.В. – д-р мед. наук, доцент кафедры судебной медицины.  
ORCID: 0000-0002-7380-3766

### Автор для переписки

Недугов Герман Владимирович

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

E-mail: nedugovh@mail.ru

ДНС – давность наступления смерти;  
КЭМ – конечно-элементная модель;  
МКЭ – метод конечных элементов.

Рукопись получена: 29.04.2022

Рецензия получена: 02.06.2022

Решение о публикации принято: 08.06.2022

## Estimation of the postmortem interval by the method of finite element modeling of postmortem heat transfer in human head

© German V. Nedugov

Samara State Medical University (Samara, Russia)

### Abstract

**Aim** – to develop a two-dimensional finite element model (FEM) of postmortem heat transfer in head to determine the postmortem interval (PMI).

**Material and methods.** The finite element modeling of the geometry and postmortem heat transfer in an adult's head was carried out using the ELCUT 6.5 Student application. A hemisphere with a radius of 98 mm was used as a geometric model of the cerebral part of the head, consisting of evenly distributed homogeneous layers: the scalp, the bones, the cerebrospinal fluid of the subarachnoid space and the brain. For FEM validation we used the evaluation of the cooling curves convergence

obtained by FEM and by the Marshall – Hoare and Newton – Richman cooling laws under conditions of constant and linearly varying ambient temperature.

**Results.** A scalable two-dimensional FEM for finding the postmortem temperature field of the head was developed. The model allows for accounting any changes in the ambient temperature, combined heat exchange conditions and the dependence of thermophysical parameters of biological tissues on the ambient temperature. The FEM check-out under standard cooling conditions showed the maximum convergence of the results of finding the postmortem temperature field with the

results of valid phenomenological mathematical models when only convective heat exchange with a heat transfer coefficient equal to  $6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  was set on the outer edge. The developed FEM is characterized by the stability of the results of determining the prescription of death coming to deviations of the initial temperature field of the calculated region from its physiological level.

**Conclusion.** It is advisable to use the proposed FEM in the forensic medical expert practice when determining the prescription of death coming.

**Keywords:** corpse cooling, postmortem interval, mathematical modeling, finite element method.

**Conflict of interest:** nothing to disclose.

#### Citation

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. doi: 10.35693/2500-1388-2022-7-3-179-185

#### Information about author

German V. Nedugov – PhD, Associate professor of the Department of forensic medicine. ORCID: 0000-0002-7380-3766

#### Corresponding Author

German V. Nedugov

Address: Samara State Medical University,  
171 Artsybushevskaya st., Samara, Russia, 443001.  
E-mail: nedugovh@mail.ru

Received: 29.04.2022

Revision Received: 02.06.2022

Accepted: 08.06.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Получившие широкое распространение феноменологические математические модели определения давности наступления смерти (ДНС), к которым относятся уравнения Marshall – Hoare и Henssge, характеризуются ограниченностью условий для своего использования и ресурсов для модификации. Так, указанные модели не пригодны при таких сложных условиях теплообмена, как комбинация различных условий охлаждения для разных областей тела, наличие внешних источников тепла (например, инсоляции), непостоянная температура внешней среды или нелинейный характер ее динамики [1–3]. По этой причине источником дальнейшего совершенствования тепловых методов определения ДНС в судебной медицине является моделирование охлаждения различных частей тела на основе теории теплообмена, рассматривающей процессы переноса тепла в пространстве и во времени тремя возможными элементарными способами: тепловым излучением, конвекцией и теплопроводностью [3].

На начальном этапе развития данного научного направления полученные математические модели посмертного теплообмена имели аналитический характер, были пригодны только в условиях постоянной температуры внешней среды и основывались на довольно грубых приближениях геометрии тела человека и его внутренней структуры, в качестве которых использовались однородные тела простой геометрической формы [4, 5]. Разработанные аналитические модели, с одной стороны, являлись слишком грубыми приближениями реального теплообмена и учитывали ограниченное количество индивидуальных особенностей охлаждения, а с другой стороны, были слишком сложными для практического применения. Поэтому дальнейшее развитие указанные подходы к определению ДНС получили на основе численных методов, а именно на основе метода конечных разностей и метода конечных элементов (МКЭ) [6–8].

МКЭ в настоящее время является наиболее эффективным методом решения задач теплообмена и стал доступен благодаря широкому распространению компьютерных технологий. Идея МКЭ состоит в том, что любое непрерывное распределение физической переменной в расчетной области, включая температурное поле, можно аппроксимировать набором кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном

числе подобластей. Это позволяет использовать в расчетах вместо сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупность простых элементов, имеющих конечное число степеней свободы и связанных между собой в узловых точках. Чем большим количеством элементов разбиения характеризуется конечно-элементная модель (КЭМ), тем точнее приближение ее решений к моделируемому процессу. Количество элементов разбиения ограничивается только возможностями компьютера.

Использование МКЭ позволило преодолеть проблему моделирования сложных начальных и граничных условий, а также сложной геометрии и внутренней структуры тела [6, 7]. При этом было доказано, что детальное представление индивидуальной анатомии не является необходимым для точного оценивания ДНС. При условии адекватной фиксации общих объемов тканей геометрическое разрешение модели практически не влияет на точность определения ДНС [9]. Поэтому в ходе конечно-элементного анализа охлаждения трупа нет необходимости в обеспечении значительной сегментации и использовании сетки с высоким разрешением. Это позволяет применять для определения ДНС довольно грубые модели с подходящими усредненными тепловыми свойствами.

Первоначально КЭМ посмертного теплообмена ориентировались на нахождение температурного поля туловища и профилей ректальной температуры [6, 7]. Этот подход был сопряжен с рядом затруднений, связанных с выраженной вариабельностью размерных характеристик и тканевого состава этой части тела. Поэтому дальнейшее развитие моделирования посмертного теплообмена на основе МКЭ связано с выбором в качестве объектов для математического описания иных анатомических структур [10]. Так, наиболее перспективной для моделирования областью тела является голова, геометрия мозгового отдела которой очень близка к такому телу, как многослойная полусфера с равномерным распределением слоев однородной структуры. Благодаря наличию осевой симметрии, геометрия расчетной области в этом случае может быть представлена полукругом или даже одним квадрантом. Это позволяет свести решаемую задачу к классу двумерных, значительно упростив создание модели и расчеты без потерь их точности.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка двумерной КЭМ посмертного теплообмена головы, предназначенной для определения ДНС.

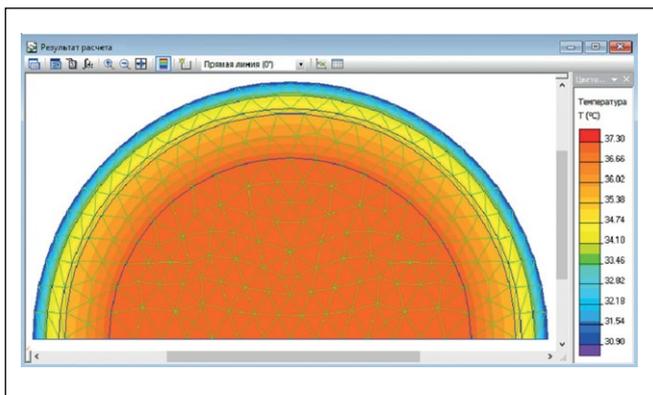
## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Методологический дизайн исследования представляет собой компьютерное моделирование на основе МКЭ начального и посмертного температурного поля головы взрослого человека, выполненное с использованием приложения ELCUT 6.5 Student.

В качестве геометрической модели мозгового отдела головы использовали полусферу с радиусом 98 мм, состоящую из четырех равномерно распределенных однородных слоев: кожно-апоневротического лоскута (5 мм), костей свода черепа (5 мм), ликвора субарахноидального пространства (2 мм) и головного мозга (86 мм). Теплопроводность, удельную теплоемкость и плотность указанных биотканей задавали согласно данным литературы [9, 11, 12]. Для ликвора задавали значения теплопроводности и теплоемкости воды при температуре 30 °С. В двумерной постановке геометрия модели имела форму полукруга (рисунок 1).

На первом этапе моделирования находили прижизненное температурное поле головы, представлявшее собой начальное условие посмертного теплообмена и необходимое для последующей постановки задачи нестационарного теплопереноса.

В норме прижизненное температурное поле головного мозга взрослого человека является стационарным и однородным за исключением его поверхностного слоя толщиной примерно 17 мм, в котором наблюдается монотонное снижение температуры [11, 12]. В этой связи в геометрической модели головы внутри мозгового слоя были выделены два блока: глубокий и поверхностный толщиной соответственно 69 и 17 мм. Данные блоки имели одинаковое строение и схожие теплофизические свойства, но отличались начальным распределением температур. Начальную температуру глубоких отделов мозга в целях последующей валидации КЭМ принимали однородной, равной 37,2 °С. На поверхностях остальных слоев модели задавали



**Рисунок 1.** Геометрическая модель головы с построенной сеткой из 254 конечных элементов и ее начальное температурное поле.

**Figure 1.** The geometric model of a head with a constructed grid of 254 finite elements and its initial temperature field.

начальные значения температуры, присущие указанным тканям при жизни при температуре поверхности кожи головы 31 °С [11, 12]. В частности, на метке ребра между мозгом и ликвором задавали постоянную температуру 35,5 °С, между ликвором и черепом – 35 °С, между черепом и кожно-апоневротическим лоскутом – 34 °С. На ребре КЭМ в области основания черепа ввиду его локализации в плоскости симметрии задавали отсутствие теплового потока через указанную поверхность. После геометрической и физической идеализации задачи находили начальное температурное поле КЭМ (рисунок 1).

На следующем этапе находили посмертное температурное поле расчетной области. В качестве начального условия указанной задачи нестационарного теплопереноса принимали найденное на первом этапе стационарное прижизненное температурное поле. Актуальный расчетный период принимали равным 24 ч с шагом интегрирования в 600 с. Для моделирования охлаждения в воздушной среде на внешнем ребре модели задавали конвективный теплообмен с воздухом, протекающий по закону Ньютона – Рихмана.

Отладку КЭМ осуществляли путем оценки сходимости кривых охлаждения, полученных с помощью КЭМ и известных математических моделей с общепризнанной валидностью. Валидной математической моделью посмертной динамики краниоэнцефальной температуры является уравнение С. Henssge, основанное на феноменологическом законе охлаждения Marshall – Hoare в условиях постоянной температуры внешней среды:

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

а также обобщение данного закона на случай линейно изменяющейся внешней температуры:

$$T = T_{a0} + \beta \left( t - \frac{1}{k} \right) + \left( T_0 - T_{a0} + \frac{\beta}{k} \right) e^{-kt} + \frac{k}{k - p} \times \left( \left( T_0 - T_{a0} - \frac{\beta(kt - pt - 1)}{k - p} \right) e^{-pt} - \left( T_0 - T_{a0} + \frac{\beta}{k - p} \right) e^{-kt} \right), \quad (2)$$

где  $T$  – текущая температура в точке начала координат, °С;  $T_0$  – начальная температура в точке начала координат в момент наступления смерти, равная 37,2 °С;  $T_a$  – текущая температура внешней среды, °С;  $T_{a0}$  – температура внешней среды в момент наступления смерти, °С;  $\beta$  – почасовая скорость изменения температуры внешней среды, °С/ч;  $t$  – ДНС, ч;  $k$  и  $p$  – постоянные охлаждения и температурного плато, равные 0,127 и 1,07 соответственно [3].

Валидной моделью охлаждения поверхностных тканей тела является уравнение, основанное на законе охлаждения Ньютона – Рихмана при постоянной внешней температуре:

$$T = T_a + (T_0 - T_a) e^{-kt}, \quad (3)$$

а также обобщение данного закона на случай линейно изменяющейся внешней температуры:

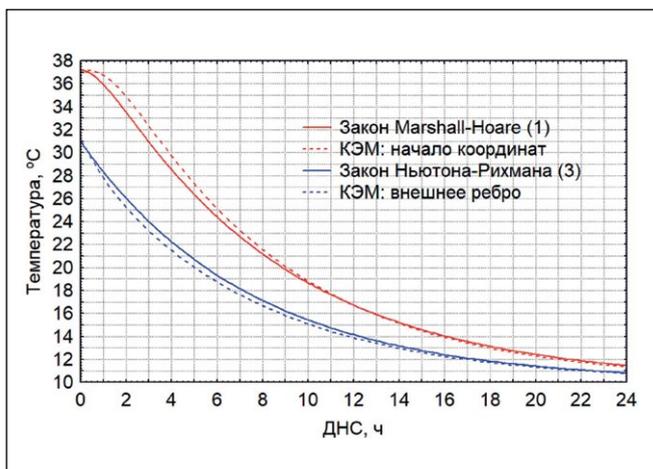
$$T = T_{a0} + \beta t - \frac{\beta}{k} + \left( T_0 - T_{a0} + \frac{\beta}{k} \right) e^{-kt}, \quad (4)$$

где  $T$  – текущая температура поверхности тела, °С;  $T_0$  – начальная температура поверхности тела в момент наступления смерти, равная 31 °С;  $k$  – коэффициент пропорциональности, связанный с коэффициентом теплоотдачи формулой

$$k = \alpha S / C,$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/[м<sup>2</sup>·К];  $S$  – площадь поверхности тела, через которое передается тепло, м<sup>2</sup>;  $C$  – теплоемкость тела, Дж/К, а остальные обозначения те же [3].

В ходе отладки КЭМ находили посмертное температурное поле расчетной области при различных значениях коэффициента теплоотдачи воздуха в условиях естественной конвекции, а именно в диапазоне от 5 до 25 Вт/(м<sup>2</sup>·К), при разных значениях постоянной, а также линейно изменяющейся температуры внешней среды. Коэффициент теплоотдачи принимали постоянным и одинаковым для всей поверхности внешнего ребра геометрической модели (за исключением поверхности в области основания черепа с нулевым тепловым потоком). В ходе отладки также рассматривали одновременное задание радиационного теплообмена с различными значениями коэффициента излучения поверхности кожи от 0,95 до 0,99. Для каждой комбинации граничных условий сравнивали термограммы для точек начала координат и внешнего ребра КЭМ с таковыми, полученными на основе уравнений (1)–(4).



**Рисунок 2.** Термограммы в точках начала координат и на внешнем ребре КЭМ в сравнении с кривыми охлаждения для данных точек в соответствии с законами охлаждения (1) и (3) при постоянной внешней температуре, равной 10 °С.

**Figure 2.** Thermograms at the origin and on the outer edge points of the finite element model in comparison with the cooling curves for these points in accordance with the cooling laws (1) and (3) at a constant ambient temperature equal to 10 °С.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

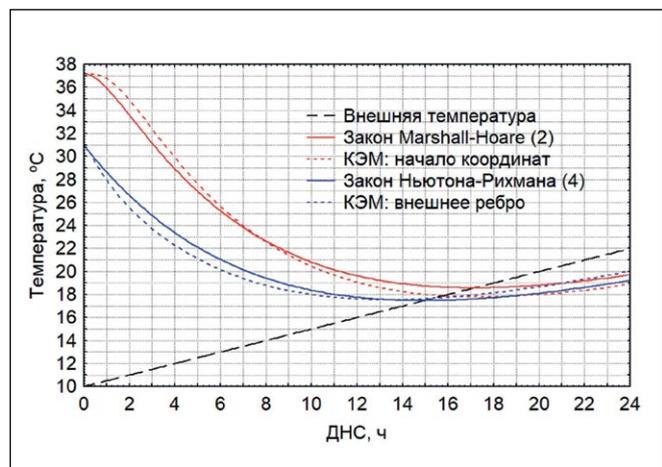
В ходе моделирования была построена масштабированная двумерная КЭМ, предназначенная для нахождения посмертного температурного поля головы при различных условиях ее охлаждения. Расчетная схема КЭМ включала 5 блоков, представлявших собой 5 актуальных анатомических слоев головы, а также 12 вершин и 16 соединяющих их ребер. Построенная сетка состояла из 254 элементов треугольной формы (**рисунок 1**).

Отладка КЭМ в стандартных условиях охлаждения показала ее максимальную точность при задании на внешнем ребре только конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи, равным 6 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Под стандартными условиями понималось охлаждение данной области мертвого тела в воздушной среде при отсутствии принудительной конвекции и контакта с другими физическими телами.

Сравнение кривых охлаждения валидных моделей в условиях постоянной температуры внешней среды с термограммами КЭМ показало их хорошую сходимость (**рисунок 2**).

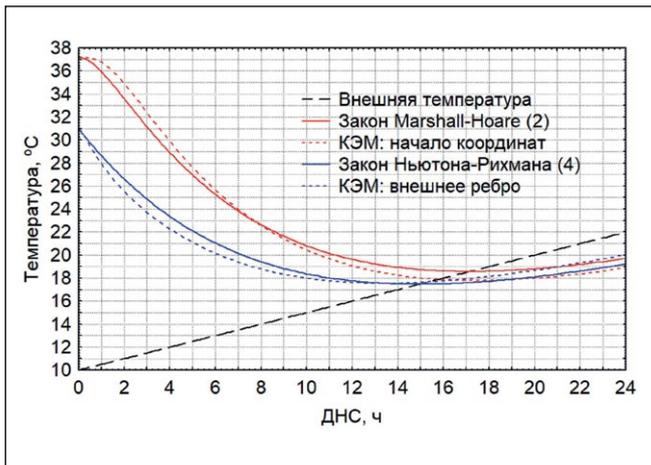
Аналогичный результат был получен и для охлаждения в условиях линейно изменяющейся внешней температуры (**рисунок 3**).

В ходе валидации КЭМ было также изучено влияние на погрешности определения ДНС возможных отклонений реального начального температурного поля от его средних значений, заданных в модели. В зависимости от величины и знака указанных отклонений различают гипер-, нормо- и гипотермический варианты танатогенеза [2, 3]. Для этого рассматриваемая задача нестационарного теплопереноса была решена еще дважды: при гипер- и гипотермическом вариантах танатогенеза. Для моделирования указанных вариантов было изменено начальное распределение температур в различных тканях головы.



**Рисунок 3.** Термограммы в точках начала координат и на внешнем ребре КЭМ в сравнении с кривыми охлаждения для данных точек в соответствии с законами охлаждения (2) и (4) при линейно изменяющейся со скоростью 0,5 °С/ч внешней температуре.

**Figure 3.** Thermograms at the origin and on the outer edge points of the finite element model in comparison with the cooling curves for these points in accordance with the cooling laws (2) and (4) at an ambient temperature linearly varying at a rate of 0.5 °С/h.



**Рисунок 4.** Термограммы в точке начала координат КЭМ при гипер-, нормо- и гипотермическом вариантах танатогенеза.  
**Figure 4.** Thermograms at the origin point of the finite element model in hyper-, normal- and hypothermic variants of thanatogenesis.

В частности, для моделирования гипотермического типа танатогенеза на всех внутренних и внешних ребрах КЭМ (за исключением ребра в области основания черепа с нулевым тепловым потоком) были заданы температуры, превышавшие на  $1^\circ\text{C}$  таковые для нормотермического типа. Для моделирования гипотермического типа танатогенеза, наоборот, на всех перечисленных ребрах КЭМ были заданы температуры на  $1^\circ\text{C}$  меньше, чем для нормотермического типа. Сравнение термограмм в точке начала координат, полученных для различных вариантов танатогенеза, показало, что отклонения начального температурного поля от заданного в рамках КЭМ оказывают влияние на оценку ДНС только в первые 2 ч после смерти, затем их влияние резко уменьшается, а после 5 ч практически исчезает (**рисунок 4**). При этом погрешности оценки ДНС определяются отклонениями от заданных начальных значений только температуры глубоких отделов мозга. Вариабельность начальных температур остальных анатомических слоев головы на оценку ДНС практически не влияет.

Таким образом, построенная двумерная КЭМ является валидной и в отличие от феноменологических моделей (1) и (2) масштабируемой. Она позволяет учитывать реальные размеры расчетной области и толщину образующих ее анатомических слоев, находить посмертное температурное поле для любой ее точки в полярных координатах, а также учитывать практически любые условия охлаждения. Например, КЭМ дает возможность учитывать любые посмертные изменения внешней температуры, а также возможную температурную зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи. Для этого при настройке КЭМ вместо констант следует задавать формулы, описывающие указанные зависимости. Предварительно необходимо описать посмертную динамику внешней температуры или зависимость от нее коэффициента теплоотдачи какой-либо функцией. Также можно просто ввести в соответствующие поля в окнах свойств

КЭМ зарегистрированные в определенные моменты посмертного периода значения данных показателей.

Помимо естественной и принудительной конвекции на внешнем ребре КЭМ возможно одновременно или раздельно задавать и радиационный теплообмен, а также учитывать комбинации нескольких граничных условий, наблюдающиеся, например, при одновременном нахождении расчетной области в двух средах или при ее контакте с другими физическими телами. Для этого следует задавать на соответствующих участках внешнего ребра КЭМ иные значения конвективной теплоотдачи или дополнять геометрию КЭМ новыми блоками, моделирующими другую среду или контактирующее с головой трупа физическое тело. В последнем случае потребуется задание в КЭМ значений теплофизических параметров дополнительного блока.

## ■ ОБСУЖДЕНИЕ

Наступление смерти сопровождается выключением механизмов поддержания температурного гомеостаза, вследствие чего температурное поле тела человека становится нестационарным. Основным методом нахождения температурного поля мертвого тела в процессе его охлаждения является МКЭ, алгоритм которого предполагает создание задачи, задание геометрии и теплофизических свойств КЭМ, а также граничных условий и построение сетки конечных элементов [13]. В соответствии с изложенным алгоритмом в рамках проведенного исследования предложена двумерная КЭМ, предназначенная для определения температурного поля тканей головы в раннем посмертном периоде.

В отличие от других КЭМ, ориентированных на нахождение ректального температурного профиля, расчетная область разработанной модели базируется на анатомической структуре, отличающейся минимальной вариабельностью размерных характеристик и тканевого состава. Данная КЭМ является масштабируемой и позволяет учитывать реальную геометрию и размеры расчетной области и составляющих ее тканевых структур. Инвазивный характер регистрации краниоэнцефальной температуры позволяет при отклонениях конца игольчатого термощупа от точки начала координат, располагающейся в толще валика мозолистого тела, точно определять и задавать в КЭМ полярные координаты диагностической точки, в которой было осуществлено измерение температуры. Для этого следует в качестве расчетной области использовать сечение полусферы, проходящее через валик мозолистого тела и конец раневого канала от игольчатого термощупа, ориентированное перпендикулярно плоскости основания черепа.

При использовании разработанной КЭМ возможно задание практически любых условий охлаждения тела, включающих изменения внешней температуры, комбинированные условия теплообмена, зависимость теплофизических параметров биотканей от температуры внешней среды. Отладка КЭМ показала устойчивость результатов определения ДНС к отклонениям

начального температурного поля расчетной области от своего физиологического уровня. Данный факт подтверждается также и результатами других исследований, согласно которым по мере увеличения ДНС погрешности ее оценивания, вызванные отклонениями начальной температуры, уменьшаются, а затем почти полностью исчезают [14].

При сравнении результатов нахождения посмертного температурного поля с валидными математическими моделями установлена необходимость задания на внешнем ребре КЭМ при стандартных условиях охлаждения лишь конвективного теплообмена с воздухом при значении коэффициента теплоотдачи, равном  $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Таким образом, разработанная КЭМ позволяет не учитывать в расчетах радиационный теплообмен и наличие внутренних источников тепловой энергии. Данное обстоятельство является положительным качеством КЭМ, поскольку на практике очень сложно измерить суммарную плотность теплового потока от всех источников суправитальной активности, расположенных в пределах рассматриваемой геометрической модели, а также описать ее зависимость от длительности постмортального периода.

Суммарная оценка всех источников суправитальной активности в трупе ростом 175 см и массой 75 кг при температуре внешней среды  $5^\circ\text{C}$  составляет до 500 кДж [15]. При этом теплотери за счет теплового излучения в первый час после смерти составляют примерно от 200 кДж для тел с ростом 165 см и массой 50 кг в условиях охлаждения при постоянной температуре  $20^\circ\text{C}$  до 600 кДж для тел ростом 185 см и массой 100 кг в условиях охлаждения при постоянной температуре  $5^\circ\text{C}$ . В следующие 7–18 ч посмертного периода указанные теплотери составляют около 100 кДж/ч [16].

Таким образом, теплотери при охлаждении мертвого тела за счет радиации примерно равны суммарному количеству тепловой энергии, производимой всеми внутренними источниками суправитальной активности. С учетом изложенного целесообразно не учитывать в свойствах КЭМ радиационные теплотери и наличие внутреннего источника тепловой энергии, полагая их взаимное количественное равенство.

Важным преимуществом двумерной КЭМ перед ее трехмерными аналогами является сохранение высокой точности расчетов при простоте геометрии и небольшой сегментации расчетной области. При однородных условиях охлаждения поверхности головы двумерная геометрическая модель в силу осевой симметрии вообще может быть представлена одним квадрантом. Это позволяет реализовать двумерную КЭМ с помощью распространяемых бесплатных приложений, в том числе и с понятным русскоязычным интерфейсом, например, ELCUT Student, не предъявляющих высоких

системных требований к компьютеру и не требующих наличия у оператора специальной математической и инженерной подготовки.

Оценка предельных погрешностей определения ДНС с помощью КЭМ может быть осуществлена путем дополнительного построения двух термограмм с заданными односторонне направленными предельными отклонениями всех актуальных теплофизических параметров. Пример подобного интервального оценивания влияния на итог определения ДНС предельных отклонений начальной краниоэнцефальной температуры от заданной в рамках КЭМ значения на  $1^\circ\text{C}$  приведен на рисунке 4.

К факторам, ограничивающим применение результатов исследования, следует отнести затруднительность или даже невозможность учета в полевых условиях ряда особенностей охлаждения мертвого тела, прежде всего, инсоляции и изменений его положения. Иные сложные условия охлаждения (например, наличие головного убора, контакт с иными физическими телами) могут быть учтены, но потребуют модификации геометрии модели и знания теплофизических свойств соответствующих материалов.

Еще одной проблемой практического использования КЭМ является правильный выбор коэффициента конвективного теплообмена с подвижными средами с различными скоростями движения своих частиц (ветер, течение), значение которого для воздуха и воды может варьировать в очень широких пределах. Решение указанной задачи может быть получено в ходе контролируемого экспериментального охлаждения биоманекенов в термокамере.

## ■ ВЫВОДЫ

1. Разработана масштабируемая двумерная КЭМ нахождения посмертного температурного поля головы, позволяющая учитывать любые изменения внешней температуры, комбинированные условия теплообмена и зависимость теплофизических параметров биотканей от температуры внешней среды.

2. Предложенная КЭМ характеризуется устойчивостью результатов определения ДНС к отклонениям начального температурного поля расчетной области от своего физиологического уровня.

3. Двумерный характер КЭМ, простота ее геометрии и небольшая сегментация расчетной области позволяют реализовать ее в судебно-медицинской экспертной практике с помощью бесплатно распространяемых приложений, не предъявляющих высоких системных требований к компьютеру и не требующих наличия у оператора специальных математических и инженерных знаний. ■

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Potente S, Henneicke L, Schmidt P. Prism - A novel approach to dead body cooling and its parameters. *Forensic Sci Int.* 2021;325:110870. doi: 10.1016/j.forsciint.2021.110870
2. 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):2479-87. doi: 10.1007/s00414-021-02635-7
3. Nedugov GV. Mathematical modeling of the corpse cooling. Kazan, 2021. (In Russ.). [Недугов Г.В. Математическое моделирование охлаждения трупа. Казань, 2021]. ISBN 978-5-00118-790-5
4. Smart JL. Estimation of time of death with a fourier series unsteady-state heat transfer model. *J Forensic Sci.* 2010;55(6):1481-7. doi: 10.1111/j.1556-4029.2010.01467.x
5. Igari Y, Hosokai Y, Funayama M. Rectal temperature-based death time estimation in infants. *Leg Med (Tokyo).* 2016;19:35-42. doi: 10.1016/j.legalmed.2016.02.002
6. Mall G, Eisenmenger W. Estimation of time since death by heat-flow Finite-Element model. Part I: method, model, calibration and validation. *Leg Med (Tokyo).* 2005;7(1):1-14. doi: 10.1016/j.legalmed.2004.06.006
7. Mall G, Eisenmenger W. Estimation of time since death by heat-flow Finite-Element model part II: application to non-standard cooling conditions and preliminary results in practical casework. *Leg Med (Tokyo).* 2005;7(2):69-80. doi: 10.1016/j.legalmed.2004.06.007
8. Wilk LS, Hoveling RJM, Edelman GJ, et al. Reconstructing the time since death using noninvasive thermometry and numerical analysis. *Sci Adv.* 2020;6(22):eaba4243. doi: 10.1126/sciadv.aba4243
9. Weiser M, Erdmann B, Schenk S, et al. Uncertainty in temperature-based determination of time of death. *Heat Mass Transfer.* 2018;54:2815-26. doi: 10.1007/s00231-018-2324-4
10. Smart JL. Use of postmortem temperature decay response surface plots of heat transport in the human eye to predict time of death. *J Forensic Sci.* 2014;59(2):390-8. doi: 10.1111/1556-4029.12333
11. Nelson DA, Nunneley SA. Brain temperature and limits on transcranial cooling in humans: quantitative modeling results. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1998;78(4):353-9. doi: 10.1007/s004210050431
12. Zhu L, Diao C. Theoretical simulation of temperature distribution in the brain during mild hypothermia treatment for brain injury. *Med Biol Eng Comput.* 2001;39(6):681-7. doi: 10.1007/BF02345442
13. Schenk 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. doi: 10.1007/s00414-016-1523-0
14. Muggenthaler H, Hubig M, Schenk S, Mall G. Influence of hypo- and hyperthermia on death time estimation - A simulation study. *Leg Med (Tokyo).* 2017;28:10-14. doi: 10.1016/j.legalmed.2017.06.005
15. Mall G, Hubig M, Beier G, et al. Supravital energy production in early post-mortem phase - estimate based on heat loss due to radiation and natural convection. *Leg Med (Tokyo).* 2002;4(2):71-8. doi: 10.1016/s1344-6223(02)00005-6
16. Mall G, Hubig M, Beier G, Eisenmenger W. Energy loss due to radiation in postmortem cooling. Part A: quantitative estimation of radiation using the Stefan-Boltzmann law. *Int J Legal Med.* 1998;111(6):299-304. doi: 10.1007/s004140050175