

УДК 40.62:616-091.1

DOI: 10.34215/1609-1175-2022-3-81-84



Конечно-элементный анализ влияния внутричерепных кровоизлияний на посмертную краниоэнцефальную температуру

Г.В. Недугов

Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

Цель исследования: оценка степени локального влияния внутричерепных кровоизлияний различных типов на посмертную краниоэнцефальную температуру методом конечно-элементного моделирования посмертного температурного поля головы. **Материалы и методы.** С помощью приложения ELCUT 6.5 на основе метода конечных элементов осуществлено моделирование геометрии и посмертного теплообмена анатомических структур головы человека при отсутствии и наличии оболочечных и внутримозговых кровоизлияний. **Результаты.** Разработана двумерная конечно-элементная модель нахождения посмертного температурного поля головы при различных внутричерепных кровоизлияниях в условиях конвективного теплообмена с воздушной средой. Доказано отсутствие существенного непосредственного влияния внутричерепных кровоизлияний на краниоэнцефальную температуру. **Заключение.** Краниоэнцефальная температура может использоваться для определения давности смерти при наличии любых внутричерепных кровоизлияний. Для исключения ошибок, связанных с возможным умиранием по гипертермическому типу, а также вызванных локальным воздействием внутримозговых кровоизлияний, целесообразно применять краниоэнцефальную температуру для определения давности наступления смерти только после ее снижения менее 36 °C.

Ключевые слова: давность наступления смерти, метод конечных элементов, внутричерепные кровоизлияния, краниоэнцефальная температура

Поступила в редакцию: 03.03.22. Получена после доработки 14.07.22. Принята к печати 17.07.22.

Для цитирования: Недугов Г.В. Конечно-элементный анализ влияния внутричерепных кровоизлияний на посмертную краниоэнцефальную температуру. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2022;3:81–84. doi: 10.34215/1609-1175-2022-3-81-84

Для корреспонденции: Недугов Герман Владимирович – д-р мед. наук, доцент кафедры судебной медицины Самарского государственного медицинского университета (443099, Самара, ул. Чапаевская, 89); ORCID: 0000-0002-7380-3766; тел. +7 (929) 701-94-93; e-mail: nedugovh@mail.ru

Finite element analysis of the effect of intracranial hemorrhages on postmortem cranioencephalic temperature

G.V. Nedugov

Samara State Medical University, Samara, Russia

Aim. To assess the local influence of intracranial hemorrhages of various types on postmortem cranioencephalic temperature by means of finite element modeling of the postmortem temperature field of the head. **Methods.** The geometry and postmortem heat exchange of human head anatomical structures were simulated using the ELCUT 6.5 software application based on the finite element method, both in the absence and presence of meningeal and intraventricular hemorrhages. **Results.** A two-dimensional finite element model for determining the postmortem temperature field of the head in the presence of various intracranial hemorrhages under the conditions of convective heat exchange with the air was developed. The absence of a significant direct effect of intracranial hemorrhages on cranioencephalic temperature was confirmed. **Conclusions.** Cranioencephalic temperature can be used to determine the postmortem interval in the presence of any intracranial hemorrhages. In order to exclude errors associated with possible hyperthermic death, as well as those caused by local exposure to intraventricular hemorrhages, cranioencephalic temperature should be used to determine the postmortem interval only after its reduction to values lower than 36 °C.

Keywords: postmortem interval, finite element method, intracranial hemorrhages, cranioencephalic temperature

Received 03 March 2022. Revised 14 July 2022. Accepted 14 July 2022

For citation: Nedugov G.V. Finite element analysis of the effect of intracranial hemorrhages on postmortem cranioencephalic temperature. *Pacific Medical Journal*. 2022;3:81–84. doi: 10.34215/1609-1175-2022-3-81-84

Corresponding author: German V. Nedugov, MD, Assoc. Prof. of the Department of Forensic Medicine of the Samara State Medical University (89, Chapayevskaya Str., Samara, 443099, Russian Federation); ORCID: 0000-0002-7380-3766; phone: +7 (929) 701-94-93; e-mail: nedugovh@mail.ru

Термометрическое определение давности наступления смерти (ДНС) характеризуется большим разнообразием реализующих его методов, отличающихся по структуре лежащих в их основе математических моделей охлаждения трупа и локализации

диагностических точек [1, 2]. Одним из наиболее востребованных методов определения ДНС по-прежнему остается метод, предложенный немецким судебным медиком С. Henssge, основанный на измерении краниоэнцефальной температуры (КЭТ) [3].

Для его реализации на практике необходимо однократно измерить КЭТ трупа и температуру внешней среды, а также оценить начальную КЭТ в момент наступления смерти, значение которой согласно рекомендациям С. Henssge следует принимать равным 37,2 °С [3].

В норме начальное (прижизненное) температурное поле головного мозга приближенно является стационарным и однородным за исключением его поверхностного слоя, в котором наблюдается монотонное снижение КЭТ [4, 5]. Однако при наличии травматических и нетравматических внутримозговых кровоизлияний (ВЧК), температурное поле головного мозга уже при жизни перестает быть однородным за счет локального повышения температуры в их области [6, 7]. Поэтому наличие ВЧК, как и иных церебральных повреждений, считается противопоказанием для использования КЭТ в целях определения ДНС.

Между тем степень влияния ВЧК различных типов на посмертную динамику КЭТ до сих пор не изучена. В первую очередь это было связано со сложностями сбора эмпирических данных. Однако в настоящее время указанная задача может быть решена с помощью компьютерного моделирования, основным инструментом которого, позволяющим численно подтверждать или опровергать теоретические выкладки практически во всех областях науки, является метод конечных элементов.

В связи с изложенным целью настоящего исследования явилась оценка степени локального влияния ВЧК различных типов на посмертную КЭТ методом конечно-элементного моделирования посмертного температурного поля головы.

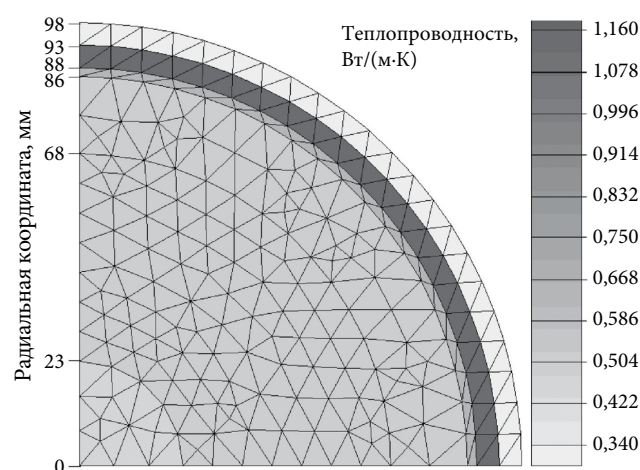


Рис. 1. Геометрическая модель головы с построенной сеткой конечных элементов и последовательным указанием по направлению от точки начала координат до внешнего ребра модели границ следующих слоев: внутримозгового кровоизлияния, глубинных отделов мозга с однородной температурой, поверхностного слоя мозга с монотонным снижением температуры, ликвора субарахноидального пространства, черепа и кожно-апоневротического слоя.

Материалы и методы исследования

Методологический дизайн исследования представляет собой сравнительное двумерное конечно-элементное моделирование посмертного температурного поля головы при наличии и отсутствии ВЧК различных типов, выполненное с использованием приложения ELCUT 6.5.

Геометрию интактного мозгового отдела головы из-за ее осевой симметрии представляли в виде квадранта, проходящего через центр многослойной полусферы сечения с равномерным распределением четырех однородных слоев: кожно-апоневротического лоскута, костей свода черепа, ликвора субарахноидального пространства и головного мозга (рис. 1). Толщину, плотность, теплопроводность и теплоемкость указанных анатомических слоев головы, а также теплофизические параметры крови задавали согласно установленным данным, опубликованным в специальной литературе [4, 5, 8]. Построение сетки конечных элементов осуществляли в соответствии с описанной ранее методикой [8]. При нахождении начального температурного поля на метках ребер конечно-элементной модели (КЭМ) задавали значения температуры, присущие интактным тканям головы при температуре поверхности кожи 31 °С [4, 5, 8]. Начальную температуру глубинных отделов мозга принимали, как и в рамках феноменологической модели С. Henssge, равной 37,2 °С. В целях моделирования локальной гипертермии в зоне ВЧК для оболочечных и внутрижелудочковых кровоизлияний начальную температуру задавали на 2 и 1,2 °С выше таковой соответствующих локализаций интактного мозга.

При моделировании ВЧК учитывали их внутрижелудочковую и оболочечную локализацию. К оболочечным относили субарахноидальные, эпи- и субдуральные кровоизлияния толщиной 2 мм, занимающие всю конвексимальную поверхность головного мозга. Для этого в исходной геометрической модели изменяли теплофизические свойства ликвора на параметры крови. Двустороннее внутрижелудочковое кровоизлияние объемом 25 см³ моделировали путем создания в глубоком слое мозга исходной расчетной области дополнительного полусферического блока с теплофизическими параметрами крови радиусом 23 мм.

После геометрической и физической идеализации задачи в каждом случае находили прижизненное температурное поле головы, которое затем задавали в качестве начального условия посмертного теплообмена. После этого находили посмертное температурное поле головы при наличии двусторонних конвексимальных оболочечных кровоизлияний толщиной 2 мм, а также двусторонних внутрижелудочковых кровоизлияний суммарным объемом 25 см³. При этом актуальный расчетный посмертный период принимали равным 24 ч с шагом интегрирования в 600 с.

На всех этапах решения задачи задавали отсутствие в КЭМ внутренних и внешних источников тепловыделения, а также отсутствие тепловых потоков на метках ребер основания мозга и плоскости симметрии. На внешнем ребре КЭМ задавали конвективный теплообмен с воздушной средой при отсутствии контакта с другими физическими телами, протекающий при постоянной внешней температуре по закону Ньютона – Рихмана. Отладка КЭМ теплообмена интактного мозга показала максимальное соответствие ее температурного поля термограммам феноменологической модели С. Henssge при условии задания на внешнем ребре конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи, равным $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Поэтому моделирование посмертного теплообмена головы при наличии всех типов ВЧК проводили с использованием данного значения коэффициента конвективной теплоотдачи. Во всех моделях под КЭТ понимали температуру в точке начала координат (радиальная и угловая полярные координаты равны нулю).

Результаты

Анализ картины посмертного температурного поля показал, что наличие двусторонних конвексительных оболочечных кровоизлияний само по себе никак не влияет на КЭТ. Термограммы в точках начала координат с наличием оболочечных кровоизлияний и при их отсутствии полностью совпадали. Для объяснения данного явления во всех геометрических моделях были проведены контуры интегрирования, направленные от центра начала координат к внешнему ребру. Термограмма вдоль контура интегрирования при наличии оболочечных кровоизлияний отличалась от термограммы интактного мозга только в начале процесса охлаждения и только на уровне локализации кровоизлияний (участок с радиальной координатой от 70 до 93 мм). Затем зона кровоизлияний быстро остывала и уже через час после смерти термограммы вдоль интегрирующих контуров обеих КЭМ полностью совпадали (рис. 2). Увеличение толщины конвексительного оболочечного кровоизлияния до 8 мм не оказывало какого-либо существенного влияния на температурное поле головы.

В отличие от оболочечных, внутрижелудочковые кровоизлияния сопровождалось значительным повышением температуры в точке начала координат. Однако, несмотря на повышенную начальную КЭТ, охлаждение глубоких отделов мозга протекало с плохо выраженным температурным плато, вследствие чего уже через час после смерти термограммы в точке начала координат при наличии и отсутствии внутрижелудочковых кровоизлияний совпадали (рис. 2).

Таким образом, наличие внутрижелудочковых кровоизлияний объемом до 25 см^3 влияет на динамику КЭТ лишь в первый час после наступления смерти и то при условии повышения ее начальной величины. В последующем кривые охлаждения глубоких отделов

мозга при наличии внутрижелудочковых кровоизлияний не отличаются от таковых с их отсутствием.

Обсуждение

Проведенное исследование показало ограниченное по времени (до 1 ч после наступления смерти) и сугубо локальное влияние оболочечных ВЧК на температурное поле головы и отсутствие их непосредственного влияния на посмертную динамику температуры в диагностической точке начала координат. Наличие внутрижелудочковых кровоизлияний ввиду их локализации непосредственно в области диагностической точки может сопровождаться повышением начальной КЭТ. Однако из-за выраженного градиента температур охлаждение вентрикулярной зоны мозга при этом протекает довольно быстро, вследствие чего уже через час после наступления смерти наличие внутрижелудочковых кровоизлияний на КЭТ существенного влияния также не оказывает.

В целом полученные данные соответствуют таковым для посмертного температурного поля головы при открытой проникающей черепно-мозговой травме с наличием очаговых субарахноидальных кровоизлияний и ушиба мозга [8]. Данное обстоятельство позволяет использовать КЭТ для термометрического определения ДНС при наличии любых ВЧК.

Однако результаты выполненного моделирования будут верны только в том случае, если наличие ВЧК не приведет к умиранию по гипертермическому типу. Такой вариант танатогенеза возможен, поскольку лихорадка является нередким осложнением оболочечных кровоизлияний [7, 9-11]. Поэтому для исключения ошибок определения ДНС, связанных с возможным умиранием по гипертермическому типу, а также вызванных локальным воздействием внутрижелудочковых кровоизлияний, целесообразно применять КЭТ в целях определения ДНС только после ее снижения менее 36°C . После достижения указанного

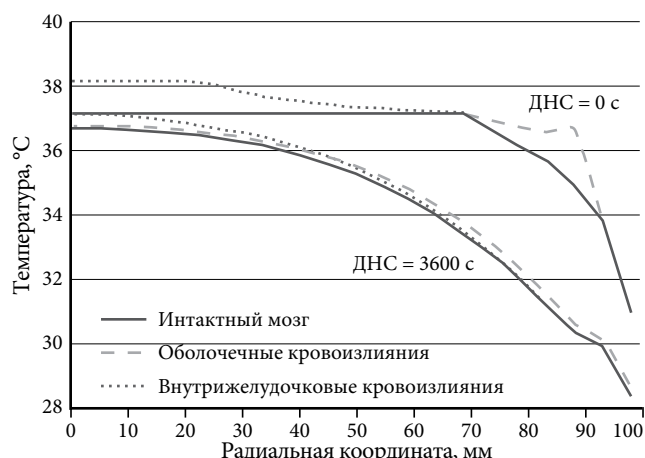


Рис. 2. Термограммы вдоль контуров интегрирования КЭМ интактного мозга и с наличием ВЧК в момент и через 1 ч после наступления смерти при постоянной внешней температуре 10°C .

температурного порога внутрижелудочковые кровоизлияния не являются противопоказанием к термометрическому определению ДНС по методу С. Henssge, а потенциальное влияние возможных отклонений начальной КЭТ от заданной значительно снижается.

Также посмертная динамика КЭТ при ВЧК, по локализации или объему отличающихся от параметров, заданных в построенной модели, может отличаться от расчетной. Тем не менее данные отличия не будут значимыми, поскольку в рамках выполненного моделирования были заданы размеры и объемы внутрижелудочковых и оболочечных ВЧК, близкие к предельным.

Заключение

1. Методом конечно-элементного моделирования показано отсутствие в условиях конвективного посмертного теплообмена непосредственного влияния конвексительных оболочечных кровоизлияний на посмертную динамику КЭТ.

2. Наличие внутрижелудочковых кровоизлияний может сопровождаться повышением начальной КЭТ. Однако охлаждение глубоких отделов мозга при этом протекает с плохо выраженным температурным плато, вследствие чего уже через час после наступления смерти наличие внутрижелудочковых кровоизлияний на КЭТ существенного влияния не оказывает.

3. КЭТ может использоваться для определения ДНС при наличии любых ВЧК. Для исключения ошибок определения ДНС, связанных с возможным умиранием по гипертермическому типу, а также вызванных локальным воздействием внутрижелудочковых кровоизлияний, целесообразно применять КЭТ в целях определения ДНС только после ее снижения менее 36 °С.

Конфликт интересов: автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Литература / References

1. Madea B. Methods for determining time of death. *Forensic Sci Med Pathol.* 2016;12(4):451–85. doi: 10.1007/s12024-016-9776-y
2. Laplace K, Baccino E, Peyron PA. Is infrared thermometry suitable for the determination of the time since death based on ear temperature? A comparative study of two measurement methods. *Int J Legal Med.* 2021;135(4):1669–74. doi: 10.1007/s00414-021-02579-y
3. Henssge C, Madea B. Estimation of the time since death. *Forensic Sci Int.* 2007;165(2-3):182–4. doi: 10.1016/j.forsciint.2006.05.017
4. 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
5. 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
6. Oh JY, Jo K, Joo W, Yoo DS, Park H. Temperature Difference between Brain and Axilla according to Body Temperature in the Patient with Brain Injury. *Korean J Neurotrauma.* 2020;16(2):147–56. doi: 10.13004/kjnt.2020.16.e40
7. Addis A, Gaasch M, Schiefecker AJ, Kofler M, Ianosi B, Rass V, Lindner A, Broessner G, Beer R, Pfäusler B, Thomé C, Schmutzhard E, Helbok R. Brain temperature regulation in poor-grade subarachnoid hemorrhage patients – A multimodal neuromonitoring study. *J Cereb Blood Flow Metab.* 2021;41(2):359–68. doi: 10.1177/0271678X20910405
8. Недугов Г.В. Конечно-элементная оценка влияния открытой проникающей черепно-мозговой травмы на посмертное температурное поле головы. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врач и Здоровье.* 2022;12(2):125–31. [Nedugov GV. Finite element assessment of the effect of open penetrating craniocerebral trauma on the postmortem temperature field of the head. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ" (Rehabilitation, doctor and health).* 2022;12(2):125–31. (In Russ.)] doi: 10.20340/vmirvz.2022.2.ICTM.1
9. Fischer M, Schiefecker A, Lackner P, Frank F, Helbok R, Beer R, Pfäusler B, Schmutzhard E, Broessner G. Targeted Temperature Management in Spontaneous Intracerebral Hemorrhage: A Systematic Review. *Curr Drug Targets.* 2017;18(12):1430–40. doi: 10.2174/1389450117666160703161511
10. Hall A, O'Kane R. The Extracranial Consequences of Subarachnoid Hemorrhage. *World Neurosurg.* 2018;109:381–92. doi: 10.1016/j.wneu.2017.10.016
11. Bogossian EG, Taccone FS. Fever management in acute brain injury. *Curr Opin Crit Care.* 2022;28(2):130–7. doi: 10.1097/MCC.0000000000000918