

УДК 617.7–073.65–092.9.002.54/.56

Оригинальное устройство и подходы к изучению распределения температуры в различных отделах глаза

Л. И. Анатычук¹, академик НАН и МОН Украины, Н. В. Пасечникова², д-р мед. наук, проф., член-корр. НАМН Украины, О. С. Задорожный², канд. мед. наук, Р. Э. Назаретян¹, врач-офтальмолог, В. В. Мирненко², зав. организационно-методическим отделом, Р. Р. Кобылянский², канд. физ.-мат. наук, Н. В. Гаврилюк²

¹ Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, г. Черновцы, Украина

² ГУ «Институт глазных болезней и тканевой терапии им. В. П. Филатова НАМН Украины», г. Одесса, Украина

E-mail: rudolph84@mail.ru

Ключевые слова: температура глаза кролика, термоэлектрическое устройство, термопара.

Ключові слова: температура ока кролика, термоелектричний пристрій, термопара.

Актуальность. В литературе встречаются данные о динамике биохимических процессов, а также гемо- и гидродинамических показателей в здоровом глазу при воздействии на него высоких и низких температур [1, 2, 8]. Однако до настоящего времени вопрос о распределении температуры в различных отделах глаза животных и человека остаётся недостаточно изученным. Для измерения температуры глаза использовались бесконтактные и контактные методы. Бесконтактные методы измерения (например, инфракрасная термография) позволили оценить лишь температуру наружной поверхности глаза [6]. Для измерения внутриглазной температуры применялись контактные инвазивные методы, был разработан ряд устройств и измерительных зондов [3, 5, 7]. Предложенные устройства и методики измерений имели значительные недостатки, поскольку измерительные зонды изготавливались из материалов с высокой теплопроводностью, что приводило к ошибкам измерений температуры, а применявшиеся способы хирургического доступа оказывали существенное влияние на регистрируемые данные [4].

Вступ. На сьогоднішній день питання розподілу температури в різних відділах ока людини і тварин залишається недостатньо вивченим.

Мета. Розробити пристрій для вимірювання внутрішньоочної температури та вивчити в експерименті закономірність розподілу температури в різних відділах ока кролика.

Матеріал та методи. Експеримент проводився на 11 кроликах (22 ока). Для вимірювання температури був розроблений термоелектричний пристрій, що складається з модуля реєстрації температур, вимірювальних зондів діаметром 0,7 мм і комп'ютера з програмним забезпеченням.

Результати. При температурі навколишнього середовища 23,8 °С температура нижнього кон'юнктивального склепіння склала 37,65 °С; верхнього кон'юнктивального склепіння 36,82 °С; поверхні рогівки 34,41 °С; передньої камери ока 35,97 °С; передньої частини скловидного тіла 36,96 °С; середньої частини скловидного тіла 37,40 °С; задньої частини скловидного тіла 37,50 °С; сітківки/судинної оболонки 37,64 °С; субтенонового простору 37,78 °С. Різниця температур між зовнішньою поверхнею рогівки і передньою камерою ока склала 1,56 °С, між зовнішньою поверхнею рогівки і сітківкою 3,23 °С.

Висновки. Розроблено термоелектричний пристрій, що дозволяє проводити вимірювання температури в різних відділах ока. Використовуючи розроблений пристрій, в експерименті *in vivo* вивчено розподіл температури в оці кролика.

Следовательно, разработка новых измерительных устройств с учетом уже известных недостатков, а также оптимизация способов хирургического доступа при измерении температуры в различных отделах глаза позволит повысить точность регистрируемых показателей. Понимание закономерностей распределения внутриглазной температуры, а также оценка зависимости между температурными показателями наружных и внутренних отделов глаза при разных условиях внешней среды, в норме и при патологии, при воздействии на глаз физических факторов, позволят разработать математическую модель распределения внутриглазной температуры. Разработанную компьютерную модель можно будет использовать как альтернативный метод оценки внутриглазной температуры, например, при моделировании тепловых процессов в глазу под влиянием различных физических факторов.

© Л. И. Анатычук, Н. В. Пасечникова, О. С. Задорожный, Р. Э. Назаретян, В. В. Мирненко, Р. Р. Кобылянский, Н. В. Гаврилюк, 2015

Цель. Разработать устройство для измерения внутриглазной температуры и изучить в эксперименте закономерность распределения температуры в различных отделах глаза кролика.

Материал и методы

Работа проводилась совместно Институтом термоэлектричества НАН и МОН Украины и ГУ «Институт глазных болезней и тканевой терапии им. В. П. Филатова НАМН Украины». Для измерения температуры в различных отделах глаза было разработано термоэлектрическое устройство, которое состоит из микропроцессорного модуля регистрации температуры, термопарных измерительных микрозондов, стыковочного устройства, а также компьютера с программным обеспечением для визуализации и регистрации температурных показателей в режиме реального времени. Микрозондовые датчики температуры изготовлены на основе термопар L-типа (хромель-копель). Зонд датчика размещен в корпусе стандартной канюли из политетрафторэтилена диаметром 0,7 мм. Спай термопары приварен к теплоконцентратору из медицинской нержавеющей стали и закреплен на конце иглы канюли. Стык кабеля и канюли герметизирован медицинским силиконовым герметиком, который является химически нейтральным и допускает термическую или химическую стерилизацию изделия (как обычного медицинского инструмента). Стыковочное устройство оборудовано медным теплоконцентратором, в котором размещен прецизионный датчик температуры (платиновый термометр сопротивления). С его помощью измеряется температура «холодных» концов термопар — опорная температура. Микропроцессорный модуль регистрации температур выполнен на основе прибора Triton-9004T, который имеет 8-канальный 24-разрядный аналогово-цифровой преобразователь. Разработанное устройство позволяет проводить измерения (с периодичностью 4 секунды) в диапазоне температур от -10°C до $+120^{\circ}\text{C}$ с погрешностью измерения $\pm 0,08^{\circ}\text{C}$.

Всем экспериментальным животным проводилась биомикроскопия и офтальмоскопия. При проведении хирургических вмешательств применялся наркоз в виде внутримышечных инъекций 10 % раствора тиопентала натрия в дозе 1,0 мл на 1 кг массы животного. На подготовительном этапе к хирургическому вмешательству и в ходе операции в оба глаза проводились инстилляциии 0,5 % раствора проксиметакaina гидрохлорида с периодичностью 20 минут. Следуя правилам асептики и антисептики, после хирургического вмешательства кроликам проводили инстилляциии 20 % раствора сульфацил-натрия, 0,3 % раствора офлоксацина.

В эксперименте *in vivo* на 11 кроликах (22 глаза) породы шиншилла (возраст 1 год, масса 3,5–4 кг) после эпibuльбарной анестезии измерялась температура наружной поверхности роговицы путем прямого контакта с наконечником зонда. Регистрация температуры осуществлялась в режиме реального времени через каждые 4 секунды, и выполнялось не менее пяти измерений в каждом отделе. Далее температура регистрировалась при помещении измерительного зонда в нижний свод конъюнктивы, а затем в верхний свод конъюнктивы. После введения кролика в наркоз температура измерялась повторно на наружной поверхности роговицы и в сводах конъюнктивы, а далее, после формирования хирургического доступа, температура регистрировалась в передней камере глаза, в переднем, среднем и заднем отделах стекловидного тела, в сетчатке/сосудистой оболочке и в субтеноновом пространстве. В переднюю камеру

измерительный зонд вводился через туннельный парацентез размером 0,7 мм, в стекловидное тело — через склеротомию диаметром 0,6 мм в проекции плоской части цилиарного тела в 2–3 мм от лимба. В субтеноново пространство термозонд вводился через конъюнктивальный разрез в верхне-внутреннем квадранте.

Также проводилась регистрация ректальной температуры кролика, температуры и относительной влажности воздуха в помещении. Экспериментальные исследования проводились при температуре окружающей среды в среднем $(23,8 \pm 0,6)^{\circ}\text{C}$, относительной влажности воздуха в среднем $(80,7 \pm 1,6) \%$, при средней ректальной температуре кролика $(38,73 \pm 0,94)^{\circ}\text{C}$.

Работа с экспериментальными животными проводилась согласно Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для исследовательских и других научных целей (Страсбург, 1986), и закону Украины «О защите животных от жестокого обращения» (2006).

Для статистической обработки данных исследования была использована программа Statistica 10.0.

Результаты

Температура различных отделов глаза, зарегистрированная в эксперименте, представлена в таблице 1.

При анализе полученных результатов значимых различий между температурными показателями правого и левого глаза экспериментальных животных выявлено не было. Это наблюдение относится как к наружным отделам глаза, в которых проводились измерения (нижний конъюнктивальный свод, верхний конъюнктивальный свод, наружная поверхность роговицы), так и к внутренним отделам (передняя камера, различные отделы стекловидного тела, сетчатка/сосудистая оболочка, субтеноново пространство).

В эксперименте было подтверждено существование перепада температур между разными отде-

Таблица 1. Распределение температуры в различных отделах глаза кролика

Отдел глазного яблока и придаточного аппарата	Среднее значение t^* , $^{\circ}\text{C} \pm SD$	
	OD	OS
нижний конъюнктивальный свод	$37,74 \pm 0,66$	$37,57 \pm 0,74$
верхний конъюнктивальный свод	$36,89 \pm 0,67$	$36,76 \pm 0,68$
наружная поверхность роговицы	$34,40 \pm 0,90$	$34,41 \pm 0,73$
передняя камера глаза	$35,80 \pm 0,78$	$36,20 \pm 0,67$
передняя часть стекловидного тела	$36,74 \pm 0,70$	$37,19 \pm 0,80$
средняя часть стекловидного тела	$37,31 \pm 0,88$	$37,49 \pm 0,80$
задняя часть стекловидного тела	$37,43 \pm 0,89$	$37,56 \pm 0,89$
сетчатка/сосудистая оболочка	$37,57 \pm 0,87$	$37,72 \pm 0,89$
субтеноново пространство	$37,72 \pm 0,78$	$37,82 \pm 0,79$

* t — температурные данные, полученные после введения кролика в наркоз.

лами глаза. Как и следовало ожидать, наименьшая температура была зарегистрирована на уровне наружной поверхности роговицы. Температура наружной поверхности роговицы, измеренная после введения животных в наркоз, в среднем составила $(34,41 \pm 0,80)^\circ\text{C}$, что значимо ниже по сравнению с температурой в нижнем и верхнем конъюнктивальных сводах ($p < 0,0001$). После введения в наркоз температура в нижнем конъюнктивальном своде составила $(37,65 \pm 0,70)^\circ\text{C}$, и была значимо выше по сравнению с температурой в верхнем конъюнктивальном своде ($36,82 \pm 0,66)^\circ\text{C}$ ($p < 0,0001$).

Температура в передней камере глаза кролика повысилась по сравнению с температурой наружной поверхности роговицы и в среднем была определена на уровне $(35,97 \pm 0,73)^\circ\text{C}$ ($p < 0,0001$). Следовательно, разность температур между наружной поверхностью роговицы и передней камерой глаза составила $1,56^\circ\text{C}$.

Температура в переднем отделе стекловидного тела повысилась по отношению к температуре в передней камере в среднем до $(36,96 \pm 0,77)^\circ\text{C}$ ($p < 0,0001$), в среднем отделе стекловидного тела — до $(37,40 \pm 0,87)^\circ\text{C}$ ($p < 0,0001$). Температурный градиент между передней камерой глаза и средним отделе стекловидного тела составил $1,43^\circ\text{C}$.

Максимальная внутриглазная температура зафиксирована при контакте измерительного зонда с сетчаткой и составила в среднем $(37,64 \pm 0,87)^\circ\text{C}$. В субтеноновом пространстве была зарегистрирована температура $(37,78 \pm 0,77)^\circ\text{C}$, которая оказалась несколько выше температуры сетчатки ($p = 0,65$). Таким образом, разность температур между наружной поверхностью роговицы и сетчаткой составила $3,23^\circ\text{C}$, между наружной поверхностью роговицы и субтеноновым пространством $3,37^\circ\text{C}$.

При проведении эксперимента были зарегистрированы два случая интраоперационных ос-

ложнений в виде частичного гемофтальма во время формирования хирургического доступа, а также один случай отслоения сетчатки в послеоперационном периоде.

Обсуждение. В 1962 г. В. Schwartz и М. R. Feller опубликовали работу, посвященную измерению температуры в различных отделах глаза белых новозеландских кроликов. Для измерения внутриглазных температур авторы применили устройство на основе термистора и несколько модификаций измерительных зондов. В качестве зонда для регистрации внутриглазных температур использовалась металлическая игла длиной 7,62 см и диаметром 0,7 мм. Измерение в различных отделах глаза осуществлялось путем постепенного введения зонда по оси глаза через роговицу, хрусталик, стекловидное тело и сетчатку в орбиту. Температура окружающей среды колебалась от 22 до 24°C , относительная влажность воздуха составила 33–53 %. Ректальная температура после введения в наркоз у семи экспериментальных животных в среднем составила $39,13^\circ\text{C}$. В результате измерения были получены следующие средние показатели: температура наружной поверхности роговицы $(32,30 \pm 0,49)^\circ\text{C}$, нижний конъюнктивальный мешок $(38,74 \pm 0,54)^\circ\text{C}$, передняя камера $(32,98 \pm 0,74)^\circ\text{C}$, хрусталик $(35,42 \pm 1,0)^\circ\text{C}$, средний отдел стекловидного тела $(36,56 \pm 0,9)^\circ\text{C}$, сетчатка/хориоидея $(37,03 \pm 0,86)^\circ\text{C}$, орбита $(37,68 \pm 0,71)^\circ\text{C}$. Кроме того, авторы не зафиксировали значимых различий в температурных показателях правого и левого глаза животных во всех отделах глаза кроме наружной поверхности роговицы [7].

В 1983 г. D. R. May с соавторами определяли влияние перфузии передней камеры ирригационными растворами разной температуры на изменения температуры в отделах глаза у голландских кроликов. В работе был использован термометр, изготовленный на основе термопары и представляющий собой металлический зонд с тупым наконечником диаметром 0,64 мм и длиной 2,5 см. Погрешность измерения термометра составляла $\pm 1^\circ\text{C}$. Температура воздуха равнялась 25°C . Ректальная температура после введения экспериментальных животных в наркоз в среднем составила $39,4^\circ\text{C}$. Авторы представили следующие средние исходные показатели температуры в отделах глаза: передняя камера $32,5^\circ\text{C}$, передний отдел стекловидного тела $35,0^\circ\text{C}$, средний отдел стекловидного тела $35,5^\circ\text{C}$, задний отдел стекловидного тела $36,6^\circ\text{C}$, сетчатка $36,8^\circ\text{C}$ [5].

Следует отметить, что в данных работах использовались металлические зонды, обладающие высокой теплопроводностью. Кроме того, в работе D. R. May с соавторами, перед измерением температуры для осуществления процессов ирригации/аспирации передней камеры выполнялось два прокола роговицы металлическими иглами диаметром

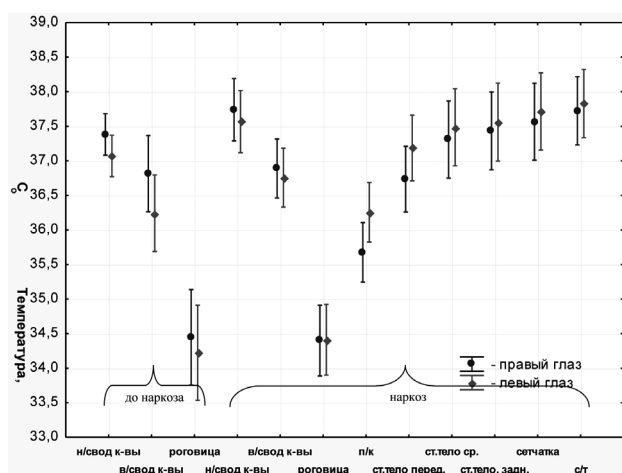


Рис. 1. Показатели температуры в различных отделах глаза кролика.

0,7 и 0,8 мм, а затем один из проколов расширялся металлическими ножницами до 3 мм. По данным экспериментальных (*in vitro*) и теоретических исследований, проведенных I. Fatt и J. F. Forester в 1972 г., известно, что показатели температуры тканей глаза, зарегистрированные металлическими зондами, по сравнению со значениями температуры, зафиксированными зондами с низкой теплопроводностью, могут оказаться ниже на несколько градусов [4].

В нашей работе температура, зарегистрированная в передней камере глаза, составила 35,97°C и оказалась выше по сравнению с опубликованными ранее данными (32,5°C в работе D. R. May и 33°C в работе B. Schwartz) приблизительно на 3–3,5°C. Существенные различия в температурных показателях, зарегистрированных в передней камере глаза, по всей видимости, обусловлены небольшим объемом влаги передней камеры кролика, который составляет лишь 0,25–0,3 мл, а также с непосредственным контактом роговицы с окружающей средой. Поэтому введение в переднюю камеру металлического инструмента при формировании хирургического доступа и металлического измерительного зонда приводит к ощутимой потере тепла и регистрации более низких температур. В нашей работе измерительный зонд был изготовлен из политетрафторэтилена с низким показателем теплопроводности, а также формировался минимальный хирургический доступ, необходимый лишь для введения термозонда, что способствовало снижению теплопотери в момент измерения температуры и получению более высоких показателей.

В меньшей степени теплопотеря заметна при измерении температуры в стекловидном теле, поскольку его объем у кролика составляет 1–1,5 мл и

отсутствует прямой контакт стекловидного тела с внешней средой. Температура в среднем отделе стекловидного тела в нашем исследовании составила 37,4°C и в меньшей степени отличалась от данных вышеупомянутых авторов (35,5 и 36,56°C).

Таким образом, на регистрируемые внутриглазные температурные показатели в значительной степени оказывает влияние объем хирургического вмешательства при формировании доступа к различным отделам глаза и применение хирургического инструментария, изготовленного из материалов, обладающих высокой теплопроводностью. Значительное влияние на регистрируемые данные оказывает также материал, из которого изготовлен зонд для измерения внутриглазных температур.

Выводы

1. Разработано термоэлектрическое устройство с компьютерным программным обеспечением, позволяющее проводить измерения температуры в различных отделах глаза с высокой точностью в режиме реального времени.
2. Разработан термоэлектрический измерительный зонд из материала с низким показателем теплопроводности, использование которого повышает точность измерения путем снижения потери тепла в ходе регистрации внутриглазной температуры.
3. Используя разработанное устройство, в эксперименте *in vivo* изучена закономерность распределения температуры в глазу кролика и подтверждено существование перепада температур между разными отделами глаза. Так, при температуре окружающей среды 23,8°C разность температур между наружной поверхностью роговицы и сетчаткой глаза кролика составила 3,23°C.

Литература

1. Влияние умеренной локальной гипотермии на гемо- и гидродинамические показатели здоровых глаз / В. И. Лазаренко, Г. Ф. Чанчиков, И. М. Корниловский, В. Г. Гайдабура // Офтальмол. журн. — 1976. — № 6. — С. 419–422.
2. Влияние локальной гипотермии на обмен углеводов здорового глаза в эксперименте / В. И. Лазаренко, С. В. Петрова, И. М. Корниловский, В. Г. Гайдабура // Офтальмол. журн. — 1977. — № 3. — С. 227–230.
3. Локальная СВЧ-гипертермия в комплексном лечении злокачественных опухолей век и орбиты / А. С. Буйко, В. А. Елагина, С. И. Мазохин, И. М. Логай, И. Я. Шитова // Мед. радиология, 1988. — № 8. — С. 7–11.
4. Fatt I. Errors in eye tissue temperature measurements when using a metallic probe / I. Fatt, J. F. Forester // Exp. Eye Res., 1972. — Vol. 14. — P. 270–276.
5. May D. R. Ocular hypothermia: anterior chamber perfusion / D. R. May, R. J. Freedland // British Journal of Ophthalmology. — 1983. — Vol. 67. — P. 808–813.
6. Purslow C. Ocular surface temperature: a review / C. Purslow, J. Wolffsohn // Eye and Contact Lens, 2005. — Vol. 31. — P. 117–123.
7. Schwartz B. Temperature gradients in the rabbit eye / B. Schwartz, M. R. Feller // Investigative Ophthalmology, 1962. — Vol. 1(4). — P. 513–521.
8. Shamshad M. A. Changes in central retinal artery blood flow after ocular warming and cooling in healthy subjects / M. A. Shamshad, A. K. Amitava, I. Ahmad // Indian. J. Ophthalmol. — 2010. — Vol. 58. — P. 189–194.

Поступила 05.07.2015