

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-35-44

Оригинальная статья /Original Paper

Моделирование температурного поля при тепловом воздействии на передний отрезок  
глазного яблока человека

Ш.А. Юсуфов<sup>1</sup>, Т.Э. Саркаров<sup>1</sup>, Д.А. Магомедов<sup>1</sup>, Д.В. Евдулов<sup>1</sup>, П.Н. Суракатова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет,  
<sup>1</sup>367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

<sup>2</sup>Дагестанский государственный медицинский университет,  
<sup>2</sup>367012, г. Махачкала, пл. Ленина, 1, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка модели для определения температурного поля глазного яблока человека при тепловом воздействии на его передний отрезок. **Метод.** Разработана модель для определения температурного поля глазного яблока человека при воздействии на его передний отрезок. **Результат.** Получены зависимости температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на его передний отрезок, а также графики распределения температуры вдоль оптической оси глазного яблока при приложении теплового потока. **Вывод.** Разработанная модель позволяет учитывать теплофизические характеристики всех основных структур глаза человека, а также показывает эффективность проведения температурного массажа цилиарного тела и хрусталика.

**Ключевые слова:** термоэлектрическое устройство, глазное яблоко человека, тепловое воздействие, математическая модель, численный эксперимент, температура

**Для цитирования:** Ш.А. Юсуфов, Т.Э. Саркаров, Д.А. Магомедов, Д.В. Евдулов, П.Н. Суракатова. Моделирование температурного поля при тепловом воздействии на передний отрезок глазного яблока человека. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):35-44. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-35-44

Modeling of the temperature field under thermal action on the anterior segment  
of the human eyeball

Sh.A. Yusufov<sup>1</sup>, T.E. Sarkarov<sup>1</sup>, D.A. Magomedov<sup>1</sup>, D.V. Evdulov<sup>1</sup>, P.N. Surakatova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Daghestan State Technical University,  
<sup>1</sup>70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

<sup>2</sup>Daghestan State Medical University,  
<sup>2</sup>1 Lenin Square, Makhachkala 367012, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop a mathematical model for determining the temperature field of a human eyeball under thermal influence on its anterior segment. **Method.** A mathematical model has been developed to determine the temperature field of a human eyeball when exposed to its anterior segment. **Result.** The temperature dependences of characteristic points inside the eyeball on time during cyclic exposure to heat flow on the anterior segment are obtained, as well as graphs of temperature distribution along the optical axis of the eyeball when applying heat flow. **Conclusion.** The developed mathematical model allows us to take into account the thermophysical characteristics of all the main structures of the human eye, and also shows the effectiveness of temperature massage of the ciliary body and lens.

**Key words:** thermoelectric device, human eyeball, thermal effect, mathematical model, numerical experiment, temperature

**For citation:** Sh.A. Yusufov, T.E. Sarkarov, D.A. Magomedov, D.V. Evdulov, P.N. Surakatova. Modeling of the temperature field under thermal action on the anterior segment of the human eyeball. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 35-44. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-35-44

**Введение.** Температура является одним из важных факторов при лечении самых различных офтальмологических заболеваний. Воздействие теплом используется и при заболеваниях роговицы, конъюнктивы, склеры, стекловидного тела, ожогах, воспалительных процессах и др. Теплолечение в глазной практике применяется в целях оказания противовоспалительного, обезболивающего, антиспазматического и рассасывающего действия. В качестве теплолечебных средств используют парафин, озокерит, грязь, песок, припарки, грелки, фен, компрессы и примочки. Парафин обладает крайне малой теплопроводностью (в 10 раз меньше, чем вода), большой теплоемкостью и компрессионным действием. Влияние парафина обусловлено механическим и термическим факторами: сдавление кожи и глубжележащей ткани после охлаждения парафина и тепловым эффектом [2]. Под влиянием парафиновой аппликации улучшается кровообращение и лимфообращение, повышается местный тканевой обмен, усиливается фагоцитарная функция элементов соединительной ткани, быстрее исчезают отеки, ускоряется рассасывание диффузных помутнений стекловидного тела, улучшается питание и трофика кожи (она становится эластичной и нежной). После экстракции хрусталика ускоряется рассасывание его волокон. Парафинолечение показано при заболеваниях сосудистого тракта, кератите, травмах глаза и их последствиях, остеомиелите стенок глазницы, помутнениях стекловидного тела, травматических иридоциклитах, ожогах кожи век, вяло гранулирующих ранах век и др.

Часто вместо парафина используется озокерит (горный воск). Он обладает большей теплоемкостью, чем парафин, но уступает ему в теплопроводности. Озокерит оказывает такие же лечебные действия, как и парафин, а также и химическое. Методика его применения подобна парафинотерапии [7].

В основе физиологического действия грязелечения лежит нервно-рефлекторный механизм. Его эффект обусловлен термическими, физико-химическими и биологическими особенностями грязей. Лечебная грязь, наложенная на определенный сегмент тела, оказывает влияние не только на подлежащие ткани, но и рефлекторно вызывает реакцию со стороны более отдаленных органов и систем. В настоящее время при глазных болезнях грязевые аппликации применяются на область глаза или на рефлексогенную (воротниковую) зону. Назначают грязелечение при хронических воспалительных процессах в веках и слезных органах, хронических кератитах, рецидивирующих иридоциклитах ревматической этиологии, глубоких инфильтратах в глазнице, параличе мышц, рубцовых изменениях придатков глаза, атрофии зрительного нерва и др. В домашних условиях для теплолечения широко применяют водяные, электрические и химические грелки. Наиболее простое и доступное средство теплолечения – грелка из полотняного мешочка, наполненного разогретым на сковороде песком или льняными семенами, отрубями или просом до температуры 50-55°C [3,4,5,20].

Весьма эффективный метод местного лечения влажным теплом. Широко используют также примочки из вяжущих или дезинфицирующих средств и компрессы. Основное лечебное действие компресса – легкое, но длительное согревание тканей, вызванное ограничением теплоотдачи. На область глаза компресс назначают в целях обезболивания, улучшения кровообращения, усиление прилива и оттока крови при местных воспалительных процессах и посттравматических инфильтратах. Дополнительным средством в комплексном лечении многих глазных заболеваний является и массаж. Основные методы массажа в офтальмологии: поглаживание, растирание, разминание и вибрация (сотрясение). В основе действия массажа лежат сложные физико-химические изменения в состоянии клеточных коллоидов. Под влиянием механических раздражений уменьшается дисперсность коллоидов, набухает протоплазма и увеличивается ее вязкость, расширяется капиллярная сеть в тканях, расправляются резервные капилляры, усиливается кровоснабжение, а следовательно и питание ткани, способствующие скорейшему удалению продуктов обмена. Раздражение нервных рецепторов приводит в действие ряд рефлекторных механизмов, обуславливающих терапевтический эффект массажа. Таким образом, массаж тканей глаза повышает тонус нервно-мышечного аппарата, улучшает крово- и лимфообращение, ускоряет рассасывание отеков и инфильтратов, понижает кожную чувствительность и способствует улучшению трофики тканей [9, 19].

**Постановка задачи.** Тепловое воздействие используется практически во всех терапевтических процедурах. Температурный фактор имеет место и при ультразвуковой терапии, и в электролечении, и при светолечении, водолечении, грязелечении и даже при массаже. Однако

при этом надо отметить отсутствие в офтальмологической практике устройств и аппаратов для локального теплового воздействия. Здесь надо отметить, что необходимо воздействие как высокими, так и умеренно-низкими температурами, так как воздействие низкими температурами не менее важно, чем высокими, а подчас и более эффективно. Традиционно применяемые способы изменения температуры воздействия подразумевают использование примитивных устройств – лампы, грелки, ванночки, примочки и т.д. Все эти приспособления не позволяют осуществить направленное дозированное тепловое воздействие. Недостатком существующих систем можно также считать инерционность протекающих в них тепловых процессов и сложность получения локального теплового воздействия с заданными динамическими характеристиками. Применение ТЭМ, использующих эффект Пельтье [6,16,17], позволяет реализовать различные схемы медицинских устройств для оказания терапевтического воздействия [10,11,13,18].

Целью данной статьи является моделирование температурного поля при тепловом воздействии на передний отрезок глазного яблока человека.

**Методы исследования.** Для нахождения температурного поля глазного яблока необходимо определиться со структурой глаза и его геометрическими размерами. Задачу упрощает то, что глазное яблоко достигает своих постоянных размеров к десятому году жизни человека, и с этого времени размеры глаз человека не сильно отличаются у разных людей. Для того чтобы геометрически описать глазное яблоко, в первую очередь требуется выбрать систему координат. Для упрощения описания задачи была выбрана цилиндрическая система координат  $z, r, \theta$ . Это обосновано тем, что в некотором приближении глазное яблоко представляет собой фигуру вращения, ось симметрии которой совпадает с оптической осью. Если ось  $z$  провести через оптическую ось глаза, то по координате угла  $\theta$  свойства всех сред будут постоянными. Это позволяет нам свести задачу к плоскости  $z-r$  (точнее полуплоскости  $r>0$ ). Таким образом, мы объемная задача сводится к двумерной, решение которой значительно проще. Структурная схема глазного яблока приведена на рисунке 1.

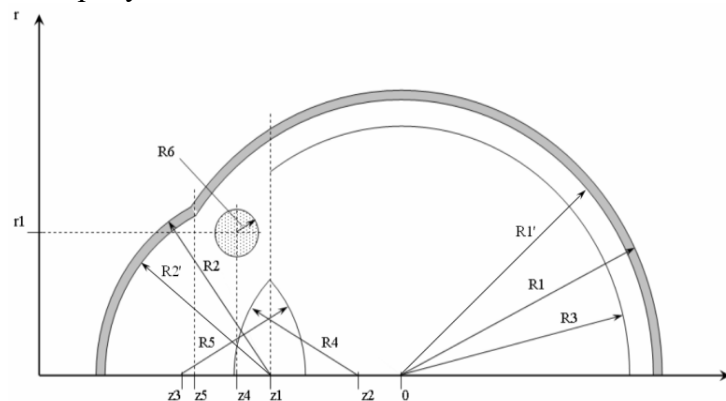


Рис. 1. Структурная схема глазного яблока человека

Fig. 1. Block diagram of the human eyeball

Дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат имеет вид: [1, 15]

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v$$

Так как

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = 0 \rightarrow \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) = 0,$$

то

$$c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v \quad (1)$$

Основными составляющими глазного яблока, рассматриваемыми в нашей задаче стали склера, хрусталик, стекловидное тело, цилиарное тело и глазное дно. Эти области нами выбра-

ны в виду того, что ни оказывают наибольшее влияние на распределение температуры внутри глаза. Для описания взаимодействия глаза с окружающими тканями и средой, его поверхность можно условно разделить на две части: передний и задний отрезки. Передний отрезок – это та часть поверхности глаза, которая при максимально открытых веках соприкасается с воздухом окружающей среды. Задний отрезок – остальная поверхность глазного яблока.

Свойства сред глаза описываются усредненными значениями удельной теплоемкости и удельной теплопроводности, а для цилиарного тела и глазного дна необходимо ввести еще значение объемной плотности тепловыделений как для областей, богатых кровеносными сосудами. Чтобы дать полное математическое описание температурного поля глазного яблока, к уравнению (1) надо добавить условия однозначности, которые содержат геометрические, физические, граничные и временные условия.

Глаз представляет собой две совмещенные шаровые фигуры (одна с радиусом 12 мм, другая – 8 мм), где малая выступает из большей на 2.3 мм. Если ось  $z$  имеет ноль в центре большей шаровой фигуры, то геометрические условия для всех указанных областей и поверхностей глаза будут выглядеть следующим образом:

Склера

$$\begin{cases} (R1-R1')^2 \leq z^2 + r^2 < R1^2 \text{ для } z \geq z5, \\ (R2-R2')^2 \leq (z-z1)^2 + r^2 < R2^2 \text{ для } z < z5, \\ r > 0 \end{cases}$$

Хрусталик

$$\begin{cases} (z-z2)^2 + r^2 \leq R4^2, \\ (z-z3)^2 + r^2 \leq R5^2, \\ r > 0 \end{cases}$$

Глазное дно

$$\begin{cases} z^2 + r^2 = R3^2, \\ r > 0, \\ z \geq z1 \end{cases}$$

Цилиарное тело

$$(z-z4)^2 + (r-r1)^2 \leq R6^2$$

Передний отрезок

$$\begin{cases} z^2 + r^2 = R1^2 \text{ при } z5 \leq z < z1 \\ (z-z1)^2 + r^2 = R2^2 \text{ при } z < z5 \\ r > 0 \end{cases}$$

Задний отрезок

$$\begin{cases} z^2 + r^2 = R^2 \\ r > 0 \\ z \geq z1 \end{cases}$$

Физические условия, определяющиеся теплофизическими параметрами тела, а также распределением внутренних источников теплоты, для глазного яблока имеют вид:

$$c_v = \begin{cases} c_{vxp}, \text{ при } (z-z2)^2 + r^2 \leq R4^2, (z-z3)^2 + r^2 \leq R5^2, r > 0 \\ c_{vскп}, \text{ при } (R1-R1')^2 \leq z^2 + r^2 < R1^2 \text{ для } z \geq z5, (R2-R2')^2 \leq (z-z1)^2 + r^2 < R2^2 \text{ для } z < z5, r > 0 \\ c_{vст} \text{ в остальных случаях} \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{\text{хр}}, \text{ при } (z - z_2)^2 + r^2 \leq R_4^2, (z - z_3)^2 + r^2 \leq R_5^2, r > 0 \\ \lambda_{\text{скл}}, \text{ при } (R_1 - R_1')^2 \leq z^2 + r^2 < R_1^2 \text{ для } z \geq z_5, (R_2 - R_2')^2 \leq (z - z_1)^2 + r^2 < R_2^2 \text{ для } z < z_5, r > 0 \\ \lambda_{\text{ст}} \text{ в остальных случаях} \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_{\text{хр}}, \text{ при } (z - z_2)^2 + r^2 \leq R_4^2, (z - z_3)^2 + r^2 \leq R_5^2, r > 0 \\ \rho_{\text{скл}}, \text{ при } (R_1 - R_1')^2 \leq z^2 + r^2 < R_1^2 \text{ для } z \geq z_5, (R_2 - R_2')^2 \leq (z - z_1)^2 + r^2 < R_2^2 \text{ для } z < z_5, r > 0 \\ \rho_{\text{ст}} \text{ в остальных случаях} \end{cases} \quad (4)$$

$$q_v = \begin{cases} q_{v_{\text{ум}}}, \text{ при } (z - z_4)^2 + (r - r_1)^2 \leq R_6^2 \\ q_{v_{\text{зо}}}, \text{ при } z^2 + r^2 = R_3^2, r > 0, z \geq z_1 \end{cases} \quad (5)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (6)$$

$$t = 310 \text{ K}, z^2 + r^2 = R_3^2, r > 0, z > z_1 \quad (7)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{\substack{z^2 + r^2 = R_1^2 \text{ при } z_5 \leq z < z_1 \\ (z - z_1)^2 + r^2 = R_2^2 \text{ при } z < z_5 \\ r > 0}} = \text{const} \quad (8)$$

где  $n$  - нормаль к изотермической поверхности

$$\frac{\partial t}{\partial n} = \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial t}{\partial z}$$

**Результаты численного эксперимента.** На основе предложенной математической модели произведен численный эксперимент. Наиболее оптимальным подходом явился поиск решения с помощью метода конечных элементов [8,12,21]

На рис. 2 приведена структура глаза с наложенной на нее конечноэлементной сеткой. Размер ячейки сетки подбирается исходя из определяющего размера.

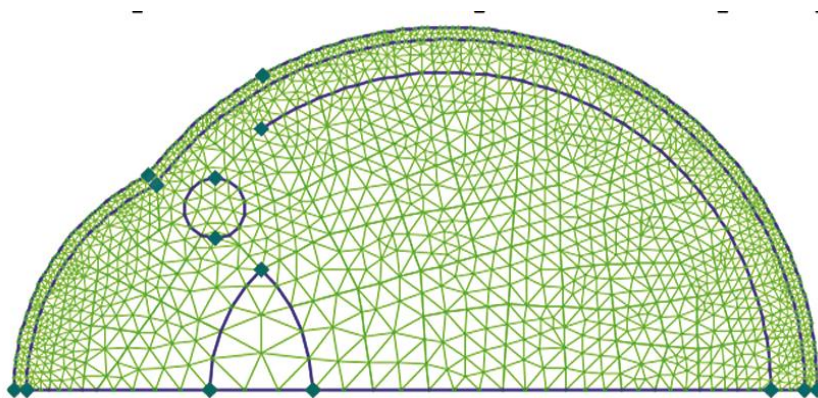


Рис. 2. Структура глазного яблока человека с наложенной конечноэлементной сеткой  
 Fig. 2. The structure of the human eyeball with a superimposed finite element mesh

На рис. 3 – 6 представлены результаты расчета стационарной задачи теплопроводности. Так, на рис. 3 показано поле температур глазного яблока человека при приложении к переднему отрезку теплового потока  $q = -1000 \text{ Вт/м}^2$ , а на рис. 4 – распределение температуры вдоль оптической оси глазного яблока для этого же случая. Как видно из этих рисунков, значение температуры на переднем отрезке при данном тепловом потоке составляет 284 К (температура понизилась на 25 К), но после хрусталика понижение температуры уже не столь ощутимо – всего 4 К.

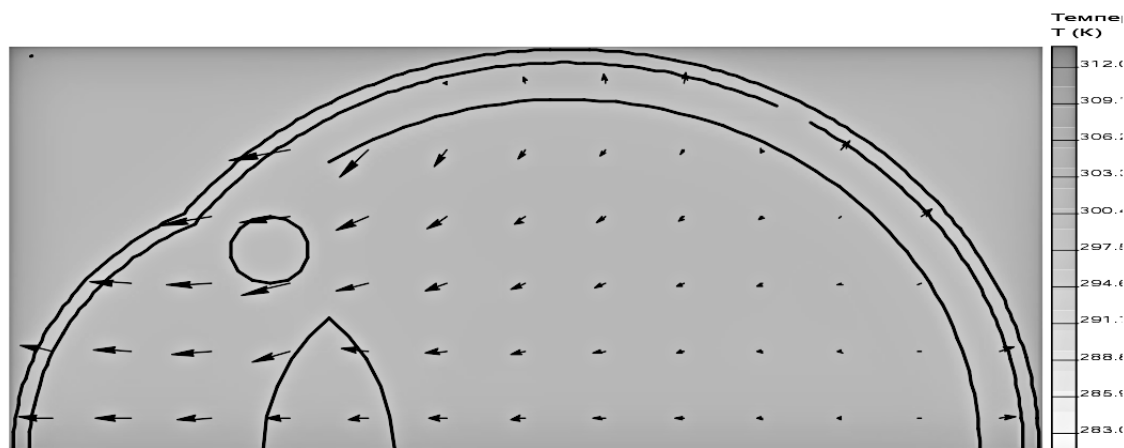


Рис. 3. Температурное поле глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке  $q = -1000 \text{ Вт/м}^2$   
 Fig. 3. Temperature field of the human eyeball with a heat flow in the anterior segment  $q = -1000 \text{ W/m}^2$

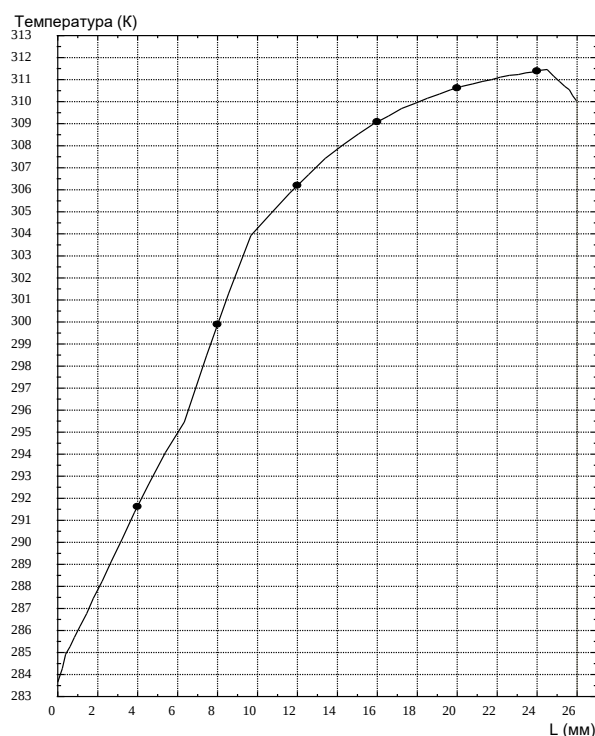


Рис. 4. Распределение температуры вдоль оптической оси глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке  $q = -1000 \text{ Вт/м}^2$   
 Fig. 4. Temperature distribution along the optical axis of the human eyeball with a heat flux in the anterior segment  $q = -1000 \text{ W/m}^2$

Рис. 5 и 6 дают представление о температурном поле глаза при приложении к переднему отрезку теплового потока  $q = +300 \text{ Вт/м}^2$ . Здесь температура склеры у переднего отрезка повысилась до 319 K (46 °C). Дальнейшее повышение температуры в реальной терапевтической процедуре чревато тяжелыми последствиями для органа зрения. Распределение температуры по глубине показывает, что температура быстро падает и достигает минимума на глазном дне. На рис. 7 – 10 дано решение нестационарной задачи. Во всех случаях к переднему отрезку глазного яблока прикладывалась циклическая нагрузка, и наблюдалось изменение температуры по времени в характерных точках глазного яблока.

В качестве таких точек выбраны задняя поверхность склеры у переднего отрезка; середина цилиарного тела; середина хрусталика; глазное дно на оптической оси.

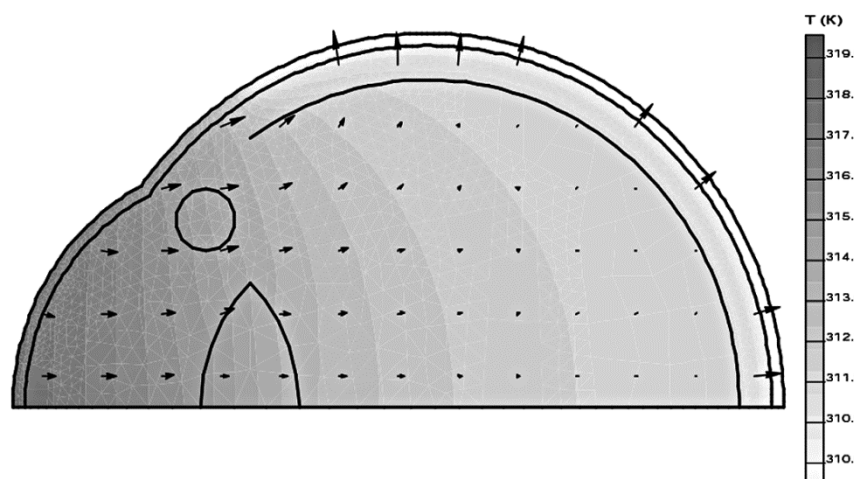


Рис. 5. Температурное поле глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке  $q = +300 \text{ Вт/м}^2$   
 Fig. 5. Temperature field of the human eyeball with heat flow in the anterior segment  $q = +300 \text{ W/m}^2$

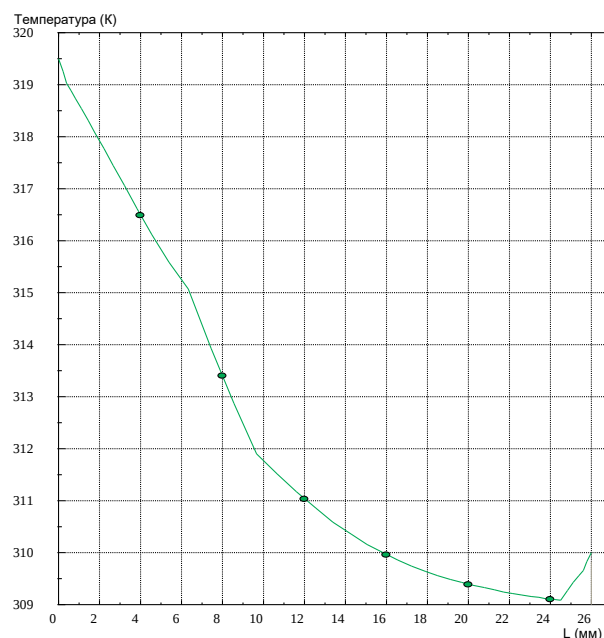


Рис. 6. Распределение температуры вдоль оптической оси глазного яблока человека при тепловом потоке на переднем отрезке  $q = +300 \text{ Вт/м}^2$   
 Fig. 6. Temperature distribution along the optical axis of the human eyeball with a heat flux in the anterior segment  $q = +300 \text{ W/m}^2$

На рис. 7 – 9 бралось циклическое изменение теплового потока, а на рис. 10 – температуры. При анализе этих графиков мы руководствовались тем, что требуется получить максимальные колебания температуры при удержании ее в пределах от  $+10^\circ\text{C}$  до  $+40^\circ\text{C}$ . Так же необходимо достичь максимального изменения температуры в цилиарном теле, как области наиболее богатой кровеносными сосудами и которой необходим температурный массаж в терапевтических целях. Начальным условием для нестационарной задачи, решение которой показано на рис. 7 являлось поле температур, представленное на рис. 5. Здесь мы видим, что температура переднего отрезка глазного яблока колеблется в неудовлетворяющих нас границах, т.е. верхняя температура слишком высокая ( $+48^\circ\text{C}$ ) а нижняя – недостаточно низкая ( $+28^\circ\text{C}$ ).

Следовательно, надо уменьшить положительное значение теплового потока и увеличить отрицательное. Начальным условием для нестационарной задачи, решение которой показано на рис.8 являлось поле температур, представленное на рис. 3. Здесь мы наблюдаем обратный случай: верхняя температура переднего отрезка глазного яблока недостаточно высокая ( $+31^\circ\text{C}$ ), но нижняя нас вполне устраивает

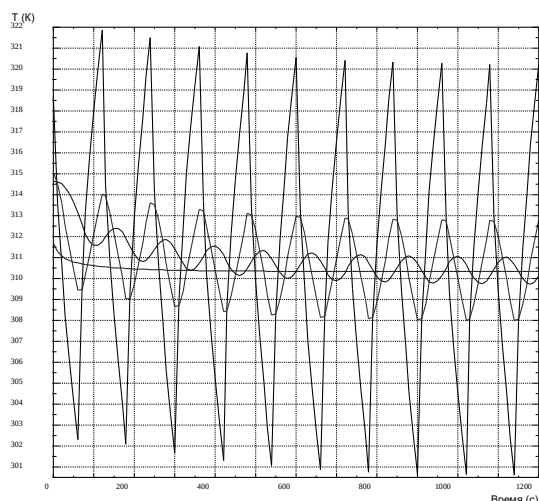


Рис. 7. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд  $q = -1500 \text{ Вт/м}^2$ , 60 секунд  $q = +1500 \text{ Вт/м}^2$ )

1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig. 7. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds  $q = -1500 \text{ W/m}^2$ , 60 seconds  $q = +1500 \text{ W/m}^2$ )

1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

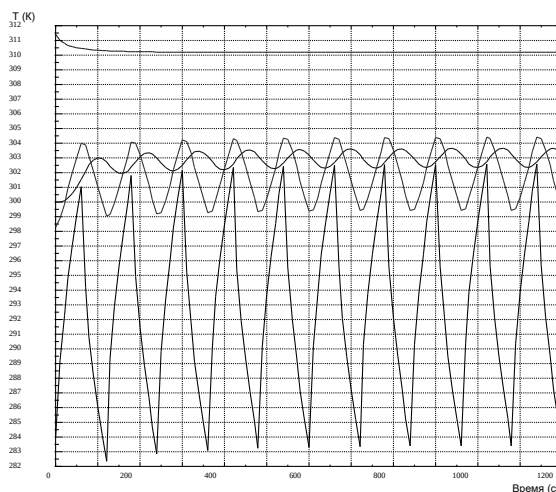


Рис. 8. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд  $q = +1000 \text{ Вт/м}^2$ , 60 секунд  $q = -2000 \text{ Вт/м}^2$ )

1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig.8. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds  $q = +1000 \text{ W/m}^2$ , 60 seconds  $q = -2000 \text{ W/m}^2$ )

1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

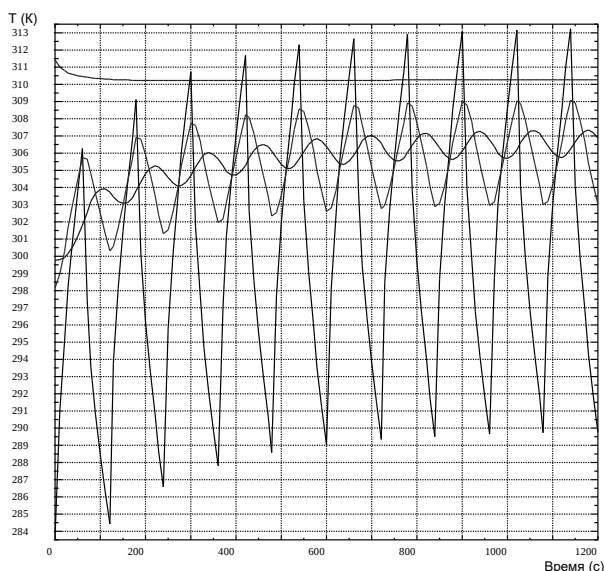


Рис. 9. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд  $q = +1500 \text{ Вт/м}^2$ , 60 секунд  $q = -2000 \text{ Вт/м}^2$ ) 1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig. 9. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds  $q = +1500 \text{ W/m}^2$ , 60 seconds  $q = -2000 \text{ W/m}^2$ ) 1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

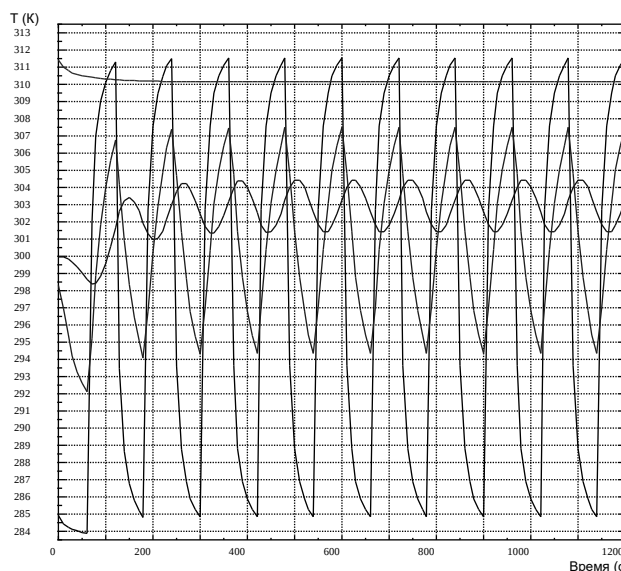


Рис. 10. Зависимость температур характерных точек внутри глазного яблока от времени при циклическом воздействии тепловым потоком на передний отрезок (60 секунд  $T = 283 \text{ K}$ , 60 секунд  $T = 313 \text{ K}$ ) 1 – передний отрезок (внутренняя граница склеры); 2 – середина хрусталика; 3 – середина цилиарного тела; 4 – глазное дно

Fig. 10. Dependence of temperatures of characteristic points inside the eyeball on time under cyclic exposure to heat flow on the anterior segment (60 seconds  $T = 283 \text{ K}$ , 60 seconds  $T = 313 \text{ K}$ ) 1 - anterior segment (inner border of the sclera); 2 - the middle of the lens; 3 - the middle of the ciliary body; 4 - fundus

Значит, надо увеличить положительное значение теплового потока и оставить неизменным начальное условие. Реализация этого предположения представлена на рис. 9. Как мы видим, температура всех точек колеблется в требуемых нами пределах, однако процесс стабилизируется только через 800 секунд от начала циклического воздействия.

На рис. 10 показано временное изменение температур тех же точек при циклическом изменении температуры переднего отрезка глазного яблока (60 секунд температура переднего отрезка составляет 283 К, 60 секунд - 313 К). Здесь процесс стабилизируется практически через 100 секунд, размах температур максимален и находится в требуемых пределах. Изменение температуры цилиарного тела для этого случая максимально (диапазон изменения температуры составляет 15 °С).

**Вывод.** Анализируя полученные зависимости можно сделать следующий вывод: для обеспечения максимальной амплитуды изменения температуры в характерных точках глазного яблока необходимо при максимальном токе питания ТЭМ достичь требуемой температуры на переднем отрезке глазного яблока и затем поддерживать ее на этом уровне в течение заданного времени. Если управление термоэлектрической системой осуществлять по току питания ТЭМ, а не по температуре контактной головки, то процесс теплового воздействия получается нестабильным.

#### **Библиографический список:**

1. Александров, А.А. Теплотехника / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. - М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 880 с.
2. Александров, В.В. Сравнительный анализ технологических преимуществ методов тепло-бальнеотерапии на санаторно-курортном этапе восстановительного лечения / В.В. Александров, В.И. Мизин, В.В. Ежов, О.П. Смолянинова // Курортная медицина. - 2021. - № 1. - С.5-14.
3. Баранов, А.Ю. Перенос теплоты в объекте общего криотерапевтического воздействия / А.Ю. Баранов, Т.А. Малышева, А.В. Савельева, А.Ю. Сидорова // Вестник Международной академии холода. - 2012. - № 2. - С.35-40.
4. Боголюбов, В.М. Техника и методики физиотерапевтических процедур / В.М. Боголюбов, [и др.]. - М.: Бином, 2017. - 464 с.
5. Гуляев, А.А. Оформление аппаратно/физиотерапевтических процедур согласно требованиям Минздрава РФ / А.А. Гуляев // Аппаратная косметология. - 2017. - № 1. - С.14-20.
6. Дашевский, З.М. Новое направление применения термоэлектрических преобразователей энергии / З.М. Дашевский, П.П. Константинов, С.Я. Сипидаров // Физика и техника полупроводников. - 2019. - № 7. - С.875-878.
7. Ежов, В.В. Применение сопочных вод и пелитов грязевых вулканов в санитарно-курортной практике / В.В. Ежов, В.И. Васенко, В.И. Мизин, А.Ю. Царев, Л.Ш. Дудченко, Т.Б. Игнатова // Вестник физиотерапии и курортологии. - 2020. - т.26, № 1. - С.72.
8. Жуков, Н.П. решение задач теплопроводности методом конечных элементов / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова, С.С. Никулин, А.О. Антонов. - Томск: ТГТУ, 2014. - 80 с.
9. Зубкова, С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов / С.М. Зубкова // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 6. - С.3-10.
10. Исмаилов, Т.А. Исследование термоэлектрической системы для локального замораживания тканей гортани / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Т.А. Рагимова // Термоэлектричество. - 2015. - № 2. - С.86-94.
11. Исмаилов, Т.А. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на рефлексогенные зоны / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, С.Г. Магомедова // Медицинская техника. - 2020. - № 1. - С.40-43.
12. Крайнов, А.Ю. Конвективный теплоперенос и теплообмен / А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева. - Томск: STT, 2017. - 80 с.
13. Пат. 2197197 РФ, МКИ А61F7/00. Термоэлектрическое полупроводниковое устройство для теплового воздействия на передний отрезок глазного яблока человека / Т.А.Исмаилов, А-Г.Д. Алиев, Аминова И.Ю. и др. - Заявл. 31.01.2001; Опубл. 27.01.2003.
14. Пономаренко, Г.Н. Восстановительная медицина: фундаментальные основы и перспективы развития / Г.Н. Пономаренко // Физическая и реабилитационная медицина. - 2022. - т. 4, № 1. - С.8-20.
15. Теория теплообмена / Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
16. Цыганов, Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты / Д.И. Цыганов. - М.: САЙНС-ПРЕСС, 2011. - 304 с.
17. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. - New York: Springer, 2013. - 240 p.
18. Hu, B. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives / B. Hu, X.-L. Shi, Z.-G Chen., J. Zou // Chemical engineering journal. - 2022. - Vol. 437. - P.135268.
19. Hua, Zhang Effect of Chinese tuina massage therapy on resting state brain functional network of patients with chronic neck pain / Zhang Hua, Chen Hong, Wang Hao, Li Duoduo, Jia Baolin, Tan Zhongjian, Zheng Bin, Weng Zhiwen // Journal of traditional Chinese medical sciences. - 2015. - № 2. - P.60-68.
20. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. - New York: Springer, 2015. - 441 p.
21. Zaferani, S.H. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement / S.H. Zaferani, R. Ghomashchi, M.W. Sams, Z.-G. Chen // Nano energy. - 2021. - Vol. 90. - P. 106572.

#### References:

1. Alexandrov, A.A. *Teplotekhnika* / A.A. Alexandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [et al.]. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2017; 880 (In Russ).
2. Alexandrov, V.V. Comparative analysis of technological advantages of methods of heat and balneotherapy at the sanatorium-resort stage of restorative treatment / V.V. Alexandrov, V.I. Mizin, V.V. Yezhov, O.P. Smolyaninova. *Resort medicine*. 2021; 1:5-14. (In Russ).
3. Baranov, A.Yu. Heat transfer in the object of general cryotherapeutic influence / A.Yu. Baranov, T.A. Malysheva, A.V. Savelyeva, A.Yu. Sidorova. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2012; 2:35-40. (In Russ).
4. Bogolyubov, V.M. Techniques and methods of physiotherapy procedures / V.M. Bogolyubov, [I. al.]. M.: Binom, 2017; 464. (In Russ).
5. Gulyaev, A.A. Design of hardware/ physiotherapy procedures according to the requirements of the Ministry of Health of the Russian Federation / A.A. Gulyaev. *Hardware cosmetology*. 2017; 1:14-20. (In Russ).
6. Dashevsky, Z.M. New direction of application of thermoelectric energy converters / Z.M. Dashevsky, P.P. Konstantinov, S.Ya. Turpentine. *Physics and technology of semiconductors*. 2019; 7: 875-878. (In Russ).
7. Yezhov, V.V. The use of hill waters and mud volcano pelites in sanitary resort practice / V.V. Yezhov, V.I. Vasenko, V.I. Mizin, A.Yu. Tsarev, L.Sh. Dudchenko, T.B. Ignatova *Bulletin of Physiotherapy and Balneology*. 2020; 26(1):72. (In Russ).
8. Zhukov, N.P. Solution of thermal conductivity problems by the finite element method / N.P. Zhukov, N.F. Maynikova, S.S. Nikulin, A.O. Antonov. Tomsk: TSTU, 2014; 80. (In Russ).
9. Zubkova, S.M. The role of the thermal component in the therapeutic effect of physical factors / S.M. Zubkova // *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 6:3-10. (In Russ).
10. Ismailov, T.A. Investigation of a thermoelectric system for local freezing of laryngeal tissues / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, T.A. Ragimova. *Thermoelectricity*. 2015; 2:86-94. .
11. Ismailov, T.A. Model of a thermoelectric device for thermal effects on reflexogenic zones / T.A. Ismailov, O.V. Evdulov, N.A. Nabiev, S.G. Magomedova. *Medical equipment*. 202; 1:40-43. (In Russ).
12. Krainov, K.M. Moiseeva. Convective heat transfer and heat transfer. Tomsk: STT, 2017; 80. (In Russ).
13. Pat. 2197197 RF, MKI A61F7/00. Thermoelectric semiconductor device for thermal effect on the anterior segment of the human eyeball / T.A. Ismailov, A.-G.D. Aliyev, Aminova I.Yu. et al. - Application 31.01.2001; Publ. 27.01.2003. (In Russ).
14. Ponomarenko, G.N. Restorative medicine: fundamental foundations and prospects of development. *Physical and rehabilitation medicine*. 2022; 4(1):8-20. (In Russ).
15. Theory of heat and mass transfer / Edited by A.I. Leontiev. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2018; 464. (In Russ).
16. Tsyganov, D.I. Cryomedicine: processes and devices. M.: SCIENCE PRESS, 2011; 304. (In Russ).
17. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration. New York: Springer, 2013; 240
18. Hu, B. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives / B. Hu, X.-L. Shi, Z.-G. Chen., J. Zou. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
19. Hua, Zhang Effect of Chinese tuina massage therapy on resting state brain functional network of patients with chronic neck pain / Zhang Hua, Chen Hong, Wang Hao, Li Duoduo, Jia Baolin, Tan Zhongjian, Zheng Bin, Weng Zhiwen // *Journal of traditional Chinese medical sciences*. 2015; 2:60-68.
20. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015; 441.
21. Zaferani, S.H. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement / S.H. Zaferani, R. Ghomashchi, M.W. Sams, Z.-G. Chen. *Nano energy*. 2021; 90: 106572.

#### Сведения об авторах:

Юсуфов Ширали Абдулкадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; yshirali@yandex.ru

Саркаров Таджидин Экберович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и общей электротехники; sarkarovta@mail.ru.

Магомедов Давуд Ахмеднабиевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры биотехнических и медицинских аппаратов и систем; kbimais@dstu.ru .

Евдулов Денис Викторович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; ole-ole-ole@rambler.ru

Суракатова Патимат Нурмагомедовна, студентка; sur71@yandex.ru

#### Information about authors:

Shirali A. Yusufov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; yshirali@yandex.ru

Tadzhidin E.Sarkarov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; sarkarovta@mail.ru.

Davud A., Magomedov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Biotechnical and Medical Devices and Systems; kbimais@dstu.ru

Denis V.Evdulov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ole-ole-ole@rambler.ru

Patimat N. Surakatova, Student; sur71@yandex.ru

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 20.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 09.11.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 09.11.2022.