

УДК 621.362

Математическое моделирование и теоретические исследования термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания

Д-р техн. наук Т. А. ИСМАИЛОВ, д-р техн. наук О. В. ЕВДУЛОВ¹,
А. М. НАСРУЛАЕВ
¹ole-ole-ole@rambler.ru

Дагестанский государственный технический университет

Проведено математическое моделирование и исследование термоэлектрической системы (ТЭС) для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания. В качестве объекта исследований выступает конструкция, содержащая специальную трубку для ввода в полость тела, подвижный зонд с помощью направляющих имеющий возможность перемещаться вдоль трубки, размещенный на торцевой поверхности зонда термоэлектрический модуль (ТЭМ), на противоположной поверхности которого находится влажная трубка. При выполнении операции по извлечению инородного объекта (ИО) из тела человека трубка вводится в полость тела, с помощью зонда ТЭМ холодной поверхностью через губку приводится к контакту с объектом, происходит их сцепление за счет примораживания, затем производится извлечение ИО объекта за счет перемещения зонда в обратном направлении. Рассмотренная модель ТЭС реализована на основе решения задачи теплопроводности, в том числе с учетом фазового перехода вещества, теплофизических характеристик биологического объекта, ИО, охлаждающего ТЭМ. В результате численного эксперимента получены графики изменения температуры в различных точках ТЭС, при введении ее в организм человека для извлечения ИО в зависимости от мощности ТЭС, параметров материалов модуля, внешних условий, определена продолжительность замерзания влажной губки для различных величин холодопроизводительности ТЭМ. Определено, что в устройстве может быть использован стандартный ТЭМ холодопроизводительностью от 4500 Вт/м² до 7000 Вт/м². Указано, что подбор параметров ТЭМ должен ориентироваться на ограничения по эксплуатации прибора, а также медицинские нормы и стандарты во избежание процесса обморожения прилегающих тканей.

Ключевые слова: извлечение инородных объектов, примораживание, термоэлектрическая система, математическое моделирование, теплофизические процессы, численный эксперимент.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 09.12.2020, принята к печати 01.02.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-94-101

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Насрулаев А. М. Математическое моделирование и теоретические исследования термоэлектрической системы для извлечения инородных объектов из тела человека методом примораживания // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 94–101. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-94-101

Mathematical modeling and research of a thermoelectric system for extracting foreign object from the human body by freezing

D. Sc. T. A. ISMAILOV, D. Sc. O. V. YEVDULOV¹, A. M. NASRULAEV

¹ole-ole-ole@rambler.ru

Dagestan state technical university

The article is devoted to mathematical modeling and research of a thermoelectric system (TES) for extracting foreign objects from the human body by freezing. The object of research is a structure containing a special tube for insertion into the body cavity, a movable probe with guides that can move along the tube, and a thermoelectric module (TEM) placed on the end surface of the probe, on the opposite surface of which there is a wet tube. When performing the operation for extraction of foreign object (FO) from the body, the tube is inserted into the body cavity using the probe TEM cold surface through the sponge is in contact with the object is their grip by freezing up, then retrieves FO object by moving the probe in the reverse direction. The TPP model is considered. It is implemented on the basis of solving the problem of thermal conductivity, including taking into account the phase transition of a substance, the thermophysical characteristics of a biological object, FO, cooling TEM. As a result of the numerical experiment, we obtained graphs of temperature changes at various points

of the TES when it is introduced into the human body to extract FO, depending on the power of the TES, the parameters of the module materials, external conditions, and determined the duration of icing of a wet sponge for various values of the TEM cooling capacity. It is determined that the device can use a standard TEM with a cooling capacity from 4500 W/m² to 7000 W/m². It is indicated that the selection of TEM parameters should be guided by restrictions on the operation of the device, as well as medical norms and standards in order to avoid the process of frostbite of adjacent tissues.

Keywords: extraction of foreign objects, freezing, thermoelectric system, mathematical modeling, thermophysical processes, numerical experiment.

Article info:

Received 09/12/2020, accepted 01/02/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-94-101

Article in Russian

For citation:

Ismailov T. A., Yevdulov O. V., Nasrulaev A. M. Mathematical modeling and research of a thermoelectric system for extracting foreign object from the human body by freezing. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 1. p. 94–101. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-94-101

Введение

Организм человека является чрезвычайно сложной системой, каждая его часть выполняет строго определенную функцию. Извне в организм человека должны поступать только жизненно необходимые вещества, например, пища, вода, воздух. Посторонние предметы, случайно попавшие в человеческий организм, могут нанести ему непоправимый вред и нарушить его функции. Поэтому операции по извлечению инородного объекта (ИО) из тела человека являются важными и ответственными мероприятиями, качество и оперативность проведения которых напрямую влияет на здоровье и жизнь человека.

Анализ литературных источников [1]–[5] показал, что в настоящее время извлечение ИО из тела человека производится в основном хирургическим методом с использованием различного оборудования, в состав которого входят разнообразные механические приспособления. В случае извлечения ферромагнитных ИО могут быть также применены намагниченные зонды [4]. Методики проведения операций по извлечению посторонних тел также могут быть разнообразными. Они зависят от местоположения ИО объекта, его формы, размеров и состава и включают в себя такие мероприятия, как отыскание местоположения ИО, приведение его в наиболее удобное для извлечения положение и непосредственно выем из тела человека.

Рассматривая данные методики по извлечению ИО из тела человека и технические средства для их реализации, необходимо отметить их недостаточную надежность, связанную, прежде всего с качеством фиксации постороннего объекта в приспособлении, зависимость от квалификации персонала, проводящего операцию, болезненность и продолжительность процедуры. Поэтому представляет интерес разработки новых технических средств для извлечения ИО из тела человека и методик, реализованных на их основе. В этих условиях перспективным является использование методики локального примораживания ИО к специальному зонду с охлажденным наконечником [5]. Надежность фиксации ИО в извлекающем приспособлении в данном случае будет обеспечиваться за счет высокой степени сцепления наконечника зонда и объекта при их примораживании друг к другу. В качестве источника холода в зонде может быть

использован компактный термоэлектрический модуль (ТЭМ), обладающий высоким ресурсом работы, надежностью, экологичностью, обеспечивающий требуемую мощность для надежной фиксации ИО на извлекающем приспособлении [6]–[10].

Целью работы является математическое моделирование термоэлектрической системы (ТЭС) для извлечения ИО из тела человека методом примораживания, а также теоретическое исследование происходящих в ней процессов теплопередачи.

Конструкция ТЭС для извлечения ИО из тела человека

Конструкция ТЭС рассмотрена на рис. 1, а внешний вид прибора показан на рис. 2 [11].

В состав устройства входит манипулятор, выполненный в виде полой пластмассовой трубки 1. Внутри трубки 1 находится металлический стержень 2, с помощью направляющих 3 имеющий возможность перемещаться по ее длине. На торцевой поверхности стержня 2, предназначенной для контакта с ИО, закреплен ТЭМ 4 с нанесенным на его рабочую поверхность влажной губкой 5, перед процедурой смачиваемой жидкостью. Стержень 2 выполняет одновременно функцию съема теплоты с опорной поверхности модуля 4 и имеет ребрение 6 в радиальном направлении.

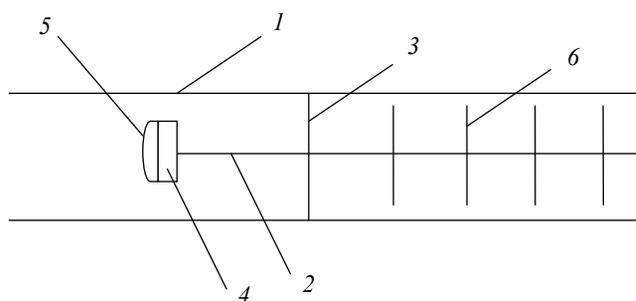


Рис. 1. Структурная схема ТЭС для извлечения ИО из тела человека

Fig. 1. Schematic diagram of TES for extracting foreign objects from the human body



Рис. 2. Внешний вид ТЭС для извлечения ИО из тела человека

Fig. 2. TES for extracting foreign objects from the human body

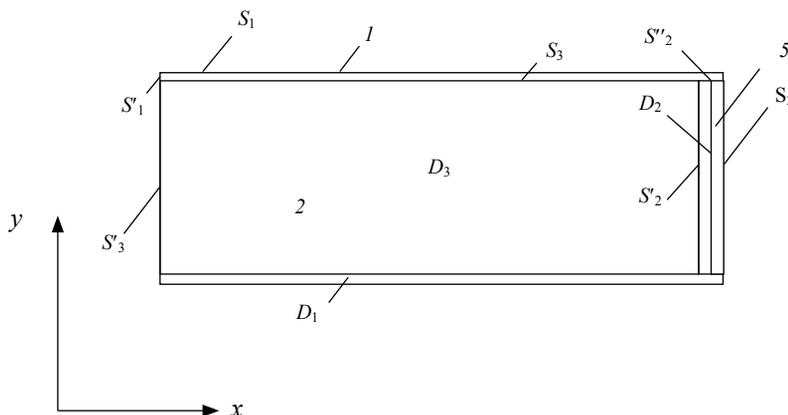


Рис. 3. Тепловая модель ТЭС для извлечения ИО из тела человека

Fig. 3. Thermal model of TES for extracting foreign objects from the human body

Перед началом процедуры все детали ТЭС дезинфицируются. Стержень 2 приводится в такое положение, когда ТЭМ 4 будет максимально удален от ИО. Затем прибор вводится в полость так, чтобы стенки трубки 1 располагались на глубине, несколько большей расположения верхней поверхности ИО. Далее ТЭМ 4 рабочей поверхностью через влажную губку 5, путем перемещения стержня 2 по направляющим 3, приводится в соприкосновения с ИО. После пропускания через ТЭМ 4 постоянного электрического тока соответствующей полярности происходит примерзание ИО к его рабочей поверхности. Извлечение ИО из полости производится за счет перемещения стержня 2 в обратном направлении.

Математическая модель ТЭС для извлечения ИО из тела человека

В соответствии с конструктивным описанием ТЭС и принципом ее работы разработана тепловая модель прибора, имеющая вид, изображенный на рис. 3.

На рис. 3 использованы те же обозначения составляющих ТЭС конструктивных элементов, что и на рис. 1. Введены обозначения области, соответствующей воздушному зазору — D_1 ; ТЭМ — D_2 , подвижному зонду — D_3 . Поверхность стенки трубки ТЭС, контактирующей с телом человека (биологическим объектом) — S_1 , окружающей средой — S'_1 ; поверхность ТЭС, контактирующая с влажной губкой — S_2 , зондом — S'_2 , воздушным зазором — S''_2 ; поверхность зонда, контактирующая с воздушным зазором S_3 , с окружающей средой S'_3 .

При математическом моделировании устройства решены три задачи, первая из которых состоит в расчете теплофизических процессов при введении прибора в полость тела, вторая — исследовании процесса фазового перехода при замерзании влажной губки, третья — определении параметров ТЭМ.

Ввиду того, что величина воздушного зазора предполагается незначительной и тепловые процессы, происходящие в устройстве, носят непродолжительный характер, к тому же во всех элементах прибора процесс теплопередачи осуществляется только за счет теплопроводности.

При данном условии математическое описание теплофизических процессов, протекающих в системе при ее внедрении в организм человека, без учета влажной губки (процессы, происходящие в ней при наличии фазового перехода, ведущие к примораживанию ИО к зонду, рассматриваются при решении второй расчетной задачи) в обобщенном виде может быть представлено следующим образом [12]:

$$\begin{aligned}
 a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_1}{\partial \tau} \text{ при } x, y \in D_1; \\
 a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{Q_{\text{ТЭМ}}}{c_2 \rho_2} &= \frac{\partial T_2}{\partial \tau} \text{ при } x, y \in D_2; \\
 a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} &= \frac{\partial T_3}{\partial \tau} \text{ при } x, y \in D_3; \\
 T_1, T_2, T_3 &= T_{\text{вр}} = T_{\text{ср}}, \text{ при } \tau = 0; \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_1} &= \alpha_{\infty} (T_{\infty} - T_1) \text{ при } x, y \in S_1; \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_2} - q_{\text{х.ТЭМ}} &= \lambda_{\text{вр}} \frac{\partial T_{\text{вр}}}{\partial n_2} \text{ при } x, y \in S_2; \quad (1) \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n'_2} + q_{\text{г.ТЭМ}} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n'_2} \text{ при } x, y \in S'_2; \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n''_2} + q_{\text{г.ТЭМ}} &= \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n''_2} \text{ при } x, y \in S''_2; \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_3} &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n_3} \text{ при } x, y \in S_3; \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n'_1} &= \alpha_{\text{ср}} (T_1 - T_{\text{ср}}); \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial n'_3} &= \alpha_{\text{ср}} (T_3 - T_{\text{ср}}).
 \end{aligned}$$

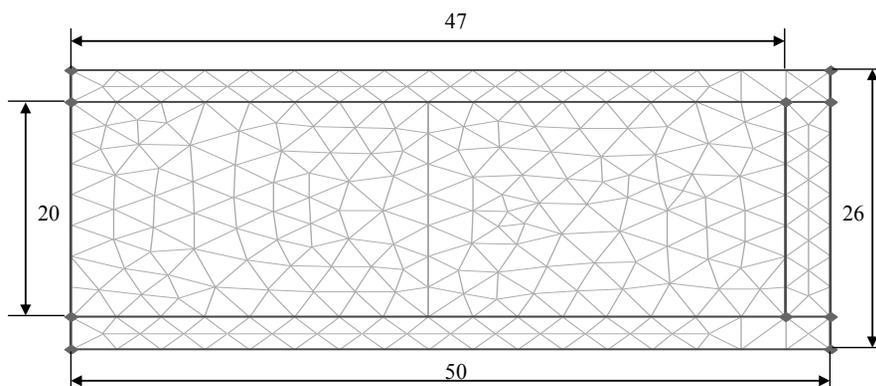


Рис. 4. Структура ТЭС для извлечения ИО из тела человека с конечноэлементной сеткой
 Fig. 4. The structure of TES for extracting foreign objects from the human body with fine element grid

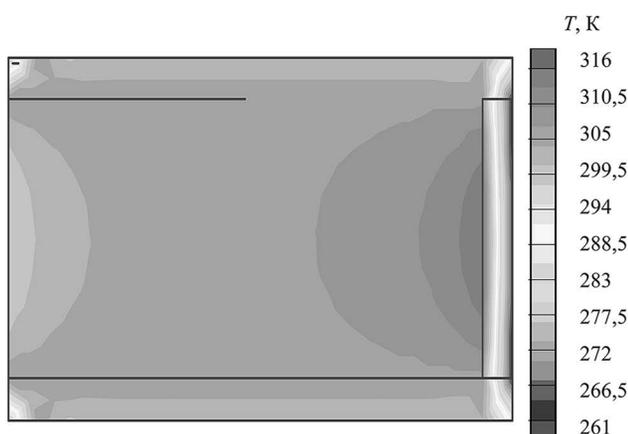


Рис. 5. Двумерное температурное поле ТЭС при ее введении в тело человека
 Fig. 5. Two-dimensional temperature field of TES TЭС at the time of its being introduced into the human body

где $T_1, T_2, T_3, T_{вр}, T_{бo}$ — температуры стенки трубки, ТЭМ, зонда, влажной губки, биологического объекта; a_1, a_2, a_3 — коэффициенты теплопроводности стенки трубки, ТЭМ, зонда; l

Результаты расчетов представлены на рис. 5–11.

На рис. 5 рассмотрено двумерное температурное поле ТЭС при ее введении в тело человека на глубину 50 мм для холодопроизводительности ТЭМ 7000 Вт/м² при выходе прибора на стационарный режим. Согласно представленным данным распределение температуры по ТЭС достаточно неоднородно. Со стороны холодных спаев ТЭМ температура существенно меньше, чем в остальных точках, а со стороны горячих — выше, что объясняется поглощением и выделением теплоты Пельтье. При этом температура по зонду изменяется относительно незначительно, что связано с высокой теплопроводностью материала, из которого он изготовлен (латуни).

Более информативными являются одномерные зависимости, полученные для стационарного режима работы системы и рассмотренные на рис. 6, 7. На рис. 6 показаны графики изменения температуры ТЭС в поперечном направлении (вдоль оси y) в непосредственной близости от холодных спаев ТЭМ при различных величинах его холодопроизводительности. Согласно полу-

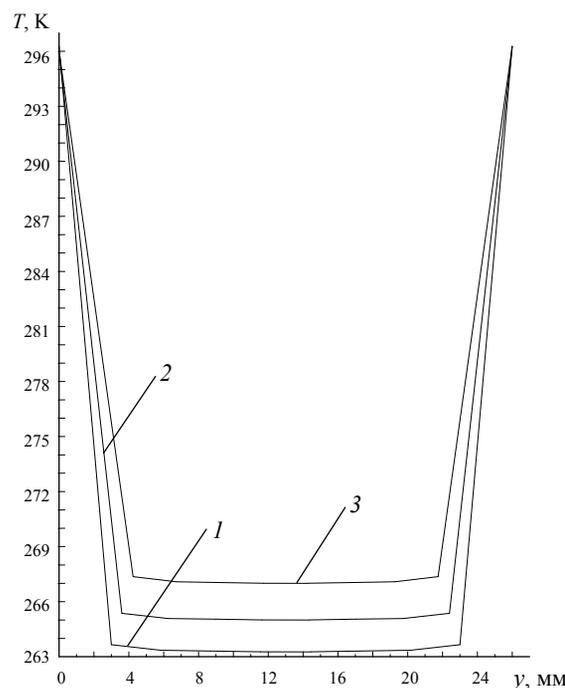


Рис. 6. Изменение температуры ТЭС вдоль оси y в непосредственной близости от холодных спаев ТЭМ при различных величинах $q_{x, ТЭМ}$: 1 — $q_{x, ТЭМ} = 7000 \text{ Вт/м}^2$, 2 — $q_{x, ТЭМ} = 6500 \text{ Вт/м}^2$, 3 — $q_{x, ТЭМ} = 6000 \text{ Вт/м}^2$
 Fig. 6. The changes of TES temperature along y axis close to the cold ends of TEM at various $q_{x, ТЭМ}$: 1 — $q_{x, ТЭМ} = 7000 \text{ W/m}^2$, 2 — $q_{x, ТЭМ} = 6500 \text{ W/m}^2$, 3 — $q_{x, ТЭМ} = 6000 \text{ W/m}^2$

ченным данным, с увеличением теплового потока на холодных спаев ТЭМ температура на соответствующей поверхности снижается. Так при величине $q_{x, ТЭМ} = 7000 \text{ Вт/м}^2$ данная температура составляет чуть более 263 К и увеличивается примерно на 2,5 К при уменьшении $q_{x, ТЭМ}$ на 500 Вт/м². Анализируя распределение температуры по оси y необходимо отметить, что ее значение по поверхности ТЭМ практически не меняется. Это позволяет в дальнейшем рассмотреть задачу о промерзании влажной губки только в одной координате, по ее толщине, существенно упростив расчет теплообмена, связанного с фазовым переходом вещества.

Другой важной информацией является то, что применение ТЭС при данных холодопроизводительностях ТЭМ не ведет к переохлаждению близлежащих зон че-

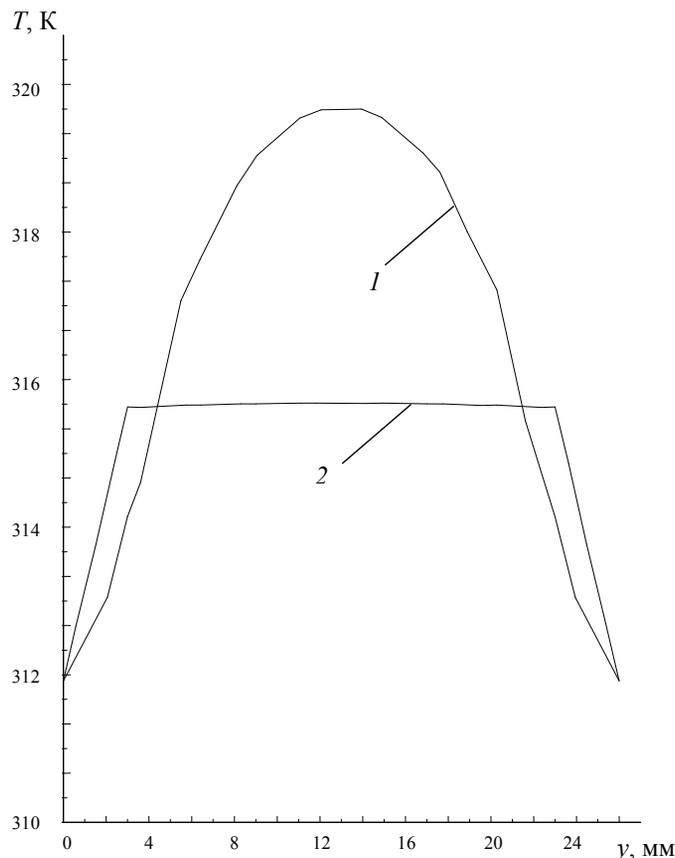


Рис. 7. Изменение температуры ТЭС вдоль оси y в непосредственной близости от горячих спаев ТЭМ (1) и вдоль центральной поперечной оси прибора (2) при $q_{x, \text{ТЭМ}} = 7000 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 7. The changes of TES temperature along y axis close to the hot ends of TEM (1) and along the quadrature axis of the unit (2) at $q_{x, \text{ТЭМ}} = 7000 \text{ W/m}^2$

ловеческого организма (рис. 6). В зазорах между стенкой трубки ТЭС и ТЭМ (3 мм) температура меняется достаточно быстро и уже на расстоянии 1,5 мм от края модуля становится равной 277 К, что, учитывая кратковременность проведения процедуры по извлечению ИО, практически не влияет негативным образом на состояние тканей.

На рис. 7 показано распределение температуры ТЭС в поперечном направлении (вдоль оси y) в непосредственной близости от горячих спаев ТЭМ (кривая 1) и вдоль центральной оси прибора при $y = 25 \text{ мм}$ (кривая 2) для $q_{x, \text{ТЭМ}} = 7000 \text{ Вт/м}^2$.

Представленные результаты расчета показывают, что максимальная температура наблюдается в центральной части горячих спаев ТЭМ и составляет примерно 319,5 К, снижаясь до 312 К у стенки трубки ТЭС. При этом максимальная температура посередине прибора составляет 315,7 К, также уменьшаясь к стенке трубки ТЭС до 312 К. Данное обстоятельство позволяет говорить, что для условий эксплуатации системы температура горячих спаев ТЭМ не выходит за допустимые пределы. Зонд, изготовленный из латуни, в данном конструктивном исполнении в полной мере выполняет роль теплоотвода для требуемых величин холодопроизводительности модуля.

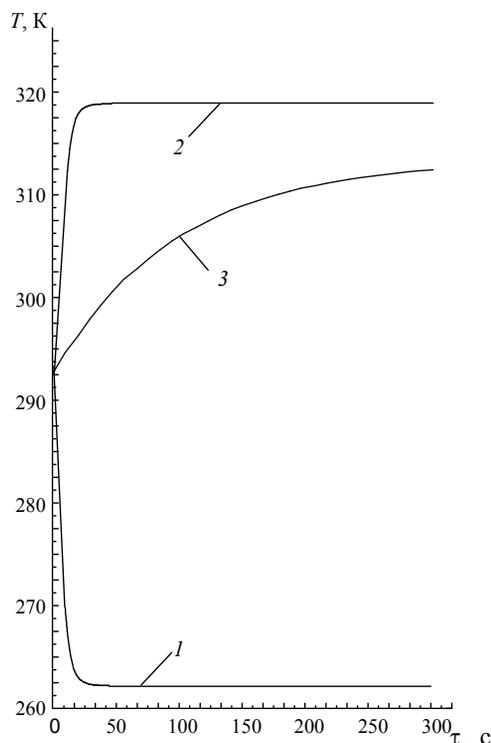


Рис. 8. Изменение температуры в различных точках ТЭС:

1 — холодные спаи ТЭМ; 2 — горячие спаи ТЭМ; 3 — средневзвешенная температура зонда

Fig. 8. Temperature changes at various points of TES:

1 — cold ends of TEM; 2 — hot ends of TEM; 3 — weighted average temperature of the probe

Помимо этого, результаты расчета определяют, что наличие перегрева зонда за счет выделяющейся на горячих спаев ТЭМ теплоты, практически не сказывается на температуре тканей биологического объекта. В зоне их контакта со стенкой трубки ТЭС температура составляет 312 К, что ненамного превышает температуру человеческого тела, т. е. риск ожога при использовании разработанной системы на практике также отсутствует. Таким образом, стенка трубки ТЭС и воздушный зазор выполняют роль надежной тепловой изоляции.

Для анализа динамических характеристик ТЭС исследовано изменение температуры ее различных точек до выхода на стационарный режим. Полученные результаты представлены на рис. 8.

Согласно расчетным данным, продолжительность выхода системы на установившийся режим невелика. Так, время, необходимое для термостабилизации спаев ТЭМ составляет 25 с, что связано с малыми габаритными размерами модуля и малой инерционностью эффекта Пельтье. Длительность же выхода на режим зонда ввиду его относительно больших размеров (относительно ТЭМ) находится в пределах 6–7 мин.

На рис. 9, 10 изображены графики зависимости изменения температуры на верхней поверхности влажной губки $T_{\text{вг. тв}}$ при $x = 0$ или, соответственно, $T_{\text{ТЭМ}}$, а также

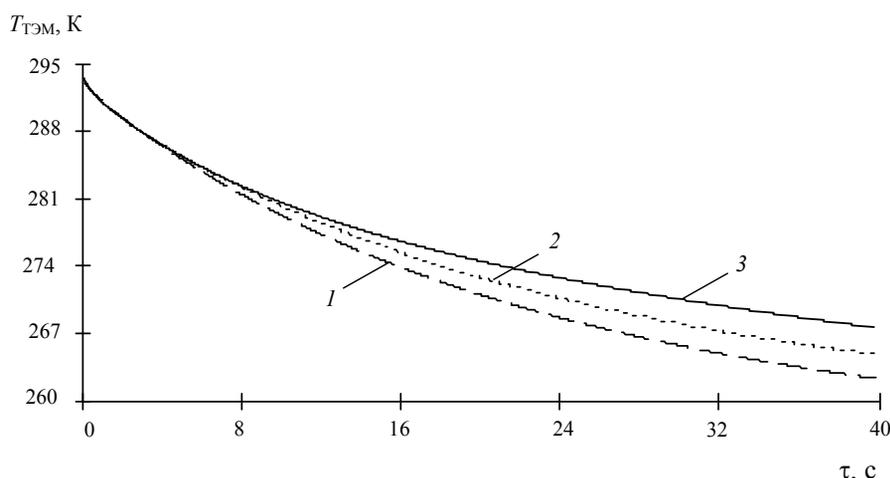


Рис. 9. Изменение температуры верхней поверхности влажной губки во времени для различных величин $q_{x, TЭМ}$:

1 — $q_{x, TЭМ} = 7000 \text{ Bm/m}^2$; 2 — $q_{x, TЭМ} = 6000 \text{ Bm/m}^2$; 3 — $q_{x, TЭМ} = 5000 \text{ Bm/m}^2$

Fig. 9. Time behavior of wet sponge upper surface temperature for various $q_{x, TЭМ}$:

1 — $q_{x, TЭМ} = 7000 \text{ W/m}^2$; 2 — $q_{x, TЭМ} = 6000 \text{ W/m}^2$; 3 — $q_{x, TЭМ} = 5000 \text{ W/m}^2$

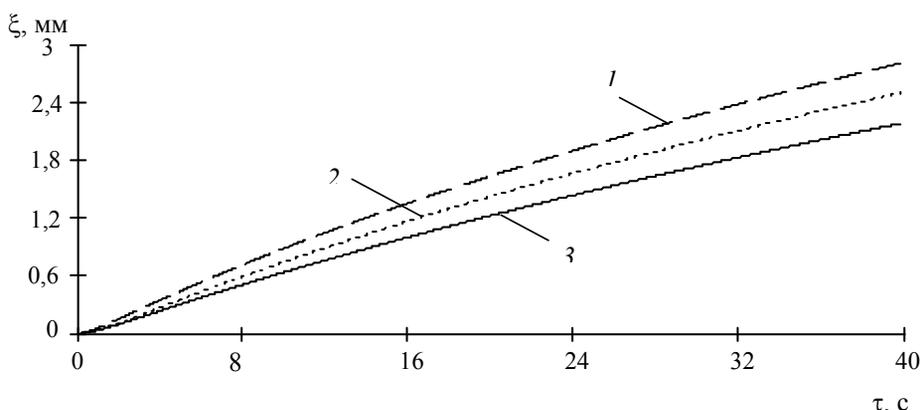


Рис. 10. Изменение границы раздела фаз по толщине влажной губки во времени для различных величин $q_{x, TЭМ}$:

1 — $q_{x, TЭМ} = 7000 \text{ Bm/m}^2$; 2 — $q_{x, TЭМ} = 6000 \text{ Bm/m}^2$; 3 — $q_{x, TЭМ} = 5000 \text{ Bm/m}^2$

Fig. 10. Time behavior of phase boundary over the thickness of wet sponge for various $q_{x, TЭМ}$:

1 — $q_{x, TЭМ} = 7000 \text{ W/m}^2$; 2 — $q_{x, TЭМ} = 6000 \text{ W/m}^2$; 3 — $q_{x, TЭМ} = 5000 \text{ W/m}^2$

границы раздела фаз по толщине влажной губки во времени для различных величин $q_{x, TЭМ}$.

Согласно полученным зависимостям, с увеличением холодопроизводительности ТЭМ, время, необходимое для заморозания влажной губки, уменьшается. Так, увеличение плотности теплового потока на холодных спаях ТЭМ с 5000 Вт/м^2 до 7000 Вт/м^2 снижает время образования слоя льда толщиной 2 мм с 40 до 27 с. Одновременно с увеличением $q_{x, TЭМ}$ снижается температура $T_{TЭМ}$, значение которой для плотностей тепловых потоков 5000 Вт/м^2 и 7000 Вт/м^2 через 40 с работы ТЭС составляет 267,5 К и 263 К.

При эксплуатации разработанной ТЭС важным будет являться вопрос, связанный с подбором оптимальной толщины влажной губки. С одной стороны, для уменьшения времени образования ледяного моста ее толщина должна быть минимальной, с другой стороны она должна обеспечивать надежное сцепление с ИО, извлекаемым из тела человека. Несомненно, что толщина губки в основном бу-

дет зависеть от размеров, формы и массы извлекаемого объекта и повышаться с увеличением этих параметров. Проведены исследования влияния толщины губки на температурный режим и быстродействие ТЭС для $q_{x, TЭМ} = 7000 \text{ Вт/м}^2$ $h_{вт} = 3, 4, 5 \text{ мм}$. В соответствии с результатами расчетов при увеличении толщины губки при одинаковом значении холодопроизводительности ТЭМ процесс ее заморозания идет значительно медленнее. Так, например, при $h_{вт} = 5 \text{ мм}$ толщина слоя льда 2 мм может быть достигнута через 43 с, что почти в 1,6 раза дольше, чем при $h_{вт} = 3 \text{ мм}$. Данное обстоятельство объясняется увеличением тепловой емкости и теплового сопротивления губки за счет повышения ее массогабаритных параметров.

Для оценки общей продолжительности образования ледяного моста между ИО и ТЭС произведен расчет времени, необходимого для полного заморозания влажной губки в зависимости от холодопроизводительности ТЭМ при ее различных толщинах. Результаты численного эксперимента представлены на рис. 11.

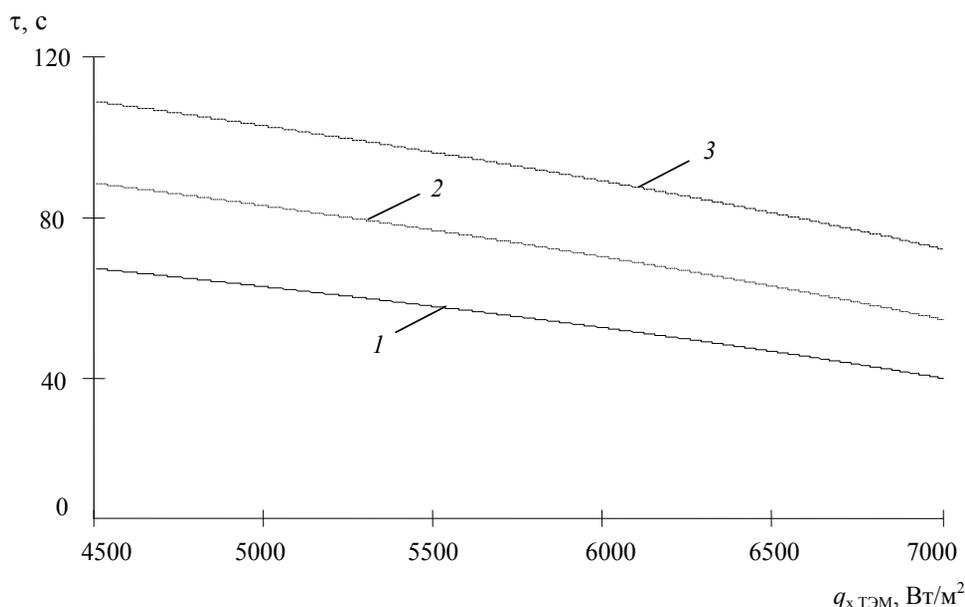


Рис. 11. Продолжительность полного замерзания влажной губки в зависимости от холодопроизводительности ТЭМ при различных $h_{вс}$: 1 — $h_{вс} = 3$ мм; 2 — $h_{вс} = 4$ мм; 3 — $h_{вс} = 5$ мм

Fig. 11. The time of wet sponge full freezing depending on TEM refrigeration duty at various $h_{вс}$: 1 — $h_{вс} = 3$ mm; 2 — $h_{вс} = 4$ mm; 3 — $h_{вс} = 5$ mm

В соответствие с полученными данными следует, что при увеличении толщины губки растет длительность ее замерзания при неизменных значениях $q_{х,ТЭМ}$. Полученные графики показывают, что в среднем при увеличении толщины губки на 1 мм время, необходимое для ее полного замерзания увеличивается в 1,6 раз в диапазоне $q_{х,ТЭМ}$ от 4500 Вт/м² до 7000 Вт/м². При этом для максимального значения холодопроизводительности ТЭМ, равного 7000 Вт/м² для губки толщиной 3 мм оно составляет 40 с.

Полученные данные позволяют сделать вывод о необходимости использования в ТЭС набора съемных ТЭМ различной мощности и эксплуатации того или иного типа последних в зависимости от габаритных размеров и массы ИО.

Заключение

Рассмотрен метод извлечения ИО из полости организма человека посредством его примораживания к тер-

моэлектрическому устройству. Разработана математическая модель ТЭС для его реализации, основанная на решении задачи теплопроводности, в том числе при фазовом переходе, с учетом теплофизических характеристик биологического объекта, ИО, ТЭМ. В результате численного эксперимента получены графики изменения температуры в различных точках ТЭС, при введении ее в организм человека для извлечения ИО в зависимости от мощности ТЭС, параметров материалов модуля, внешних условий, определена продолжительность замерзания влажной губки для различных величин холодопроизводительности ТЭМ. Установлено, что в системе может быть использован стандартный ТЭМ мощностью 4500–7000 Вт/м² при продолжительности процесса примораживания ИО к системе соответственно 120–40 с. Определено, что параметры ТЭМ должны соответствовать медицинским нормам и стандартам во избежание процесса обморожения прилежащих тканей.

Литература

1. Блоцкий А. А. Травмы и инородные тела ЛОР-органов / А. А. Блоцкий, С. А. Карпищенко, В. В. Антипенко, Р. А. Блоцкий. СПб.: Диалог, 2018. 217 с.
2. Блоцкий А. А. Неотложные состояния в оториноларингологии / А. А. Блоцкий, С. А. Карпищенко. СПб.: Диалог, 2016. 203 с.
3. Юнусов А. С. и др. Эпидемиология инородных тел полости носа в условиях крупного мегаполиса // Российская оториноларингология. 2017. № 5. С. 83–87.
4. Антонова Е. В., Холостова В. В., Халафов Р. В. Случай длительного нахождения инородных магнитных тел в желудке // Детская хирургия. 2013. № 2. С. 52–53.
5. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015. 441 p.

References

1. Blotsky A. A. Traumas and foreign bodies of ENT organs / A. A. Blotsky, S. A. Karpishchenko, V. V. Antipenko, R. A. Blotsky. St. Petersburg: Dialog, 2018. 217 p. (in Russian)
2. Blotsky A. A. Urgent conditions in otorhinolaryngology / A. A. Blotsky, S. A. Karpishchenko. St. Petersburg: Dialog, 2016. 203 p. (in Russian)
3. Yunusov A. S. et al. Epidemiology of foreign bodies of the nasal cavity in the conditions of a large metropolis. *Russian otorhinolaryngology*. 2017. No. 5. p. 83–87. (in Russian)
4. Antonova E. V., Kholostova V. V., Khalafov R. V. The case of prolonged presence of foreign magnetic bodies in the stomach. *Children's surgery*. 2013. No. 2. P. 52–53. (in Russian)
5. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015. 441 p.

6. Дашевский, З. М., Константинов П. П., Скипидаров С. Я. Новое направление применения термоэлектрических преобразователей энергии // Физика и техника полупроводников. 2019. № 7. С. 875–878.
7. Такенобу Кадзикава, Фунахами Риодзи. Новейшие разработки в области технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии в Японии // Термоэлектричество. 2016. <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1005241&selid=17268483>. С. 5–17.
8. Ding L. C., Akbarzadeh A., Tan L. A review of power generation with thermoelectric system and its alternative with solar ponds // *Renewable and sustainable energy reviews*. 2018. Vol. 81. P. 799–812.
9. Nagase K., Yamamoto A. Development of durability testing for thermoelectric power generation module // *Journal of Kinzoku materials science and technology*. 2016. No 3. P. 1347–1364.
10. Toshima N. Thermoelectric performance of organic materials including hybrid system // *Journal of Kinzoku materials science and technology*. 2016. No 3. P. 103–109.
11. Евдулов О. В. Термоэлектрическая система для извлечения инородных объектов из тела человека / О. В. Евдулов, А. М. Насрулаев, С. Г. Магомедова, И. Ш. Миспахов, Н. А. Набиев // *Вестник ДГТУ. Технические науки*. 2019. т. 46. № 1. С. 32–41.
12. Теория теплообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 464 с.
13. Маринюк Б. Т., Королев И. А. Расчет и анализ динамики роста толщины слоя водного инея на охлаждаемой поверхности // *Холодильная техника*. 2016. № 11. С. 38–43.
14. Маринюк Б. Т., Королев И. А. Особенности формирования и динамика роста инея на теплообменных поверхностях криогенного оборудования // *Холодильная техника*. 2017. № 11. С. 38–41.
15. Евдулов О. В. Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения / Т. А. Исмаилов, О. В. Евдулов, Т. А. Рагимова, Н. А. Набиев // *Медицинская техника*. 2019. № 2. С. 12–14.
16. 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.
17. Goldsmid H. J. Thermoelectric refrigeration. New York: Springer, 2013. 240 p.
6. Dashevsky Z. M., Konstantinov P. P., Turpidarov S. Ya. New direction of application of thermoelectric energy converters. *Physics and Technology of semiconductors*. 2019. No. 7. P. 875–878. (in Russian)
7. Takenobu Kajikawa, Funahashi Riodzi. The latest developments in the field of thermoelectric power generation technology in Japan. *Journal of thermoelectricity*. 2016. 1. p. 5–17. (in Russian)
8. Ding L. C., Akbarzadeh A., Tan L. A review of power generation with thermoelectric system and its alternative with solar ponds. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2018. Vol. 81. P. 799–812.
9. Nagase K., Yamamoto A. Development of durability testing for thermoelectric power generation module. *Journal of Kinzoku materials science and technology*. 2016. No 3. P. 1347–1364.
10. Toshima N. Thermoelectric performance of organic materials including hybrid system. *Journal of Kinzoku materials science and technology*. 2016. No 3. P. 103–109.
11. Evdulov O. V. Thermoelectric system for extracting foreign objects from the human body / O. V. Evdulov, A. M. Nasrulaev, S. G. Magomedova, I. Sh. Mispakhov, N. A. Nabiev. *Vestnik DSTU. Technical sciences*. 2019. V. 46. No. 1. p. 32–41. (in Russian)
12. Theory of heat and mass transfer, ed. by A. I. Leontiev, Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2018, 464 p. (in Russian)
13. Marinyuk B. T., Korolev I. A. Calculation and analysis of the dynamics of the growth of the thickness of the water frost layer on the cooled surface. *Refrigeration equipment*. 2016. No. 11. p. 38–43. (in Russian)
14. Marinyuk B. T., Korolev I. A. Features of the formation and dynamics of frost growth on the heat exchange surfaces of cryogenic equipment. *Refrigeration equipment*. 2017. No. 11. p. 38–41. (in Russian)
15. Evdulov O. V. Thermoelectric device for stopping bleeding / T. A. Ismailov, O. V. Evdulov, T. A. Ragimova, N. A. Nabiev. *Medical equipment*. 2019. No. 2. P. 12–14. (in Russian)
16. Ismailov T. A. Model of a thermoelectric device for thermal influence on reflexogenic zones / T. A. Ismailov, O. V. Evdulov, N. A. Nabiev, S. G. Magomedova. *Medical equipment*. 2020. No. 1. p. 40–43. (in Russian)
17. Goldsmid H. J. Thermoelectric refrigeration. New York: Springer, 2013. 240 p.

Сведения об авторах

Исманлов Тагир Абдурашидович

Д. т. н., профессор, президент Дагестанского государственного технического университета, 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, dstu@dstu.ru

Евдулов Олег Викторович

Д. т. н., доцент кафедры теоретической и общей электротехники Дагестанского государственного технического университета, 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, ole-ole-ole@rambler.ru

Насрулаев Абдула Магомедович

Соискатель, кафедра теоретической и общей электротехники, Дагестанский государственного технического университета, 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, nasrulaevam@yandex.ru

Information about authors

Ismailov Tagir A.

D. Sc., Professor, President of Dagestan state technical university, 70 Imam Shamil Ave., Makhachkala, 367026, dstu@dstu.ru

Yevdulov Oleg V.

D. Sc., Associate professor of the Department of theoretical and general electrical engineering, Dagestan state technical university, 70 Imam Shamil Ave., Makhachkala, 367026, ole-ole-ole@rambler.ru

Nasrulaev Abdula Magomedovich

Candidate, Department of theoretical and general electrical engineering, Dagestan state technical university, 70 Imam Shamil Ave., Makhachkala, 367026, nasrulaevam@yandex.ru