

Перспективы использования охлаждающих термоэлектрических устройств для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома
О.В. Евдулов^{1,2}, А.М. Кардашев³, Г.Г. Магомедов¹, М.А. Хазамова¹

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367015, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

²Дагестанский государственный университет,

²367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева 43-а, Россия,

³Республиканский онкологический центр,

³367008, г. Махачкала, ул. Г. Гаджиева 24, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка охлаждающего термоэлектрического устройства (ТЭУ) для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома путем локальной гипотермии. **Метод.** Исследование основано на методах термодинамического анализа, натурного и вычислительного моделирования объектов криогенной техники с целью обеспечения надежности, экологичности, бесшумности, функциональности и компактности. **Результат.** Разработано ТЭУ, в состав которого помимо источника холода в виде стандартных термоэлектрических модулей (ТЭМ), входят мундштук, транспортная система и система для отвода тепла от горячих спаев ТЭМ. На основе расчетов в программном комплексе определен тип ТЭМ, используемый в ТЭУ. Получены зависимости, описывающие основные характеристики ТЭУ и ТЭМ, входящих в его состав. Построены графики зависимости: изменение холодопроизводительности ТЭМ, холодильного коэффициента, напряжения питания от перепада температур между спаями термоэлементов для различных значений силы тока питания; зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями термоэлементов, а также зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от тока питания. Графики представлены при температуре 47°C горячих спаев термоэлементов, входящих в ТЭМ. **Вывод.** Определены параметры ТЭУ: количество ТЭМ типа DRIFT-1,2 – 2 шт., рабочий диапазон холодопроизводительностей единичного ТЭМ - от 37 до 70 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 К, ток питания - от 4,8 до 8,2 А при потребляемой мощности от 90 до 300 Вт, холодильный коэффициент - от 0,2 до 0,6.

Ключевые слова: локальная гипотермия, термоэлектрическое устройство, термоэлектрический модуль, холодопроизводительность, температура, конструкция

Для цитирования: О.В. Евдулов, А.М. Кардашев, Г.Г. Магомедов, М.А. Хазамова. Перспективы использования охлаждающих термоэлектрических устройств для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(1):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-6-14.

Prospects for the Use of Thermoelectric Cooling Devices for the Treatment of Radiation-Induced Oropharyngeal Syndrome

O.V. Evdulov^{1,2}, A.M. Kardashev³, G.G. Magomedov¹, M.A. Khazamova¹

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367015, Russia,

²Daghestan State Technical University,

²43-a M. Gadzhiev St., Makhachkala 367000, Russia,

³Republican Oncology Center,

³24 G. Gadzhiev St., Makhachkala 367008, Russia

Abstract. Objective. The aim of this study is to develop a cooling thermoelectric device (CTED) for the treatment of radiation-induced oropharyngeal syndrome through local hypothermia. **Method.** The study is based on thermodynamic analysis, in-kind modeling, and computational modeling of cryogenic equipment to ensure the reliability, environmental friendliness, quiet operation, functionality, and compactness of the CTED. **Result.** The CTED was developed, which, in addition to a cold source in the form of standard thermoelectric modules (TEMs), includes a mouthpiece, a transport system, and a system for removing heat from the hot junctions of the TEMs. Based on calculations in the software package, the type of TEM used in the CTED was determined. Dependencies describing the main characteristics of the CTED and the TEMs comprising it were obtained. The following graphs were plotted: the change in the refrigeration capacity of the thermoelectric module, the coefficient of performance, and the supply voltage as a function of the temperature difference between the junctions of the thermocouples for various values of the supply current; the dependence of the voltage on the thermoelectric module on the supply current for various values of the temperature difference between the junctions of the thermocouples; and the dependence of the coefficient of performance of the thermoelectric module on the supply current. The graphs are presented at a temperature of 47°C at the hot junctions of the thermocouples included in the thermoelectric module. **Conclusion.** The following parameters of the thermoelectric module were determined: the number of DRIFT-1.2 thermoelectric modules is 2 pcs., the operating range of the refrigeration capacity of a single thermoelectric module is from 37 to 70 W with an average temperature difference between the junctions of 35 K, the supply current is from 4.8 to 8.2 A with a power consumption of 90 to 300 W, the coefficient of performance is from 0.2 to 0.6.

Keywords: local hypothermia, thermoelectric device, thermoelectric module, cooling capacity, temperature, design

For citation: O.V. Evdulov, A.M. Kardashev, G.G. Magomedov, M.A. Khazamova. Prospects for the Use of Thermoelectric Cooling Devices for the Treatment of Radiation-Induced Oropharyngeal Syndrome. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(1):6-14. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-1-6-14.

Введение. Радиоиндуцированный орофарингеальный синдром или орофарингеальный мукозит - комплекс симптомов, функциональных и органических изменений слизистой полости рта, носоглотки, ротоглотки и слюнных желез, связанный с непосредственным терапевтическим воздействием ионизирующего излучения в самостоятельном варианте или совместно с химиотерапией, проявляющийся в виде полиморфной клинической картины: десквамации, эрозии и воспаления слизистых с образованием язв, болевого синдрома, тризма (спазма жевательной мускулатуры), дисгевзии (извращения вкусового ощущения) и гипогевзии (снижение остроты вкусового ощущения), сиалоаденита (воспаления слюнных желез) с возможным присоединением бактериальной и грибковой инфекции. Радиоиндуцированный орофарингеальный синдром - наиболее частое осложнение лучевой терапии опухолей головы и шеи [1-5].

Мукозит полости рта является частым и потенциально серьезным осложнением терапии онкологических заболеваний. Следовательно, лечение мукозита часто приводит к ограничению подводимой суммарной очаговой дозы и увеличению продолжительности пребывания в стационаре пациентов и связанных с этим расходов. Формирование прерывов в лечении, либо прерывание лечения на дозах, не являющихся терапевтически радикальными, является значим фактором ответа на лечение и формирования радиорезистентности опухоли [4]. К числу факторов риска развития орофарингеального мукозита относятся локализация опухоли, доза облучения, режим фракционирования, а также индивидуальные особенности пациента. В наибольшей степени на риск развития мукозита и его течение влияет локализация злокачественной опухоли: полость рта, ротоглотка или носоглотка [6]. Наибольшим фактором, определяющим степень тяжести и увеличение частоты являются доза, тип и режим, сопутствующие облучению и химиотерапии [7].

Так, например, в ряде работ отмечается высокий риск развития мукозита у пациентов, получающих препараты цисплатина и цеткусимаба, являющихся основными лекарственными средствами, используемыми в схеме химио- и биолучевой терапии опухолей головы и шеи [8, 9].

При проведении химио- и биолучевой терапии важным является купирование их последствий, связанных с лечением радиоиндуцированного орофарингеального синдрома различными средствами.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является рассмотрение возможности применения охлаждающих термоэлектрических устройств (ТЭУ) для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома путем использования локальной гипотермии полости рта.

Методы исследования. Проведен обзор современной литературы, посвященной лечению орофарингеального мукозита у онкобольных, вызванного лучевой и химиотерапией, в частности, использованию локальной гипотермии полости рта. Согласно проведенным исследованиям определено, что мероприятия по профилактике и лечению радиоиндуцированного орофарингеального мукозита отражены в клинических рекомендациях, разработанных Группой по изучению мукозита Многонациональной ассоциации поддерживающей терапии при раке совместно с Международным обществом онкологии полости рта (Mucositis Study Group of the Multi-national Association for Supportive Care in Cancer and the International Society of Oral Oncology - MASCC/ISOO) [10].

Эти мероприятия включают: адекватное питание; купирование болевого синдрома, деконтаминацию флоры ротовой полости, профилактику сухости во рту, профилактическую гипотермию, терапевтическое использование палифермина, применение стимуляторов регенерации тканей, раневых покрытий, ополаскивателей полости рта. Начиная с XX века установлена высокая оздоровительная роль гипотермии в лечении радиоиндуцированных лучевых реакций при опухолях языка и губы при контактной лучевой терапии с радиевыми иглами и интрастатами.

На сегодняшний день локальная гипотермия в виде рассасывания кубиков льда и ледяной крошки применяется при комбинированной химиолучевой терапии и химиотерапии в самостоятельном варианте. Патогенетическое обоснование гипотермии – спазм сосудов ротовой полости вследствие охлаждения, провоцирующий локальную гипоксию (радиоозащитное действие) и уменьшение всасывания слизистой внутривенно вводимого цитостатика (химиопрепарата), а также снижение объема мигрирующих в очаг лучевого повреждения провоспалительных медиаторов и факторов (цитокинов, хемокинов) вследствие вазоспазма [11-13]. При этом необходимо отметить, что применение льда, сформированного из загрязненной воды, является фактором контаминации слизистой полости рта вторичными бактериальными и грибковыми инфекциями, утяжеляющими течение орофарингеального мукозита, а также требующими добавления лекарственной терапии. Неправильно сформированная ледяная крошка может травмировать воспаленную слизистую острыми гранями. Внутриворотные охлаждающие устройства, которые на данный момент используются при орофарингеальном мукозите показывают лучший эффект и переносимость при гипотермии полости рта, чем использование льда и ледяной крошки.

Одним из примеров таких устройств является прибор, описанный в [14]. В его состав входит источник холода, выполненный в виде портативного жидкостного термостата, мундштук с гипоаллергенным покрытием, соединенный посредством транспортной системы, состоящей из двух гибких пластиковых шлангов, с жидкостным термостатом, средство для транспортировки охлажденной воды от жидкостного термостата до мундштука. При проведении процедур мундштук помещается в ротовую полость пациента, а вода, охлажденная внутри термостата до 8-10° С посредством парокомпрессионной охлаждающей системы и средства для ее транспортировки циркулирует через мундштук, позволяя охлаждать слизистую оболочку ротовой полости и поддерживать желаемую

температуру в течение требуемого времени. Недостатком прибора является его громоздкость, относительно большой вес, а также обязательное наличие воды и средства для ее транспортировки от жидкостного термостата до мундштука.

В данных условиях установлено, что целесообразным является использование в качестве средств для проведения локальной гипотермии полости рта в целях лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома охлаждающих термоэлектрических устройств. Применение в качестве источника холода в данной конструкции стандартных ТЭМ позволит повысить надежность работы, экологичность, бесшумность работы, функциональность и компактность прибора [15-19].

Предлагается следующий конструктивный вариант устройства, структурная схема которого изображена на рис. 1.

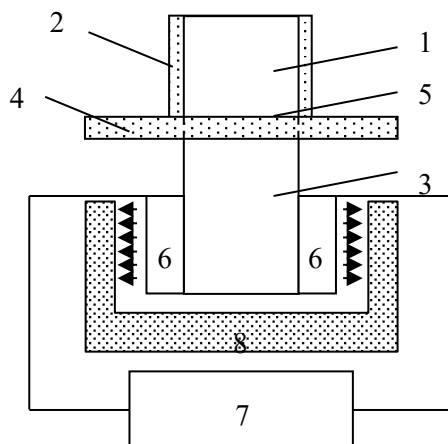


Рис. 1 – Структурная схема ТЭУ для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома методом локальной гипотермии полости рта
Fig. 1 – Structural diagram of TEU for the treatment of radiation-induced oropharyngeal syndrome using local hypothermia of the oral cavity

Устройство содержит мундштук 1, размещаемый в полости рта пациента при проведении процедур, изготовленный из высокотеплопроводного материала (например, медь или латунь), имеющий съемное гипоаллергенное покрытие 2 по всей поверхности, транспортную систему 3, находящуюся вне полости рта пациента, выполненную из того же материала и образующую с мундштуком 1 монолитную конструкцию. Разграничение между мундштуком 1 и транспортной системой 3 осуществляет ограничитель 4, изготовленный из гипоаллергенного материала в виде кольца, крепящегося с внешней стороны монолитной конструкции в области разграничения 5. Транспортная система 3 выполнена в виде прямоугольного параллелепипеда, на две противоположные более широкие боковые грани которого установлены холодной стороной ТЭМ 6. Оба ТЭМ 6 электрически соединены последовательно и питаются электрической энергией от источника постоянного электрического тока 7, образуя источник холода.

Отвод теплоты от горячей стороны ТЭМ 6 осуществляется за счет системы теплоотвода 8, в качестве которой может выступать либо цельнометаллический радиатор (возможно его предварительное охлаждение во внешнем источнике холода), либо радиатор в виде полой емкости, заполненной веществом с высокой теплотой плавления и температурой плавления в пределах от 35 до 50° С (например, парафином). Дополнительно с системой теплоотвода может использоваться вентиляторный агрегат, обдувающий ее и питаемый электрической энергией или от источника постоянного электрического тока 7 или дополнительного источника питания электрической энергией.

Перед началом процедуры устройство дезинфицируется. Мундштук 1 с надетым на него гипоаллергенным покрытием 2 помещается в полость рта пациента. Осуществляется питание ТЭМ 6 электрической энергией от источника постоянного электрического тока 7.

Холодная сторона ТЭМ охлаждает транспортную систему 3 и соответственно мундштук 1. Ограничитель 4, находящийся в области разграничения 5 осуществляет отделение области мундштука 1 от транспортной системы 3, предотвращая ее попадание в ротовую полость пациента. Отвод теплоты от ТЭМ осуществляется системой теплосброса 8. Во время процедуры мундштук 1 находится либо в статическом положении, либо перемещается по полости рта самим пациентом (за счет движения нижней челюсти, языка). Глубина охлаждения и продолжительность нахождения мундштука 1 в полости рта пациента определяется характером процедуры, определяемым лечащим врачом.

Обсуждение результатов. Определены основные параметры термоэлектрического устройства для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома методом локальной гипотермии полости рта на основе инженерных расчетов, которые произведены с использованием программного комплекса Thermoelectric system calculation, (разработчик ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург) [20]. Установлено, что в качестве источника холода в устройстве целесообразно использовать ТЭМ типа DRIFT-1,2 производства этой же компании. Транспортная система имеет длину 60 мм, ширину 40 см и толщину 5 мм, а мундштук представляет собой эллипсоид вращения, большая полуось которого равняется 60 мм, а малая полуось 40 мм (транспортная система и мундштук изготовлены из латуни). Основные характеристики ТЭМ представлены на рис. 2-6.

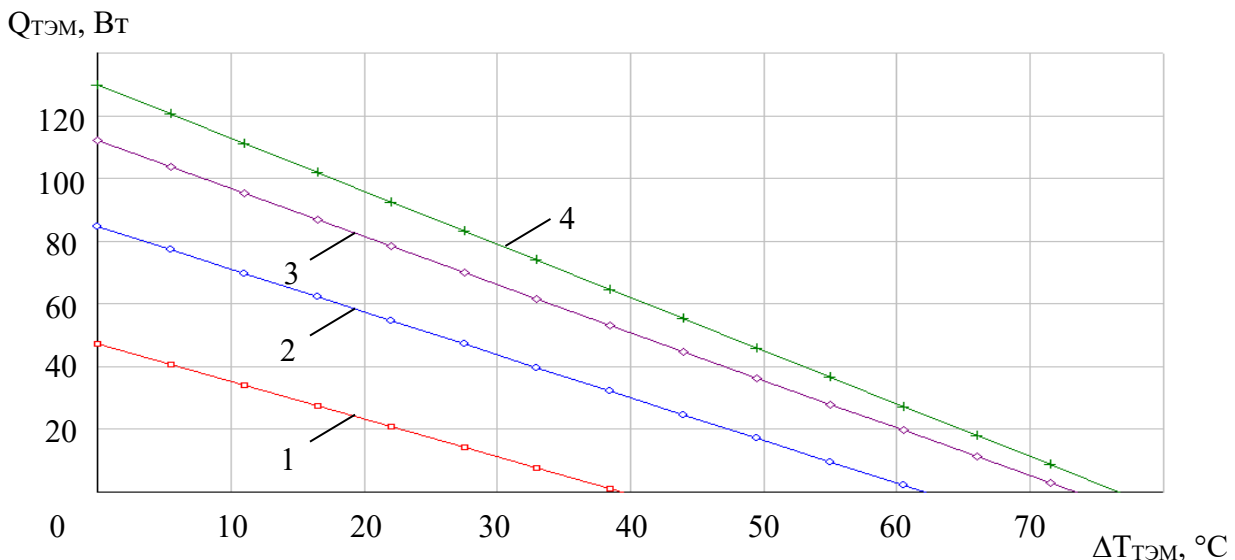


Рис. 2 – Зависимость изменения мощности ТЭМ от изменения перепада температур между спаями при различных значениях силы тока питания

1 - $I_{ТЭМ} = 2,25$ А, 2 - $I_{ТЭМ} = 4,5$ А, 3 - $I_{ТЭМ} = 6,26$ А, 4 - $I_{ТЭМ} = 9$ А

Fig. 2 – Dependence of the change in the TEM power on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

1 - $I_{ТЭМ} = 2.25$ А, 2 - $I_{ТЭМ} = 4.5$ А, 3 - $I_{ТЭМ} = 6.26$ А, 4 - $I_{ТЭМ} = 9$ А

Они представляют собой зависимости холодопроизводительности ТЭМ $Q_{ТЭМ}$, холодильного коэффициента ε , напряжения питания $U_{ТЭМ}$ от перепада температур между спаями термоэлементов $\Delta T_{ТЭМ}$ для различных значений силы тока питания $I_{ТЭМ}$, зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями термоэлементов, а также зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от тока питания. Графики представлены при температуре горячих спаев термоэлементов, входящих в ТЭМ, равной 47° С.

В соответствии с полученными данными увеличение тока питания ТЭМ вплоть до оптимального значения повышает холодопроизводительность устройства и глубину охлаждения мундштука. При этом холодильный коэффициент уменьшается, что сказывается на энергетической эффективности работы прибора.

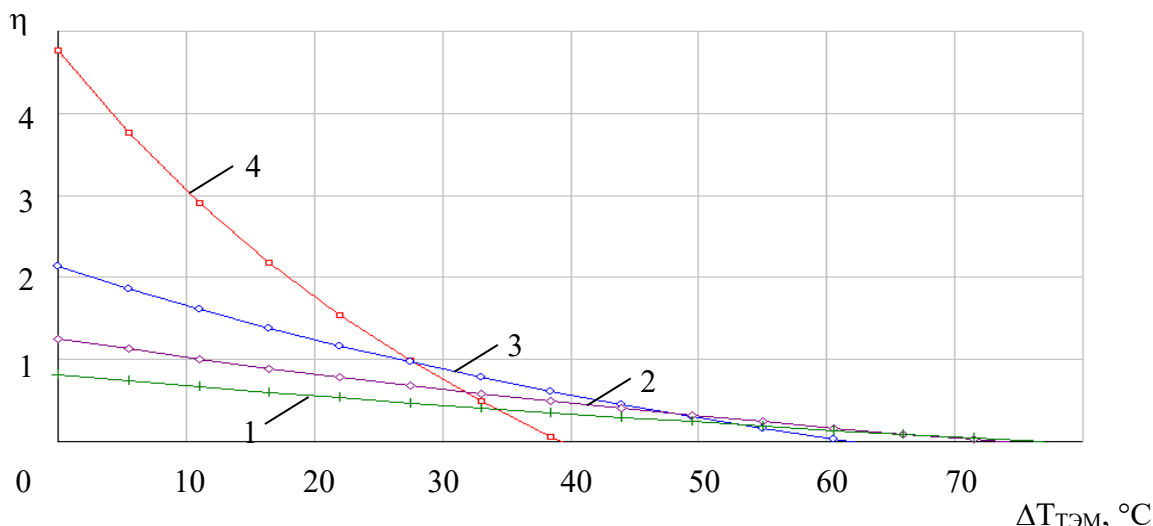


Рис. 3 – Зависимость изменения холодильного коэффициента ТЭМ от изменения перепада температур между саями при различных значениях силы тока питания

1 - $I_{TEM}=2,25$ А, 2 - $I_{TEM}=4,5$ А, 3 - $I_{TEM}=6,26$ А, 4 - $I_{TEM}=9$ А

Fig. 3 – Dependence of the change in the coefficient of performance of the TEM on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

1 - $I_{TEM} = 2.25$ А, 2 - $I_{TEM} = 4.5$ А, 3 - $I_{TEM} = 6.26$ А, 4 - $I_{TEM} = 9$ А

Что же касается расчетных численных данных, то в соответствии с расчетом, рабочий диапазон холодопроизводительности ТЭМ находится в пределах 37-70 Вт при среднем перепаде температур между саями 35 К, ток питания составляет 4,8-8,2 А при потребляемой мощности 90-300 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,2 до 0,6.

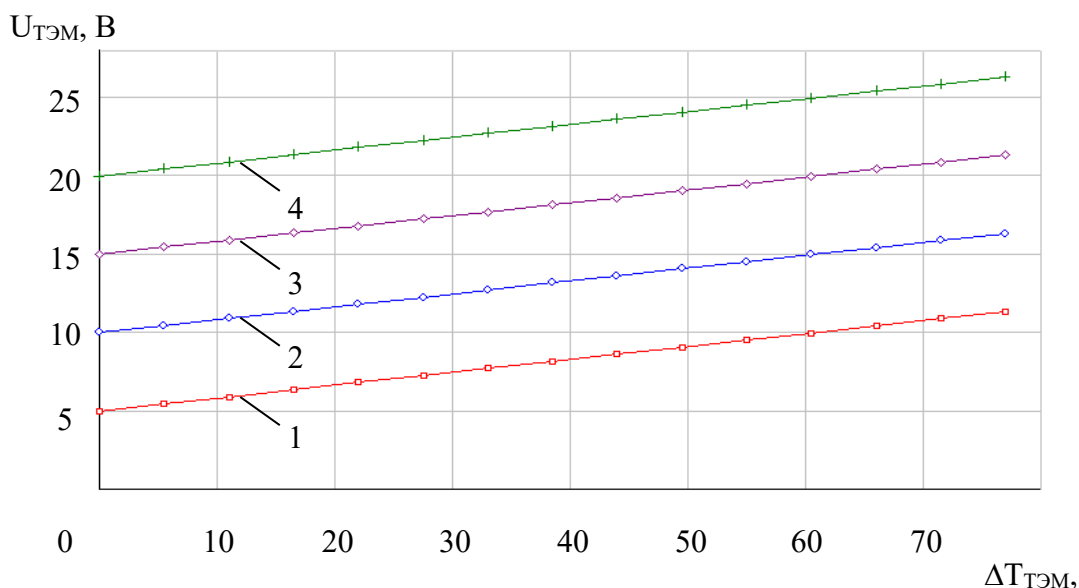


Рис. 4 – Зависимость изменения напряжения питания ТЭМ от изменения перепада температур между саями при различных значениях силы тока питания

1 - $I_{TEM}=2,25$ А, 2 - $I_{TEM}=4,5$ А, 3 - $I_{TEM}=6,26$ А, 4 - $I_{TEM}=9$ А

Fig. 4 – Dependence of the change in the supply voltage of the TEM on the change in the temperature difference between the junctions at different values of the supply current

1 - $I_{TEM} = 2.25$ А, 2 - $I_{TEM} = 4.5$ А, 3 - $I_{TEM} = 6.26$ А, 4 - $I_{TEM} = 9$ А

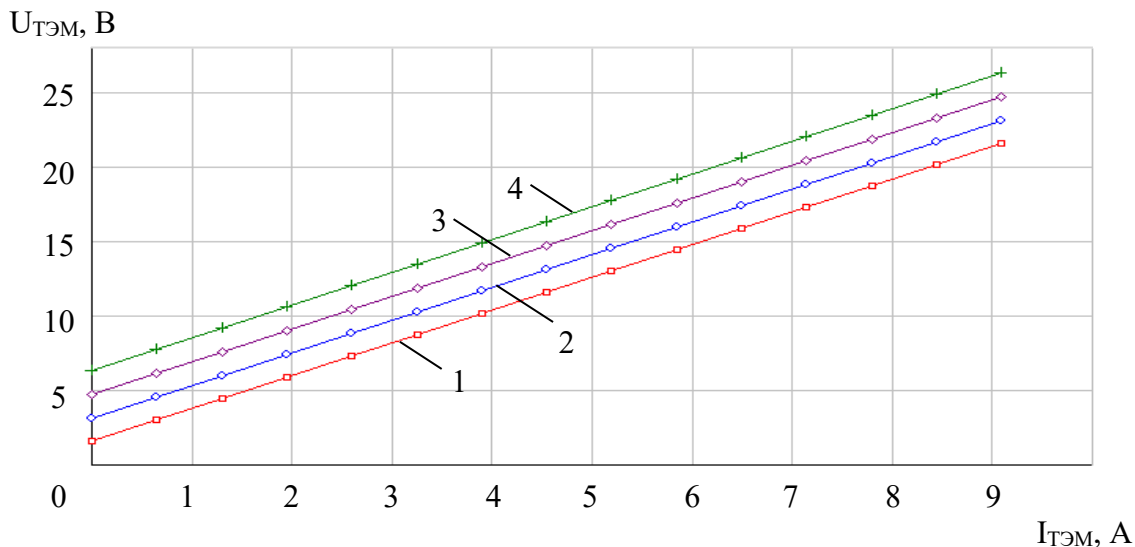


Рис. 5 – Зависимость изменения напряжения ТЭМ от изменения величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями

1- $\Delta T_{TЭМ} = 19,25 K$, 2- $\Delta T_{TЭМ} = 38,5 K$, 3 - $\Delta T_{TЭМ} = 57,75 K$, 4 - $\Delta T_{TЭМ} = 77 K$

Fig. 5 – Dependence of the change in the TEM voltage on the change in the supply current at different values of the temperature difference between the junctions

1 - $\Delta T_{TЭМ} = 19,25 K$, 2 - $\Delta T_{TЭМ} = 38,5 K$, 3 - $\Delta T_{TЭМ} = 57,75 K$, 4 - $\Delta T_{TЭМ} = 77 K$

Как показали результаты исследований, приведенная в статье конструкция позволяет обеспечить локальную гипотермию полости рта пациентов, проходящих курс химио- и биолучевой терапии опухолей головы и шеи. В данном случае температура мундштука, находящегося в полости рта, может быть снижена до значения $8^{\circ} C$, что соответствует результатам, изложенным в работе [14]. При этом рассмотренная в статье конструкция устройства для лечения радиоиндуцированного орофарингеального синдрома, выполненная на основе охлаждающего термоэлектрического устройства, будет обладать существенно меньшими габаритными размерами, не потребовать применения жидкого теплоносителя, обеспечивать бесшумность и высокий ресурс работы.

Вывод. Предложена конструкция охлаждающего термоэлектрического устройства.

На основе расчетов в специализированном программном комплексе определен тип ТЭМ, который можно использовать в разработанной конструкции.

Установлено, что для обеспечения проведения лечебных процедур, связанных с локальной гипотермией полости рта, транспортная система, выполненная в виде прямоугольного параллелепипеда, может иметь длину 60 мм, ширину 40 см и толщину 5 мм, а мундштук, представляющий собой эллипсоид вращения, иметь длину большой полуоси, равную 60 мм, а малой полуоси - 40 мм, причём и транспортная система и мундштук изготавливаются из латуни. Параметры 2 ТЭМ типа DRIFT-1,2 следующие: рабочий диапазон холодопроизводительностей единичного ТЭМ - от 37 до 70 Вт при среднем перепаде температур между спаями 35 К, ток питания - от 4,8 до 8,2 А при потребляемой мощности от 90 до 300 Вт, холодильный коэффициент - от 0,2 до 0,6.

Библиографический список:

1. Легеза В.И., Драчев И.С., Чепур С.В. Осложнения лучевой противоопухолевой терапии. Санкт-Петербург: СпецЛит, 2022. - 207 с
2. Элтинг Л.С., Киф Д.М., Сонис С.Т., [и др.] Измерения орального мукозита, сообщаемые пациентами, у пациентов с раком головы и шеи, получавших лучевую терапию с химиотерапией или без нее // Рак. - 2008 - Том 113 (10). – С. 2704-2713.
3. Тротти А., Беллм Л.А., Эпштейн Б., [и др.]. Частота, тяжесть и связанные с мукозитом исходы у пациентов с раком головы и шеи, получающих лучевую терапию с химиотерапией или без нее: систематический обзор литературы // Радиотерапия и онкология. - 2003. - Том 66 (3). - С. 253-262.

4. Ши А., Миасковски К., Додд М.Дж., [и др.]. Механизмы радиационно-индуцированного орального мукозита и его последствия //Онкологическая сестринская помощь. - 2003. - Том 26 (3). - С. 222-229.
5. Сонис С.Т. Оральный мукозит при раке головы и шеи: риск, биология и лечение // Учебное пособие Американского общества клинической онкологии. - 2013. - Том 33. - С. 236-240.
6. Лалла Р.В., Сонис С.Т., Петерсон Д.Е. Лечение орального мукозита у пациентов с раком // Стоматологические клиники Северной Америки. - 2008. - Том 52 (1). - С. 61-77.
7. Цан Д.-Л., Лин Ч.-Ю., Кан Ч., [и др.]. Сравнение еженедельного и трехнедельного применения цисплатина одновременно с лучевой терапией у пациентов с послеоперационным плоскоклеточным раком полости рта высокого риска // Радиотерапия и онкология. - 2012. - Том 7. - С. 1-8.
8. Musio D., De Felice F., Bulzonetti N., Tombolini V. Цетуксимаб и мукозит полости рта: отличается ли он от мукозита полости рта, вызванного другими препаратами? // Отоларингология. - 2013. - Том 3 (4). - С. 147-150.
9. Walsh L., Gillham C., Dunne M. [и др.]. Токсичность цетуксимаба по сравнению с цисплатином при одновременном применении с лучевой терапией при местнораспространенном плоскоклеточном раке головы и шеи (LAHNSCC) // Радиотерапия и онкология. - 2011. - Том. 98 (1). - С. 38-41.
10. Лалла Р.В., Боуэн Дж., Бараш А., [и др.]. Клинические рекомендации MASCC/ISOO по лечению мукозита, вторичного по отношению к противораковой терапии // Рак. - 2014. - Том 120 (10). - С. 1453-1461.
11. Хаддад Р., Сонис С., Познер М., [и др.]. Рандомизированное исследование фазы 2 сопутствующей химиолучевой терапии с использованием еженедельного карбоплатина/паклитаксела с ежедневным подкожным введением амифостина или без него у пациентов с местнораспространенным раком головы и шеи // Рак. - 2009. - Том 115 (19). - С. 4514-4523.
12. Меировиц А., Кутен М., Биллан С., [и др.]. Уровни цитокинов, тяжесть острого мукозита и необходимость установки ПЭГ-трубки во время химиолучевой терапии рака головы и шеи — проспективное пилотное исследование // Радиотерапия в онкологии. — 2010. — Том 5. — С. 1-7.
13. Ксантинаки А., Николату-Галитис О., Атанасиаду П., [и др.]. Апоптотические и воспалительные маркеры при оральном мукозите у пациентов с раком головы и шеи, получающих лучевую терапию: предварительный отчет // Поддерживающая терапия при раке. — 2008. — Том 16 (9). — С. 1025-1033.
14. Джава Валладбеги, Роджер Хенриксон, Бьорн Тавелин и др. Эффективность нового устройства для криопротекции орального мукозита: рандомизированное, слепое, многоцентровое, параллельное исследование 3-й фазы // Трансплантация костного мозга. - 2022. - Т. 57. - С. 191-197.
15. Ху Б., Ши Х.-Л., Чен З.-Г., Цзоу Дж. Термоэлектрические устройства для медицинских применений: прогресс, проблемы и перспективы // Журнал химической инженерии. - 2022. - Т. 437. - С. 135268.
16. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Магомедова С.Г., Набиев Н.А. Модель термоэлектрического устройства для тепловой терапии рефлексогенных зон//Биомедицинская инженерия. - 2020 - Т. 54. - С. 56-59.
17. Евдулов О.В., Магомедова С.Г. Термоэлектрическая система для лечения пародонтальных заболеваний методом локальной гипотермии / Биомедицинская инженерия. - 2023. Т. 57. - С. 5-8.
18. Заферани С.Х., Гомашчи Р., Сэмс М.В., Чен З.-Г. Термоэлектрические охладители как системы терморегулирования для медицинского применения: проектирование, оптимизация и совершенствование // Наноэнергетика. - 2021. - Т. 90. - С. 106572.
19. Ассылбекова Л., Алдияров Н., Евдулов О., Кулдеев Н. Математическое моделирование термофизических процессов в термоэлектрическом устройстве для охлаждения мозга // Бионанонаука. - 2024. - Т. 14. - С. 1428-1441.
20. <http://www.kryotherm.ru> (дата доступа 01.10.2025).

References:

1. Legeza V.I., Drachev I.S., Chepur S.V. Complications of radiation antitumor therapy. St. Petersburg: SpetsLit, 2022; 207 (In Russ)
2. Elting L.S. Keefe D.M. Sonis S.T., [et al.] Patient-reported measurements of oral mucositis in head and neck cancer patients treated with radiotherapy with or without chemotherapy. *Cancer*. 2008;113(10): 2704-2713.
3. Trotti A., Bellm L.A., Epstein B., [et al.]. Mucositis incidence, severity and associated outcomes in patients with head and neck cancer receiving radiotherapy with or without chemotherapy: a systematic literature review. *Radiotherapy Oncology*. 2003;66 (3):253-262.
4. Shih A., Miaskowski C., Dodd M.J., [et al.]. Mechanisms for radiation-induced oral mucositis and the consequences. *Cancer Nursing*. 2003; 26 (3): 222-229.
5. Sonis S.T. Oral mucositis in head and neck cancer: risk, biology, and management. *American Society of Clinical Oncology Educational Book*. 2013; 33: 236-240.
6. Lalla R.V., Sonis S.T., Peterson D.E. Management of oral mucositis in patients who have cancer. *Dental Clinics of North America*. 2008;52 (1): 61-77.
7. Tsan D.-L., Lin C.-Y., Kang C., [et al.]. The comparison between weekly and three-weekly cisplatin delivered concurrently with radiotherapy for patients with postoperative high-risk squamous cell carcinoma of the oral cavity. *Radiotherapy Oncology*. 2012;7:1-8.

8. Musio D., De Felice F., Bulzonetti N., Tombolini V. Cetuximab and oral mucositis: is it different from oral mucositis caused by other drugs? *Otolaryngology*. 2013;3 (4):147-150.
9. Walsh L., Gillham C., Dunne M. [et al.]. Toxicity of cetuximab versus cisplatin concurrent with radiotherapy in locally advanced head and neck squamous cell cancer (LAHNSCC). *Radiother. Oncol.* 2011;98 (1): 38-41.
10. Lalla R.V., Bowen J., Barasch A., [et al.]. MASCC/ISOO clinical practice guidelines for the management of mucositis secondary to cancer therap. *Cancer*. 2014;120 (10):1453-1461.
11. Haddad R., Sonis S., Posner M., [et al.]. Randomized phase 2 study of concomitant chemoradiotherapy using weekly carboplatin/paclitaxel with or without daily subcutaneous amifostine in patients with locally advanced head and neck cancer. *Cancer*. 2009; 115 (19): 4514-4523.
12. Meirovitz A., Kuten M., Billan S., [et al.]. Cytokines levels, severity of acute mucositis and the need of PEG tube installation during chemo-radiation for head and neck cancer-a prospective pilot study. *Radiotherapy Oncology*. 2010; 5:1-7.
13. Xanthinaki A., Nicolatou-Galitis O., Athanassiadou P., [et al.]. Apoptotic and inflammation markers in oral mucositis in head and neck cancer patients receiving radiotherapy: preliminary report. *Supportive Care in Cancer*. 2008; 16 (9):1025-1033.
14. Java Walladbegi, Roger Henriksson, Björn Tavelin, et al. Efficacy of a novel device for cryoprevention of oral mucositis: a randomized, blinded, multicenter, parallel group, phase 3 trial. *Bone marrow transplantation*. 2022; 57:191-197.
15. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
16. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Magomedova S.G., Nabiev N.A. Model of a thermoelectric device for heat treatment of reflex-ogenic zones. *Biomedical Engineering*. 2020;54: 56-59.
17. Evdulov O.V., Magomedova S.G. A thermoelectric system for the treatment of periodontal diseases by local hypothermia. *Biomedical Engineering*. 2023; 57: 5-8.
18. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement. *Nano energy*. 2021; 90:106572.
19. Assylbekova L., Aldiyarov N., Yevdulov O., Kuldeev N. Mathematical modeling of thermophysical processes in a thermoelectric device for cooling the brain. *BioNanoScience*. 2024;14:1428-1441.
20. <http://www.kryotherm.ru> (дата доступа 01.10.2025).

Сведения об авторах:

Евдулов Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; профессор кафедры инженерной физики; ole-ole-ole@rambler.ru

Кардашев Анвар Магомедович, врач радиотерапевт; anvarkard@gmail.com

Магомедов Гаджияв Гаджимагомедович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; gadjiyav1999@mail.ru.

Хазамова Мадина Абдулаевна, кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой теоретической и общей электротехники; kaftoe2016@yandex.ru.

Information about authors:

Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; Prof. of the Department of Engineering Physics; ole-ole-ole@rambler.ru

Anvar M. Kardashev, radiation therapist; anvarkard@gmail.com.

Gadzhiyav G. Magomedov, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; gadjiyav1999@mail.ru.

Madina A. Khazamova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Theoretical and General Electrical Engineering; kaftoe2016@yandex.ru.

Information about authors:

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

Поступила в редакцию/Received 28.10.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 30.11.2025.

Принята в печать/Accepted for publication 18.01.2026.