

5. Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Vesnin S.G., Sidorov I.A., Sedankin M.K., Solov'ev Yu.V., Agasieva S.V., Chizhikov S.V., Gorbachev D.A., Vidyakin S.I. Studies of a microwave radiometer based on integrated circuits // Biomedical Engineering. 2020. Vol. 53 (6). PP. 413-416.
  6. Vesnin S., Sedankin M., Ovchinnikov L., Leushin V., Skuratov V., Nelin I., Konovalova A. Research of a microwave radiometer for monitoring of internal temperature of biological tissues // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 4. № 5 (100). PP. 6-15.
  7. Sedankin M.K., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Vesnin S.G., Sidorov I.A., Chupina D.N., Agasieva S.V., Skuratov V.A., Chizhikov S.V. Microwave radiometry of the pelvic organs // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53 (4). PP. 288-292.
  8. Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Sidorov I.A., Vesnin S.G., Porokhov I.O., Sedankin M.K., Agasieva S.V., Chizhikov S.V., Gorbacheva E.N., Lazarenko M.I., Shashurin V.D. Use of multichannel microwave radiometry for functional diagnostics of the brain // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53. № 2. PP. 108-111.
  9. Gudkov A.G., Sedankin M.K., Leushin V.Yu., Vesnin S.G., Sidorov I.A., Agasieva S.V., Ovchinnikov L.M., Vetrova N.A. Antenna applicators for medical microwave radiometers // Biomedical Engineering. 2018. Vol. 52 (4). PP. 235-238.
  10. Sedankin M.K., Chupina D.N., Nelin I.V., Skuratov V.A. Development of patch textile antenna for medical robots / 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). IEEE. 2018. PP. 413-420.
  11. Официальный сайт <http://www.radiometry.ru/rtm-01-res-description/>.
  12. Lauk-Dubitskiy S.E., Pushkarev A.V., Korovin I.A. Porcine heart valve, aorta and trachea cryopreservation and thawing using polydimethylsiloxane // Cryobiology. 2020. Vol. 93. PP. 91-101.
  13. Burkov I.A., Pushkarev A.V., Shakurov A.V., Tsiganov D.I., Zherdev A.A. Numerical simulation of multiprobe cryoablation synergy using heat source boundary // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 147. № 118946.
  14. Zakirov A., Belousov S., Valuev I., Levchenko V., Perepelkina A., Zempo Y. Using memory-efficient algorithm for large-scale time-domain modeling of surface plasmon polaritons propagation in organic light emitting diodes // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 905. PP. 012-030.
  15. Sedankin M.K., Leushin V.Yu., Gudkov A.G., Vesnin S.G., Khromov D.A., Porokhov I.O., Sidorov I.A., Agasieva S.V., Gorbacheva E.N. Modeling of thermal radiation by the kidney in the microwave range // Biomedical Engineering. 2019. Vol. 53 (1). PP. 60-65.
  16. Rodrigues D.B., Maccarini P.F., Salahi S., Oliveira T.R., Pereira P.J., Limão-Vieira P., Stauffer P.R. Design and optimization of an ultra wideband and compact microwave antenna for radiometric monitoring of brain temperature // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2014. Vol. 61. № 7. PP. 2154-2160.
- Сергей Георгиевич Веснин,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
генеральный директор,  
ООО «Фирма «РЭС»,  
*Михаил Константинович Седанкин,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
ст. научный сотрудник,  
ФГБУ ГНЦ РФ –  
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,  
*Александр Григорьевич Гудков,*  
д-р техн. наук, профессор,  
*Виталий Юрьевич Леушин,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
*Игорь Александрович Сidorov,*  
канд. техн. наук, ст. научный сотрудник,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
*Игорь Олегович Порохов,*  
канд. техн. наук, начальник сектора,  
АО «ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга»,  
*Светлана Викторовна Агасиева,*  
канд. техн. наук, доцент,  
ФГАОУ ВО «Российский  
университет дружбы народов»,  
*Святослав Игоревич Видякин,*  
аспирант,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,  
г. Москва,  
e-mail: ooo.giperion@gmail.com

*Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, И.Ш. Миспахов, А.П. Адамов*

## **Термоэлектрический холодильник для краткосрочного хранения и перевозки биологических материалов**

### **Аннотация**

Рассмотрена конструкция термоэлектрического холодильника для краткосрочного хранения и транспортировки биологических субстанций, реализованная на базе каскадной термоэлектрической батареи (ТЭБ). Особенностью прибора является возможность одновременного хранения нескольких типов биологических объектов, имеющих разные температуры хранения. Представлены зависимости изменения температуры в контрольных точках устройства во времени при различных токах питания ТЭБ. Установлено, что для организации требуемого температурного режима хранения биологического материала могут быть использованы стандартные промышленно выпускаемые ТЭБ.

### **Введение**

Биологический материал, такой как кровь, ранние эмбрионы, образцы ткани и др., при обычных условиях подвержен деградации. Длительное сохранение его жизнеспособности возможно только при использовании низких температур. В крупных хранилищах биологических объектов в основном применяется оборудование, функционирующее на основе жидкого азота [1], которое в случае удаления от его запасов явля-

ется малоэффективным. Для решения задачи хранения биологических субстанций в медицинских учреждениях, находящихся в местах, удаленных от крупных хранилищ жидкого азота, применяются автономные рефрижераторные установки [2]. В качестве таковых в основном применяются системы, работающие по смешанному циклу Клименко, а также каскадные фреоновые установки. Одним из существенных недостатков таких аппаратов является наличие полугерметичного компрессора, что приводит к постоянным утечкам рабочего агента и необ-

ходимости его периодической дозаправки. Также перечисленные системы требуют высоких эксплуатационных затрат и имеют значительную удельную стоимость на единицу хранящегося биологического материала. Кроме того, в рассмотренных случаях невозможна одновременная перевозка в одной системе биологических субстанций, имеющих различные температуры хранения.

Указанные ограничения можно снять путем использования в аппаратах для хранения биологических материалов в качестве источника холода ТЭБ [3], [4], которые позволяют обеспечить требуемый температурный режим объектов при их перевозке, характеризуются высоким ресурсом работы, экологичностью, возможностью регулировки температуры в объеме. Однако существующие конструкции термоэлектрических устройств такого рода не могут обеспечить одновременное хранение и перевозку нескольких типов биологических субстанций, имеющих различные температуры хранения. В данных условиях целесообразными являются разработка и исследование термоэлектрического холодильника, позволяющего устранить указанные недостатки существующих аппаратов для хранения и перевозки биологических материалов.

Целью рассматриваемой работы является исследование конструкции термоэлектрического холодильника для краткосрочного хранения и перевозки биологических материалов, предусматривающего возможность одновременной транспортировки нескольких типов биологических объектов, имеющих разные оптимальные температурные режимы хранения.

### Материалы и методы

Конструкция термоэлектрического холодильника для краткосрочного хранения и перевозки биологических материалов представлена на *рис. 1*.

Прибор содержит теплоизолированный корпус 1 с крышкой 2. Внутри корпуса 1 находится изолированная от окружа-

ющей среды камера 3, разделенная на теплоизолированные друг от друга отсеки, сопряженные с каскадами ТЭБ 4. Отсеки камеры 3 в зависимости от требуемого температурного уровня приводятся в тепловой контакт с различными каскадами ТЭБ, которая обеспечивает возможность хранения и транспортировки одновременно нескольких биологических субстанций с различными температурами хранения. В стационарных условиях отвод теплоты от горячих спаев ТЭБ осуществляется съемным жидкостным теплообменным аппаратом 5, располагаемым в нижней части корпуса 1 прибора. Во время транспортировки жидкостный теплообменный аппарат 5 заменяется наполненным радиатором с плавящимся рабочим веществом (например, льдом) 6. В корпус 1 холодильника монтируется съемный аккумуляторный источник постоянного электрического тока.

Такая конструкция обеспечивает возможность хранения и транспортировки одновременно нескольких биологических субстанций с различными температурами хранения. Процесс хранения и перевозки биологических материалов в приборе осуществляется следующим образом. После помещения биологических объектов в соответствующие отсеки камеры 3 в корпусе 1 термостата и их теплоизоляции от окружающей среды путем закрытия крышки 2 на ТЭБ 4 подается питание от источника постоянного тока. При транспортировке биологического материала питание на ТЭБ поступает от встроенного в корпус 1 термостата съемного аккумулятора источника постоянного тока, а при работе холодильника в стационарных условиях электрический ток поступает на ТЭБ от отдельного источника электрической энергии. При подаче на ТЭБ 4 постоянного электрического тока соответствующей полярности спаи ТЭБ 4, приведенные в тепловой контакт с отсеками камеры 3, охлаждаются. Соответственно охлаждается и находящийся в отсеках камеры биологический материал. При этом биологический материал, размещенный в отсеке камеры, сопря-

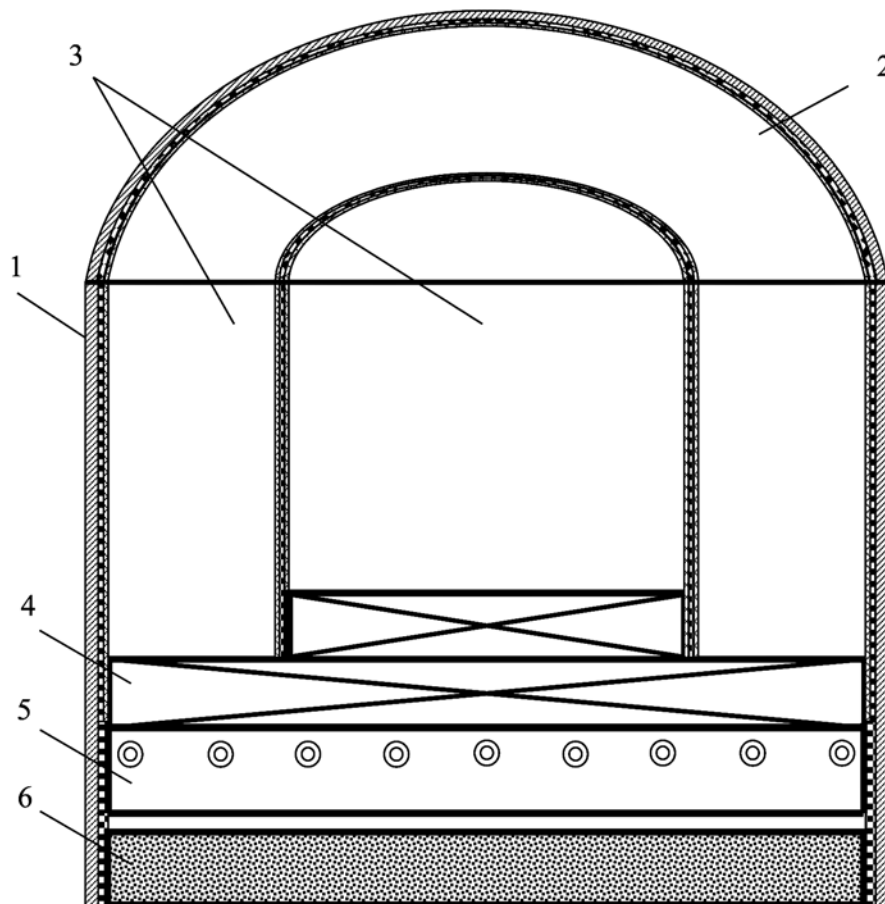


Рис. 1. Конструкция термоэлектрического холодильника для краткосрочного хранения биологических материалов (пояснение – в тексте)

женной с последним (наиболее холодным) каскадом ТЭБ 4, охлаждается сильнее всего, биологический материал, находящийся в отсеке камеры, контактирующей с предпоследним каскадом ТЭБ 4, охлаждается менее сильно и т. д. Биоматериал в отсеке камеры, приведенной в контакт с последним каскадом ТЭБ 4, имеет наибольшую температуру. Необходимая температура в каждом отсеке камеры, требуемая для хранения конкретного типа биологического материала, может быть создана путем подбора тока питания, геометрических размеров и количества термоэлементов в ТЭБ.

Разработан опытный образец термоэлектрического холодильника, предназначенный для краткосрочного хранения (до 48 ч) и перевозки биологического материала, в частности крови (температура хранения 279 К), почечного трансплантата (температура хранения 275 К), стволовых клеток (температура хранения 230 К), выполненный на базе стандартной двухкаскадной ТЭБ типа ТВ-2-(199-199)-0.8 (производитель ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург [5]). Габаритные размеры холодильника: 350 × 450 × 300 мм, вес – 3,2 кг. Проведено его экспериментальное исследование.

## Результаты

Результаты натурных испытаний опытного образца термоэлектрического холодильника представлены на *рис. 2, 3*, где показано изменение температуры в контрольных точках устройства во времени при токе питания ТЭБ 7 А (*рис. 2*), а также изменение температуры ее оконечного (первого) каскада во времени при различных значениях тока питания, вплоть до максимального (*рис. 3*).

В качестве контрольных точек рассматривались имитаторы биологических материалов (желатиновое желе) и холодные каскады ТЭБ. На *рис. 2*: 1 – температура первого каскада ТЭБ; 2 – температура имитатора биологического материала, охлаждаемого первым каскадом ТЭБ; 3 – температура второго каскада ТЭБ; 4 – температура имитатора биологического материала, охлаждаемого вторым каскадом ТЭБ.

Как следует из полученных данных, при выходе устройства на режим между биологической субстанцией и холодными кас-

кадами ТЭБ имеет место определенная разность температур, составляющая для условий эксперимента величину порядка 4 К. Это обусловлено неидеальностью контакта биоматериала и ТЭБ, наличием между ними некоторого зазора, обладающего тепловым сопротивлением. Уменьшить его значение, очевидно, возможно, использовав оребрение поверхности контакта или специальную высокотеплопроводную прослойку (наполнитель). При этом обязательным требованием к такого рода наполнителю будет соблюдение соответствующих санитарно-гигиенических норм.

*Рис. 3* дает возможность оценить предельные возможности снижения температуры в термоэлектрическом холодильнике при максимальной величине питающего тока используемой ТЭБ (на *рисунке* кривая 1 соответствует току питания 10 А; кривая 2 – току 7 А; кривая 3 – току 4 А). В соответствии с полученными данными увеличение тока питания ТЭБ в пределах до его максимального значения снижает температуру оконечного каскада и соответственно биоматериала. Так, увеличение тока питания ТЭБ с 4 до 10 А снижает температуру каскада с 245 до 223 К. Таким образом, как следует из результатов измерений, добиться температурного режима хранения стволовых клеток, требующих самого глубокого охлаждения из рассмотренных разновидностей биоматериалов, можно, использовав стандартную промышленно выпускаемую двухкаскадную ТЭБ. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод об отсутствии необходимости разработки термобатарей специальной конструкции, рассчитанных на высокую холодопроизводительность и особые условия эксплуатации.

Представляет интерес оптимизация конструкции прибора по его массогабаритным показателям, что на сегодняшний день актуально, поскольку перевозка биоматериалов производится на дальние расстояния летательными аппаратами. Исследования в данном направлении проводятся. Видимых путей здесь несколько. Они состоят в подборе более легких материалов несущей конструкции холодильника и наполнителей, применении для отвода теплоты от горячих спаев ТЭБ плавящихся рабочих веществ с как можно меньшей плотностью или же применении испарительной системы теплоотвода, использо-

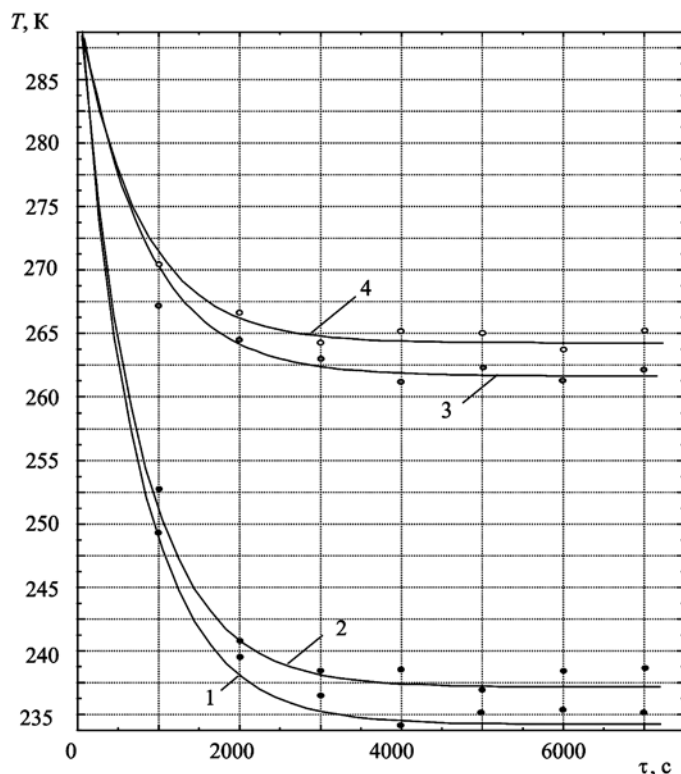


Рис. 2. Изменение температуры контрольных точек опытного образца термоэлектрического холодильника во времени (пояснение – в тексте)

вании для данных нужд заборного холодного воздуха, эксплуатации более эффективных по весовым показателям аккумуляторов электрической энергии для питания ТЭБ.

### Заключение

Разработан термоэлектрический холодильник для краткосрочного хранения и перевозки биологических материалов, дающий возможность одновременного хранения нескольких типов биологических объектов на разных температурных уровнях. При этом температурные режимы хранения биологических объектов обеспечиваются путем сопряжения отсеков с ними с каскадами ТЭБ. Получены зависимости изменения температуры в контрольных точках опытного образца термоэлектрического холодильника во времени при различных величинах токов питания ТЭБ вплоть до максимального значения. Установлено, что для организации требуемого температурного режима хранения биологического материала могут быть использованы стандартные промышленно выпускаемые ТЭБ. Для снижения перепада температур между биологическим материалом и каскадами ТЭБ целесообразным является использование высокотеплопроводных наполнителей. Для уменьшения массогабаритных показателей устройства целесообразным является применение материалов с меньшей плотностью, более эффективных с точки зрения весовых параметров аккумуляторов электрической энергии, а при транспортировке летательными аппаратами – заборного холодного воздуха.

### Список литературы:

1. Смолянинов А.Б., Кованько Г.Н., Багаутдинов Ш.М., Хурцилава О.Г. Криоконсервация и криохранение стволовых клеток в банках пуповинной крови и костного мозга // Вестник Международной академии холода. 2009. № 2. С. 38-43.
2. Иволгин Д.А., Смолянинов А.Б., Багаутдинов Ш.М., Корovina К.В., Шунькина К.В., Смирнова А.В. Современные способы криоконсервации стволовых клеток пуповинной крови для общественного регистра доноров // Вестник Международной академии холода. 2012. № 1. С. 36-39.

3. Исмаилов Т.А., Миспахов И.Ш., Евдулов О.В., Хазамова М.А. Исследование теплофизических процессов в системе краткосрочного хранения и транспортировки биологических материалов // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3. С. 10-14.
4. Исмаилов Т.А., Миспахов И.Ш., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А. Термоэлектрический термостат для хранения и перевозки биоматериалов / Патент РФ на изобретение № 2416769; опубл. 20.04.2011 г. Бюл. № 11.
5. <http://www.kryotherm.ru> (дата доступа 22.11.2019).

Тагир Абдурашидович Исмаилов,  
д-р техн. наук, профессор, президент,  
Олег Викторович Евдулов,  
канд. техн. наук, доцент,  
Играмидин Шарафидинович Миспахов,  
канд. техн. наук, ст. преподаватель,  
кафедра теоретической  
и общей электротехники,  
Александр Петрович Адамов,  
д-р техн. наук, профессор,  
кафедра радиотехники и телекоммуникаций  
и микроэлектроники,  
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный  
технический университет»,  
г. Махачкала,  
e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

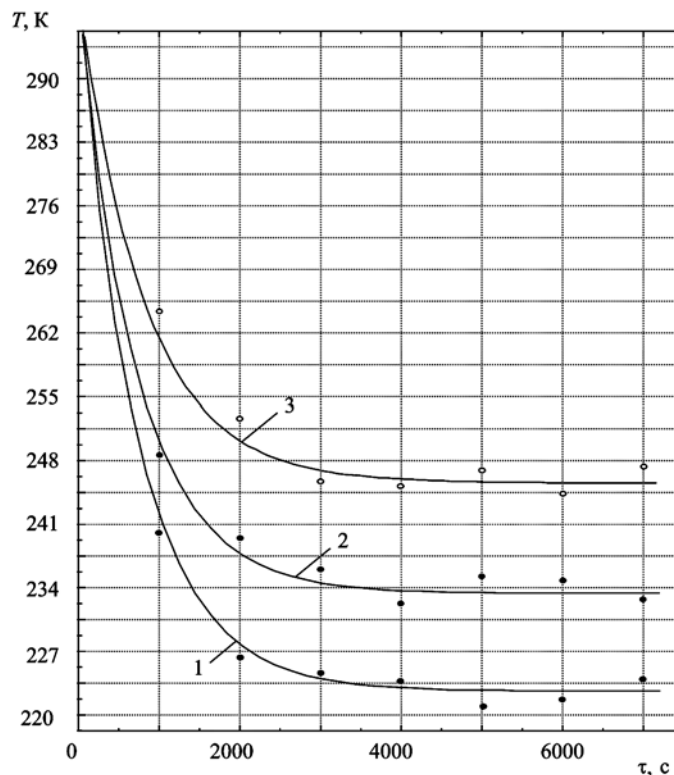


Рис. 3. Изменение температуры окончательного каскада ТЭБ во времени при различных токах питания (пояснение – в тексте)