

РАЗДЕЛ 3. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.362:537.322

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Т.А. Исмаилов, И.Ш. Миспахов, О.В. Евдулов, Д.В. Евдулов

Рассмотрена конструкция опытного образца термоэлектрической системы для краткосрочного хранения и транспортировки биологических субстанций, реализованная на базе каскадной термоэлектрической батареи. Особенностью системы является возможность одновременного краткосрочного хранения и транспортировки нескольких типов биологических объектов, имеющих разные температуры хранения. Представлены зависимости изменения температуры в контрольных точках системы во времени при различных величинах токов питания ТЭБ, типов наполнителей отсеков с биологическим материалом, температурах окружающей среды. Установлено, что для организации требуемого температурного режима хранения биологического материала могут быть использованы стандартные термоэлектрические модули. При этом целесообразным является заполнения пространства отсека для хранения биологической субстанции высокотеплопроводным наполнителем.

Ключевые слова: термоэлектрическая система, биологический материал, краткосрочное хранение и транспортировка, опытный образец, экспериментальные исследования, измерение.

Биологический материал, такой как клетки, кровь, ранние эмбрионы, образцы ткани др. при обычных условиях подвержен изменениям и разрушению. Длительное сохранение его жизнеспособности возможно только при использовании низких температур. В крупных хранилищах биологических объектов в основном используется оборудование, выполненное на основе жидкого азота [1]. Данное обстоятельство дает возможность обеспечивать стабильный уровень температур хранения биоматериалов, при этом основные затраты на обслуживание такой аппаратуры состоят только в необходимости регулярного пополнения запасов жидкого азота. Однако, в случае достаточно небольших мест для хранения биологических субстанций, применение оборудования на основе жидкого азота является уже менее выгодным. Это связано с тем, что при замораживании и хранении небольшого количества биологического материала, используемые технические средства имеют небольшие объемы (несколько десятков литров). Одновременно, для пополнения, используемого в них азота, в хранилище биоматериалов требуется наличие дополнительных средств для хранения большого количества жидкого азота или же регулярное периодическое приобретение его небольших

объемов у соответствующих производителей.

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 [3, 4]. Одним из существенных недостатков таких аппаратов является наличие полугерметичного компрессора, что приводит к постоянным утечкам рабочего агента и необходимости его периодической дозаправки. Другим недостатком является использование нескольких компрессоров, что снижает надежность таких систем. Также переносимые системы требуют высоких эксплуатационных затрат и имеют высокую удельную стоимость на единицу хранящегося биологического материала.

Рассмотренные системы для хранения биологических материалов имеют ограничения по продолжительности работы, так как требуют пополнения объема используемого в них жидкого азота. Кроме этого, в рассмотренных случаях невозможна одновременная перевозка в одной системе биологических субстанций, имеющих различные температу-

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ры хранения (например, стволовые клетки имеют температуру хранения – 223 К, кровь 281 К, образцы печени, селезенки, легкого 277 К [5]). Указанные ограничения можно снять путем использования в аппаратах для хранения биологических материалов в качестве источника холода термоэлектрических батарей (ТЭБ), которые могут 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 [6, 7] не могут обеспечить одновременное хранение и перевозку нескольких типов биологических субстанций, имеющих различные температуры хранения. В данных условиях целесообразным является разработка и всестороннее исследование термоэлектрической системы (ТЭС), позволяющей устранить указанные недостатки существующих аппаратов для хранения и перевозки биологических материалов.

Целью работы является экспериментальное исследование конструкции ТЭС для краткосрочного хранения и перевозки биологических материалов, предусматривающей

возможность одновременной транспортировки нескольких типов биологических объектов, имеющих разные оптимальные температурные режимы хранения.

Изучение процессов теплообмена осуществлялось на опытной модели ТЭС (рисунок 1) [8], содержащей теплоизолированный корпус 1 с крышкой 2. Внутри корпуса находится камера, разделенная на два теплоизолированных друг от друга отсека 3, объем которых может заполняться различного рода наполнителями (металлические сотовые конструкции, сетки, стружка и т.п.). Дно каждого из отсеков приведено в хороший тепловой контакт с ТЭБ 4. Причем первый отсек контактирует с однокаскадной ТЭБ типа TURBO-1,3-Parallel, а второй – с двухкаскадной ТЭБ типа ТВ-2-(127-127)-1,15 (производитель обоих типов ТЭБ – ОАО «Криотерм», г. Санкт-Петербург [9]). Отвод теплоты от горячих спаев осуществлялся посредством воздушного теплоотвода, включающего в себя плоскую радиаторную систему 5 и вентиляторный агрегат 6. При проведении эксперимента в каждый из отсеков помещался имитатор биологического материала 7, в качестве которого использовалось желатиновое желе. Внешний вид опытной модели ТЭС представлен на рисунке 2.

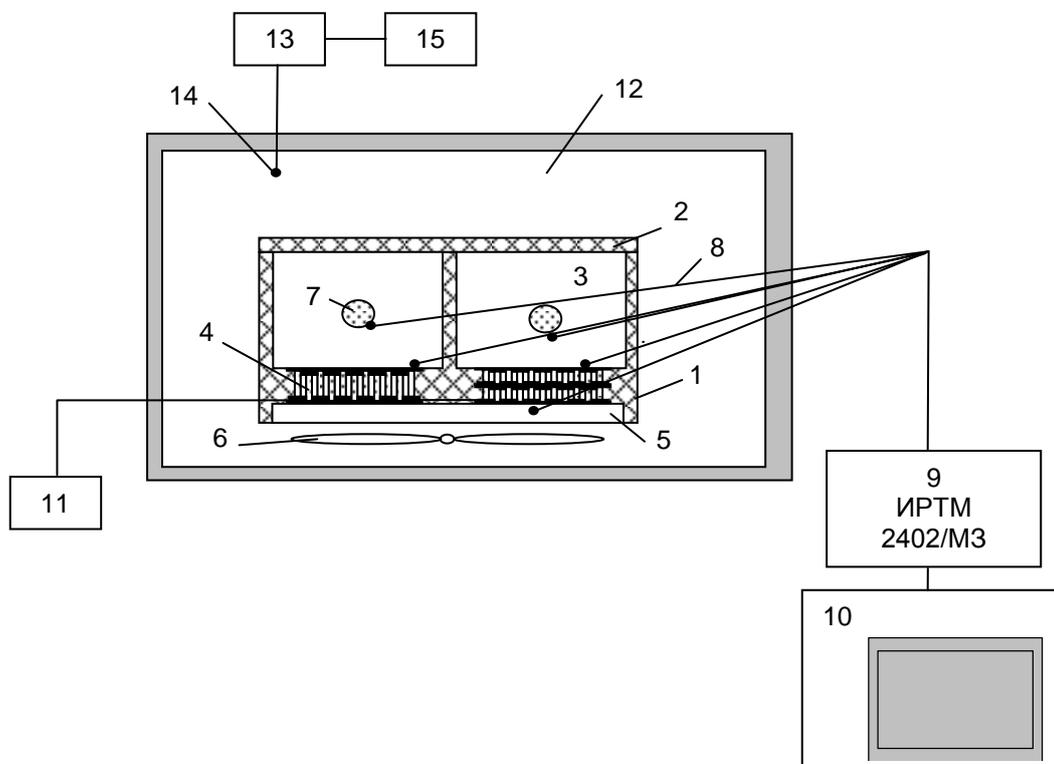


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментального стенда



Рисунок 2 – Внешний вид опытного образца ТЭС для хранения и перевозки биологического материала

Для проведения замеров значений температуры в характерных точках конструкции, использовались медь-константановые термопары 8, опорные спаи которых размещались в сосуде Дьюара, заполненном тающим льдом. Сигналы с термопар через многоканальный переключатель поступали на измерительный комплекс 9, значения измеренного сигнала с которого передавались на персональный ЭВМ 10. В качестве измерительного комплекса использовалась система ИРТМ 2402/М3 10 по методике, аналогичной изложенной в [10].

ТЭБ запитывались от управляемого многоканального источника электрической энергии 11, величина тока и падения напряжения в цепи которого контролировалась с помощью встроенных в источник вольтметра и амперметра.

При проведении экспериментальных исследований опытный образец ТЭС помещался в теплоизолированную климатическую камеру 12, заданная температура и относительная влажность в которой регулировалась блоком управления 13, связанным с датчиком температуры и влажности 14, показания которого выводились на цифровое табло 15.

Опыты проводились сериями по четыре эксперимента в идентичных условиях.

Основной задачей при проведении экспериментальных исследований опытного образца системы являлось определение зависимости изменения температуры в различных точках исследуемого объекта от времени при фиксированных значениях тока питания ТЭБ, использовании различного рода наполнителей отсеков с биологическим материалом, а

также изменяющихся значений температуры окружающей среды. Важным являлось сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими с целью проверки адекватности математической модели.

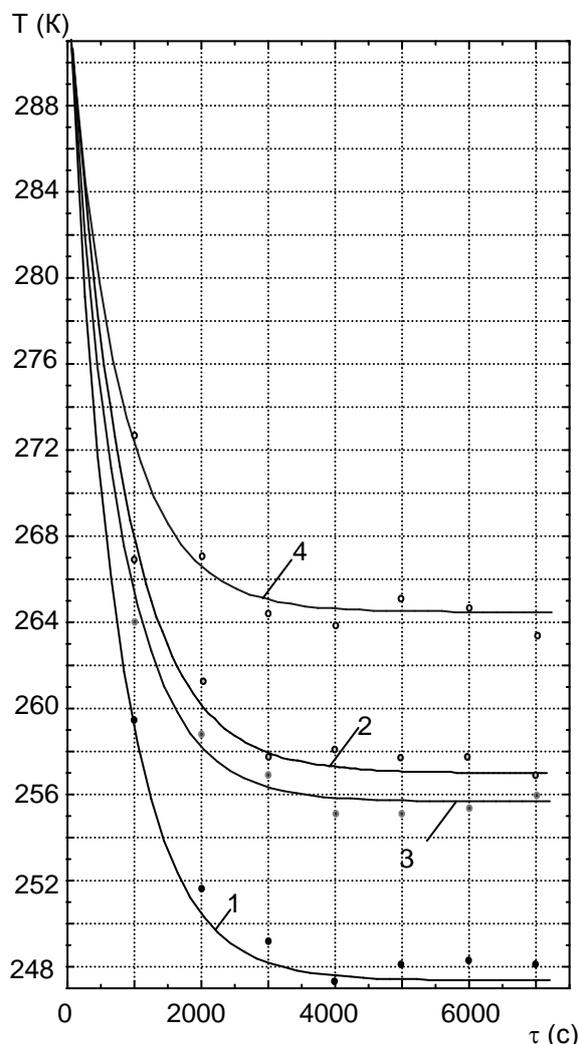


Рисунок 3 – Изменение температуры контрольных точек опытного образца ТЭС во времени при токе питания однокаскадной ТЭБ 5 А, двухкаскадной ТЭБ – 8 А: 1 – температура холодного спаи двухкаскадной ТЭБ, 2 – температура имитатора биологического материала, охлаждаемого двухкаскадной ТЭБ, 3 – температура холодного спаи однокаскадной ТЭБ, 4 – температура имитатора биологического материала, охлаждаемого однокаскадной ТЭБ

На рисунке 3 рассмотрено изменение температуры контрольных точек опытного образца ТЭС во времени при токе питания

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

однокаскадной ТЭБ 5 А и двухкаскадной ТЭБ – 8 А. В качестве контрольных точек рассматривались биологические материалы и холодные спаи ТЭБ. Как следует из представленных данных, при отсутствии какого-либо наполнителя в отсеке с биологической субстанцией разность температур между ней и холодными спаями ТЭБ имеет существенную величину. При данных величинах тока питания это различие составляет порядка 8 К при выходе ТЭС в стационарный режим работы. Данное обстоятельство обуславливает необходимость применения различного рода наполнителей, увеличивающих эффективных коэффициент теплопередачи между стенками отсеков и биологическим материалом.

Получены характеристики изменения температуры имитатора биологического материала во времени при различных значениях тока питания однокаскадной и двухкаскадной ТЭБ. Данные зависимости позволяют оценить возможные температурные уровни хранения биологических материалов при использовании конкретного типа ТЭБ. В соответствие с расчетными данными увеличение тока питания каждой из ТЭБ в пределах до его максимального значения снижает температуру биологической субстанции. Так увеличение тока питания двухкаскадной ТЭБ с 4 до 8 А снижает температуру биологического материала с 266 до 257 К, для однокаскадной ТЭБ увеличение тока питания с 3 до 7 А снижает температуру биологического объекта с 270 до 261 К. Таким образом при оптимальном значении тока питания для каждой используемой ТЭБ максимальное снижение температуры биологического объекта составляет 257 К (отсек с двухкаскадной ТЭБ) и 261 К (отсек с однокаскадной ТЭБ).

Как было отмечено выше, на температурный режим биологической субстанции существенно влияет теплообмен внутри соответствующего отсека для хранения. При отсутствии наполнителей в емкости для хранения биологического материала имеет место естественный конвективный теплообмен между охлаждаемыми стенками контейнера и биологическим материалом. Именно поэтому в ТЭС присутствует значительная разность температур между холодными спаями ТЭБ и охлаждаемыми биологическими субстанциями. Для ее уменьшения целесообразным является применение различного рода наполнителей, позволяющих интенсифицировать теплообмен в отсеке. Были рассмотрены варианты, при которых в пространство отсека для хранения биологического материала вводились сотовые конструкции, выполнен-

ные из меди и алюминия. Полученные результаты для отсека с двухкаскадной ТЭБ представлены на графиках, изображенных на рисунке 4. В соответствие с ними введение указанных наполнителей в пространство между биологическим материалом и стенками отсека значительно снижает разность температур между ними. Так введение сотовой конструкции из алюминия снижает температуру биологического объекта на 4,5 К, а сотовой конструкции из меди на 6,5 К по сравнению с эксплуатацией ТЭС без оных.

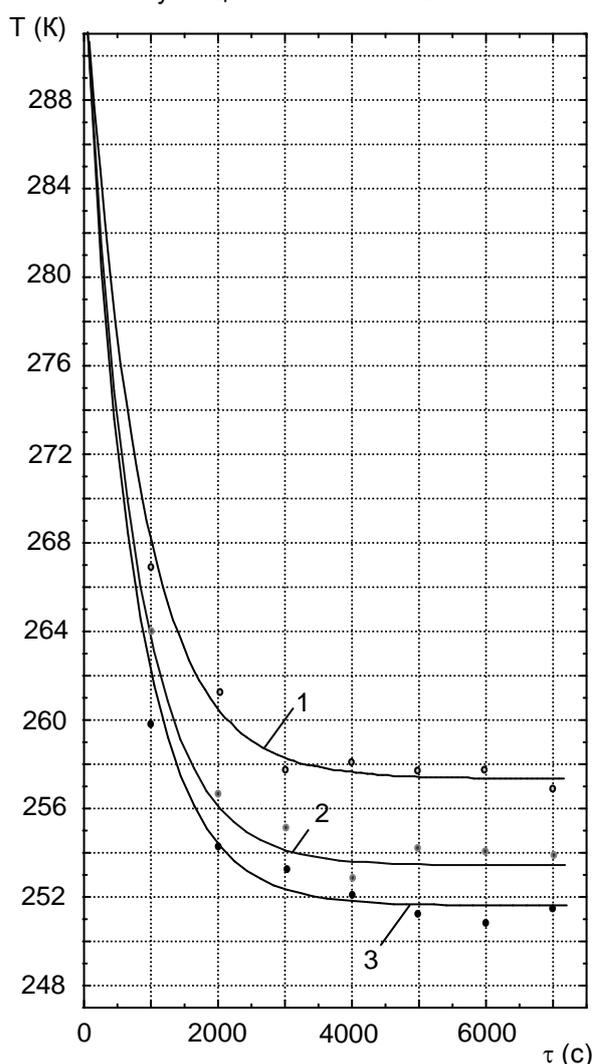


Рисунок 4 – Изменение температуры имитатора биологического материала во времени при токе питания двухкаскадной ТЭБ 8 А и различных типах наполнителей

1 – наполнитель отсутствует,
2 – наполнитель из алюминиевой сотовой конструкции, 3 – наполнитель из медной сотовой конструкции

При этом в случае, когда нет ограничений по массе конструкции ТЭС, наиболее предпочтительным вариантом является заполнение пространства частой медной сеткой, либо медной крошкой.

Надежность функционирования разработанной ТЭС во многом зависит от эффективного теплосъема с опорных спаев ТЭБ. На рисунке 5 для оценки возможностей теплосъема с горячих спаев ТЭБ в системе приведены данные об изменении температуры ребристого радиатора ТЭС во времени при охлаждающем воздействии для различных значений тока питания ТЭБ.

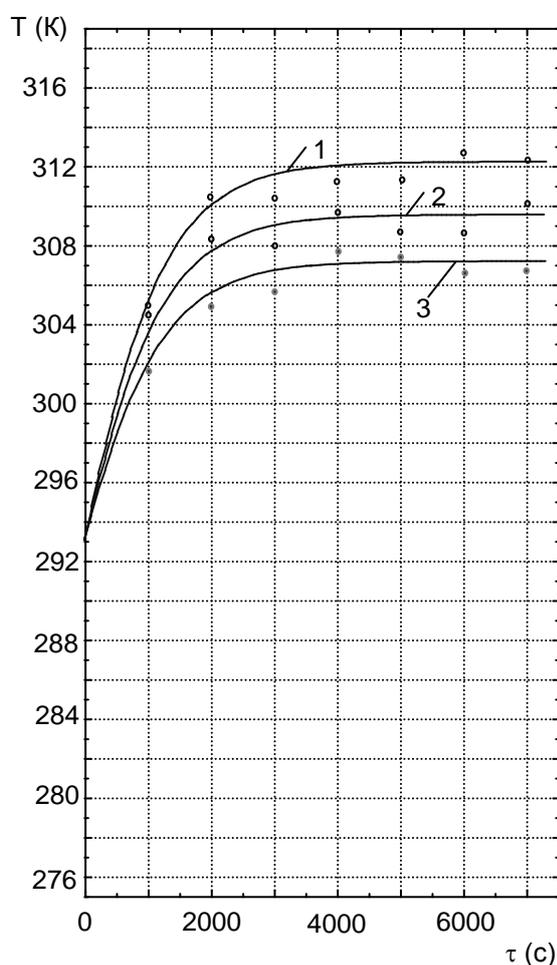


Рисунок 5 – Изменение температуры горячего спаев ТЭБ во времени при различных значениях тока питания двухкаскадной ТЭБ
1 – $I=3$ А, 2 – $I=5$ А, 3 – $I=7$ А

Согласно приведенным графикам зависимостей следует, что значение температуры горячих спаев ТЭБ вполне приемлемо для используемого типа (при токе питания двухкаскадной ТЭБ, равном 7 А, температура го-

80

рячего спаев последней составляет примерно 312 К). Данное обстоятельство определяет достаточно эффективный теплосъем в рассматриваемых условиях с горячих спаев ТЭБ и дает основание полагать о надежной работе разработанного прибора при перевозке биологического материала.

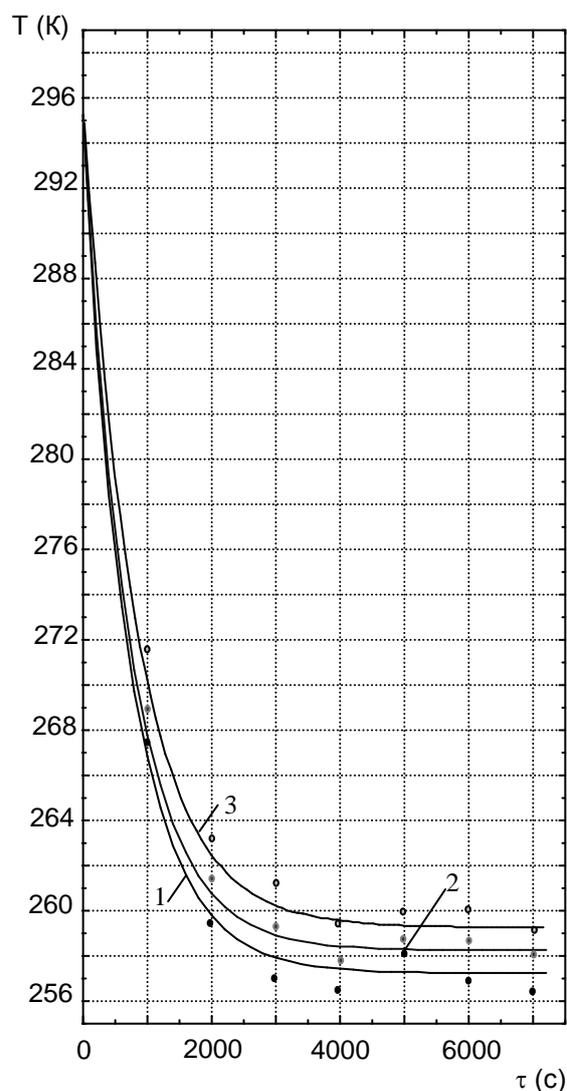


Рисунок 6 – Изменение температуры имитатора биологического материала во времени при токе питания двухкаскадной ТЭБ 8 А и различных значениях температуры окружающей среды
1 – $T_{cp}=293$ К, 2 – $T_{cp}=303$ К, 3 – $T_{cp}=313$ К

Для оценки влияния внешних условий на работу ТЭС построены зависимости изменения температуры биологического объекта во времени при различных величинах температуры окружающей среды (рисунок 6). Как следует из

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕВОЗКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

представленных данных, увеличение температуры окружающей среды на 10 К вызывает увеличение температуры охлаждаемой биологической субстанции не более, чем на 1 К при выбранном типе теплоизоляции. Данное обстоятельство дает возможность говорить об отсутствии необходимости использования специальных мер по тепловой изоляции в ТЭС.

По результатам экспериментов проведено сопоставление расчетных [11] и экспериментальных данных. На рисунках 3–6 помимо экспериментальных точек изображены также и результаты теоретических изысканий.

Представленные данные определяют удовлетворительно совпадение расчет и экспериментальных данных, их максимальное расхождение не превышает 7–7,5 °С. Наибольшее отклонение расчетных данных от опыта наблюдается, в основном, на промежутке времени, связанном с выходом системы на режим, что определяется влиянием окружающей среды и неидеальной тепловой изоляцией системы «прибор-объект воздействия», а также некоторым разбросом параметров ТЭБ и измерительных приборов. Причем в случае достижения наименьших температур экспериментальные данные имеют наибольшее отклонение от теоретических. Данное обстоятельство, в основном, связано с неидеальностью тепловой изоляции, что не удовлетворяет условиям, принятым в математических моделях, и соответственно, теплопритокам к устройству.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена ТЭС для краткосрочного хранения и транспортировки биологических субстанций, реализованная на базе каскадной ТЭБ, дающая возможность одновременной транспортировки нескольких типов биологических объектов, имеющих разные температуры хранения. Получены зависимости изменения температуры в контрольных точках ее опытного образца во времени при различных величинах токов питания ТЭБ, типов наполнителей отсеков с биологическим материалом, температурах окружающей среды. Установлено, что для организации требуемого температурного режима хранения биологического материала могут быть использованы стандартные термоэлектрические модули. При этом целесообразным является заполнения пространства отсека для хранения биологической субстанции высокотеплопроводным наполнителем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смолянинов, А. Б. Криоконсервация и криохранилище стволовых клеток в банках пуповинной крови и костного мозга / А. Б. Смолянинов, Г. Н. Кованько,

Ш. М. Багаутдинов, О. Г. Хурцилава // Вестник Международной академии холода. – 2009. – № 2. – С. 38–43.

2. Нечеткий, А. В. Организационные аспекты применения низкотемпературных технологий в современной производственной трансфузиологии / А. В. Нечеткий, В. Н. Вильянинов, С. П. Калеко, Ш. М. Багаутдинов, Г. И. Петренко // Вестник Международной академии холода. – 2005. – № 2. – С. 34–39.

3. Иволгин, Д. А. Современные способы криоконсервации стволовых клеток пуповинной крови для общественного регистра доноров / Д. А. Иволгин, А. Б. Смолянинов, Ш. М. Багаутдинов, К. В. Коровина, К. В. Шунькина, А. В. Смирнова // Вестник Международной академии холода. – 2012. – № 1. – С. 36–39.

4. Кальнин, И. М. Оценка эффективности термодинамики циклов пароконденсационных холодильных машин и тепловых насосов / И. М. Кальнин, К. Н. Фадеков // Холодильная техника. – 2006. – № 3. – С. 16–25.

5. Четкин, А. В. Низкотемпературные технологии хранения клеток крови и костного мозга / А. В. Четкин, В. Н. Вильянинов, Ш. М. Багаутдинов // Здравоохранение и медицинская техника. – 2005. – Т. 18, № 4.

6. Булат, Л. П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России / Л. П. Булат // Холодильная техника. – 2009. – № 7. – С. 34–37.

7. Филин, С. О. Современное состояние и перспективы разработки и производства стационарных термоэлектрических холодильников / С. О. Филин, Б. Закшевский // Термоэлектричество. – 2008. – № 2. – С. 74–88.

8. Патент РФ на изобретение № 2416769. Термоэлектрический термостат для хранения и перевозки биоматериалов // Исмаилов Т. А., Миспахов И. Ш., Евдулов О. В., Юсуфов Ш. А., Бюл. № 11 от 20.04.2011.

9. <http://www.kryotherm.spb.ru>.

10. Исмаилов, Т. А. Экспериментальный стенд для измерения рабочих характеристик термоэлектрического устройства для локального замораживания тканей гортани / Т. А. Исмаилов, О. В. Евдулов, Т. А. Рагимова // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 167–170.

11. Исмаилов, Т. А. Исследование теплофизических процессов в системе краткосрочного хранения и транспортировки биологических материалов / Т. А. Исмаилов, И. Ш. Миспахов, О. В. Евдулов, М. А. Хазамова // Вестник Международной академии холода. – 2014. – № 3. – С. 10–14.

Исмаилов Тагир Абдурашидович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Миспахов Играмидин Шарафидинович, к.т.н., ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Евдулов Олег Викторович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет».

Евдулов Денис Викторович, к.т.н., ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», тел.: (8722) 62-37-15, e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru.