

УДК 681.382

Ісмаїлов Т.А., Міспахов І.Ш., Євдулов О.В., Євдулов Д.В.

ФГБОУ ВО «Дагестанський державний технічний університет», Росія,
м. Махачкала, ім. імама Шаміля, буд.70, 367015

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОРОТКОЧАСНОГО ЗБЕРІГАННЯ Й ПЕРЕВЕЗЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто конструкцію дослідного зразка термоелектричного приладу для короткочасного зберігання й транспортування біологічних субстанцій, реалізовану на базі каскадної термоелектричної батареї. Особливістю приладу є можливість одночасного короткочасного зберігання й транспортування декількох типів біологічних об'єктів, що мають різні температури зберігання. Показано залежності зміни температури в контрольних точках приладу в часі за різних величин струмів живлення ТЕБ, типів наповнювачів відсіків з біологічним матеріалом, температур навколишнього середовища. Встановлено, що для організації необхідного температурного режиму зберігання біологічного матеріалу можуть бути використані стандартні термоелектричні модулі. При цьому доцільним є заповнення простору відсіку для зберігання біологічної субстанції наповнювачем.

Ключові слова: термоелектричний пристрій, біологічний матеріал, короткочасне зберігання й транспортування, дослідний зразок, експериментальні дослідження, вимірювання.

A design of thermoelectric device prototype for short-term storage and transportation of biological substances realized on the basis of multi-stage thermopile is considered. The specific feature of the device is possibility of simultaneous short-term storage and transportation of several types of biological objects having different storage temperatures. Dependences of temperature variation with time at device control points are represented for different values of thermopile supply currents, types of fillers for compartments with biological material and ambient temperatures. It is established that storage temperature requirements of biological material can be assured through use of standard thermoelectric modules. In so doing, it is advisable to fill in the compartment for storage of biological substance with high thermal conductivity filler.

Key words: thermoelectric device, biological material, short-term storage and transportation, prototype, experimental studies, measurement.

Вступ

Біологічний матеріал, такий як клітини, кров, ранні ембріони, зразки тканини та ін. за звичайних умов піддається змінам і руйнуванню. Тривале збереження його життєздатності можливе тільки при використанні низьких температур. У великих сховищах біологічних об'єктів в основному використовується устаткування, основане на рідкому азоті [1]. Ця обставина дає можливість забезпечувати стабільний рівень температур зберігання біоматеріалів, при цьому основні витрати на обслуговування такої апаратури полягають тільки в необхідності регулярного поповнення запасів рідкого азоту. Однак у випадку досить невеликих місць для зберігання біологічних речовин, застосування устаткування на основі рідкого азоту вже менш вигідне. Це пов'язано з тим, що при заморожуванні й зберіганні невеликої кількості біологічного матеріалу використовували технічні засоби мають невеликі об'єми (кілька десятків літрів). Одночасно для поповнення використовуваного в них

азоту у сховище біоматеріалів потрібна наявність додаткових засобів для зберігання великої кількості рідкого азоту або ж регулярне періодичне придбання його невеликих об'ємів у відповідних виробників.

Для розв'язання завдання зберігання біологічних речовин у медичних установах, віддалених від великих сховищ рідкого азоту, застосовуються автономні рефрижераторні установки [2]. Вони в основному застосовуються як системи, що працюють по змішаному циклу Клименко, а також каскадні фреонові установки [3, 4]. Одним з істотних недоліків таких апаратів є наявність напівгерметичного компресора, що призводить до постійних витоків робочого агента й необхідності його періодичної дозаправки. Іншим недоліком є використання декількох компресорів, що знижує надійність таких систем. Також перелічені системи вимагають високих експлуатаційних витрат і мають високу питому вартість на одиницю біологічного матеріалу, що зберігається.

Розглянуті системи для зберігання біологічних матеріалів мають обмеження за тривалістю роботи, тому що вимагають поповнення об'єму використовуваного в них рідкого азоту. Крім цього, у розглянутих випадках неможливе одночасне перевезення в одній системі біологічних речовин, що мають різні температури зберігання (наприклад, стовбурові клітини мають температуру зберігання – 223 К, кров – 281 К, зразки печінки, селезінки, легені – 277 К [5]). Зазначені обмеження можна зняти шляхом використання в апаратах для зберігання біологічних матеріалів як джерела холоду термоелектричних батарей (ТЕБ), які можуть забезпечити необхідний температурний режим об'єктів під час їхнього перевезення, характеризуються високим ресурсом роботи, екологічністю, можливістю регулювання температури в об'ємі. Однак наявні конструкції термоелектричних обладнань такого роду [6, 7] не можуть забезпечити одночасне зберігання й перевезення декількох типів біологічних речовин, що мають різні температури зберігання. За таких умов доцільним є розробка й всебічне дослідження термоелектричних приладів (ТЕП), що дає можливість усунути зазначені недоліки наявних апаратів для зберігання й перевезення біологічних матеріалів.

Мета роботи – експериментальне дослідження конструкції ТЕП для короткочасного зберігання й перевезення біологічних матеріалів, що передбачає можливість одночасного транспортування декількох типів біологічних об'єктів, які мають різні оптимальні температурні режими зберігання.

Конструкція дослідного зразка ТЕП й експериментального стенда

Вивчення процесів теплообміну здійснювалося на дослідній моделі ТЕП (рис.1) [8], що містить теплоізолюваний корпус 1 із кришкою 2.

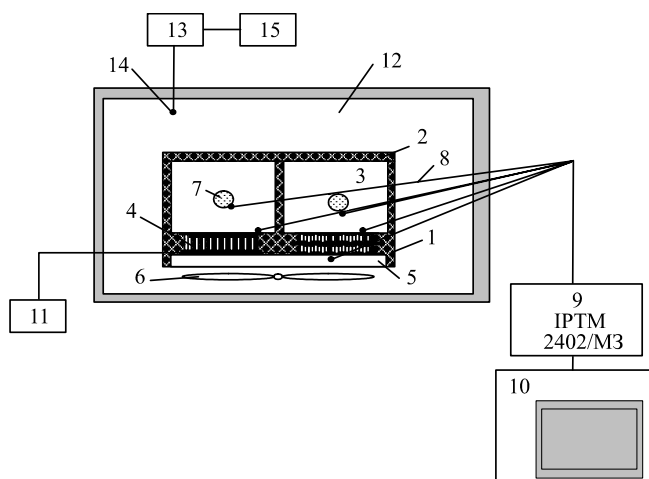


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенда.

Усередині корпусу знаходиться камера, розділена на два теплоізовані один від одного відсіки 3, об'єм яких може заповнюватися різного роду наповнювачами (металеві стільникові конструкції, сітки, стружка й т.п.). Дно кожного з відсіків знаходиться в належному тепловому контакті з ТЕБ 4. Причому перший відсік контактує з однокаскадною ТЕБ типу TURBO-1.3-parallel, а другий – із двокаскадною ТЕБ типу ТВ-2-(127-127)-1.15 (виробник обох типів ТЕБ - ВАТ «Криотерм», м. Санкт-Петербург [9]). Відвід теплоти від гарячих спаїв здійснювався за допомогою повітряного тепловідводу, що включає в себе плоску радіаторну систему 5 і вентиляторний агрегат 6. Під час експерименту у кожному з відсіків містився імітатор біологічного матеріалу 7 – желатинове желе. Зовнішній вигляд експериментальної моделі ТЕП представлений на рис 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд дослідного зразка ТЕП для зберігання й перевезення біологічного матеріалу.

Для вимірювань значень температури в характерних точках конструкції, використовувалися мідь-константові термопары 8, опорні спаї яких розміщалися в посудині Дьюара, заповненій льодом, що тане. Сигнали з термопар через багатоканальний перемикач надходили на вимірювальний комплекс 9, значення вимірювального сигналу, з якого передавалися на персональну ЕОМ 10. Як вимірювальний комплекс використовувалася система ИРТМ 2402/МЗ 10.

ТЕБ живилась від керованого багатоканального джерела електричної енергії 11, величина струму й спад напруги в колі якого контролювалася за допомогою вбудованих у джерело вольтметра й амперметра.

Під час експериментальних досліджень дослідний зразок ТЕП містився в теплоізованій кліматичній камері 12, задана температура й відносна вологість у якій регулювалася блоком керування 13, пов'язаним з датчиком температури й вологості 14, показання якого виводилися на цифрове табло 15.

Досліди здійснювалися серіями по чотири експерименти в ідентичних умовах.

Основним завданням експериментальних досліджень дослідного зразка приладу було визначення залежності зміни температури в різних ділянках досліджуваного об'єкта від часу при фіксованих значеннях струму живлення ТЕБ, використанні різного роду наповнювачів відсіків з біологічним матеріалом, а також мінливих значень температури навколишнього середовища. Важливим було порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними з метою перевірки адекватності математичної моделі.

Результати експериментальних досліджень

На рис. 3 розглянуто зміну температури контрольних ділянок дослідного зразка ТЕП в часі при струмі живлення однокаскадної ТЕБ 5 А і двокаскадної ТЕБ – 8 А. Як контрольні ділянки розглядалися біологічні матеріали й холодні спаї ТЕБ. Як впливає із показаних даних, за відсутності якого-небудь наповнювача у відсіку з біологічною субстанцією різниця температур між нею й холодними спаями ТЕБ

має істотну величину. При даних величинах струму живлення ця відмінність становить порядку 8 К при виході ТЕП в стаціонарний режим роботи. Ця обставина обумовлює необхідність застосування різного роду наповнювачів, що збільшують ефективний коефіцієнт теплопередачі між стінками відсіків і біологічним матеріалом.

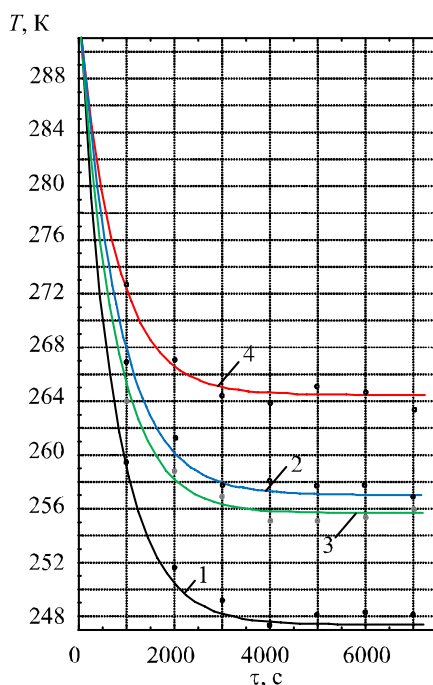


Рис. 3. Зміна температури контрольних точок дослідного зразка ТЕПу у часі зі струмом живлення однокаскадної ТЕБ 5 А, двокаскадної ТЕБ – 8 А:
 1 – температура холодного спаю двокаскадної ТЕБ, 2 – температура імітатора біологічного матеріалу, що охолоджується двокаскадною ТЕБ, 3 – температура холодного спаю однокаскадної ТЕБ, 4 – температура імітатора біологічного матеріалу, що охолоджується однокаскадною ТЕБ.

Отримані характеристики зміни температури імітатора біологічного матеріалу в часі за різних значень струму живлення однокаскадної й двокаскадної ТЕБ. Ці залежності дають можливість оцінити можливі температурні рівні зберігання біологічних матеріалів при використанні конкретного типу ТЕБ. У відповідності із отриманими даними збільшення струму живлення кожної з ТЕБ у межах до його максимального значення знижує температуру біологічної субстанції. Так, збільшення струму живлення двокаскадної ТЕБ з 4 до 8 А знижує температуру біологічного матеріалу з 266 до 257 К, для однокаскадної ТЕБ збільшення струму живлення з 3 до 7 А знижує температуру біологічного об'єкта з 270 до 261 К. У такий спосіб за оптимального значення струму живлення для кожної використовуваної ТЕБ максимальне зниження температури біологічного об'єкта становить 257 К (відсік із двокаскадною ТЕБ) і 261 (відсік з однокаскадною ТЕБ).

Як було відзначено вище, на температурний режим біологічної субстанції суттєво впливає теплообмін всередині відповідного відсіку для зберігання. За відсутності наповнювачів у ємності для зберігання біологічного матеріалу маємо природний конвективний теплообмін між охолоджуваними стінками контейнера й біологічним матеріалом. Саме тому в ТЕП наявна значна різниця температур між холодними спаями ТЕБ і охолоджуваними біологічними речовинами. Для її зменшення доцільним є застосування різного роду наповнювачів, що роблять можливим інтенсифікувати теплообмін у відсіку. Були розглянуті варіанти, за яких у простір відсіку для зберігання біологічного матеріалу вводилися

стільникові конструкції, виконані з міді й алюмінію. Отримані результати для відсіку із двокаскадною ТЕБ показано на графіках, зображених на рис. 4. У відповідності з ними введення зазначених наповнювачів у простір між біологічним матеріалом і стінками відсіку значно знижує різницю температур між ними. Так введення стільникової конструкції з алюмінію знижує температуру біологічного об'єкта на 4.5 К, а стільникової конструкції з міді на 6.5 К в порівнянні з експлуатацією ТЕП без них.

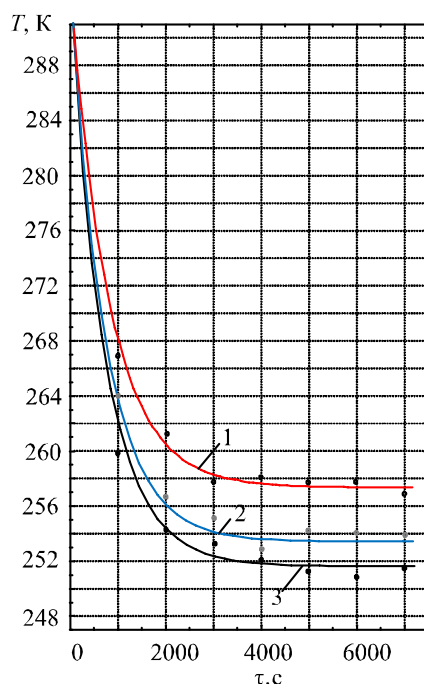


Рис. 4. Зміна температури імітатора біологічного матеріалу в часі при струмі живлення двокаскадної ТЕБ 8 А й різних типах наповнювачів:

1 – наповнювач відсутній, 2 – наповнювач з алюмінієвої сотової конструкції,
3 – наповнювач з мідної сотової конструкції.

При цьому у випадку, коли немає обмежень по масі конструкції ТЕП, найкращим варіантом є заповнення простору густою мідною сіткою, або мідною крихтою.

Надійність функціонування розробленого ТЕП багато в чому залежить від ефективного тепловідводу з опорних спаїв ТЕБ. На рис. 5 для оцінки можливостей тепловідводу з гарячих спаїв ТЕБ у системі наведено дані про зміну температури ребристого радіатора ТЕП в часі за охолоджуючого впливу для різних значень струму живлення ТЕБ.

Згідно з наведеними графіками залежностей впливає, що значення температури гарячих спаїв ТЕБ цілком прийнятні для використовуваного типу (зі струмом живлення двокаскадної ТЕБ, рівному 7 А, температура гарячого спаю останньої становить приблизно 312 К). Така обставина визначає досить ефективний тепловідвід у розглянутих умовах з гарячих спаїв ТЕБ і дає підставу вважати надійною роботу розробленого приладу під час перевезення біологічного матеріалу.

Для оцінки впливу зовнішніх умов на роботу ТЕП побудовано залежності зміни температури біологічного об'єкта в часі за різних величин температури навколишнього середовища (рис. 6). Як впливає із поданих даних, збільшення температури навколишнього середовища на 10 К спричиняє збільшення температури охолоджуваної біологічної субстанції не більше, ніж на 1 К при вибраному типі теплоізоляції. Ця обставина дає можливість говорити про відсутність необхідності використання спеціальних заходів для теплової ізоляції в ТЕП.

За результатами експериментів здійснено зіставлення розрахункових [10] і експериментальних даних. На рис. 3–6, крім експериментальних ділянок, зображені також і результати теоретичних пошуків.

Показані дані підтверджують задовільний збіг розрахунків й експериментальних даних, їхня максимальна розбіжність не перевищує 7–7.5 °С. Найбільше відхилення розрахункових даних від експерименту спостерігається в основному на проміжку часу, пов'язаному з виходом системи на режим, що визначається впливом навколишнього середовища й неідеальною тепловою ізоляцією системи «прилад-об'єкт впливу», а також деяким розкидом параметрів ТЕБ і вимірювальних приладів. Причому у випадку досягнення найменших температур експериментальні дані мають найбільше відхилення від теоретичних. Ця обставина в основному пов'язана з неідеальністю теплової ізоляції, що не задовольняє умовам, прийнятим у математичних моделях і відповідно теплопритоками до пристрою.

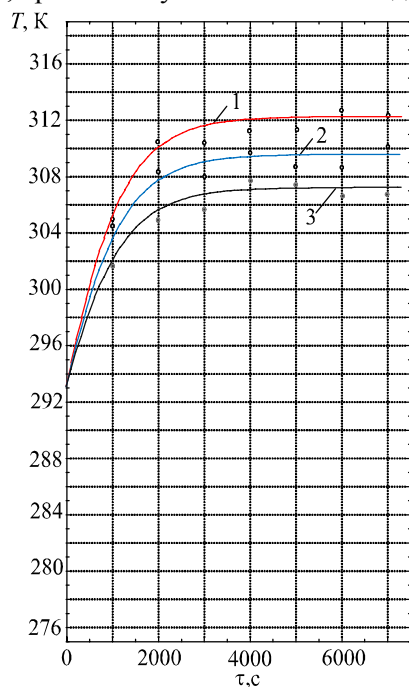


Рис. 5. Зміна температури гарячого спаю ТЕБ у часі за різних значень струмів живлення двокаскадної ТЕБ, 1 – $I = 3$ А, 2 – $I = 5$ А, 3 – $I = 7$ А.

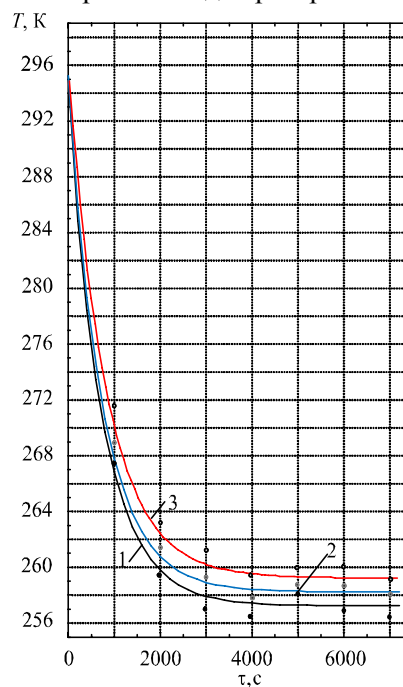


Рис. 6. Зміна температури імітатора біологічного матеріалу в часі зі струмом живлення двокаскадної ТЕБ 8 А та різних значеннях температури навколишнього середовища, 1 – $T_{сер} = 293$ К, 2 – $T_{сер} = 303$ К, 3 – $T_{сер} = 313$ К.

Висновки

1. Запропонований ТЕП для короткочасного зберігання й транспортування біологічних субстанцій, що дає можливість одночасного транспортування декількох типів біологічних об'єктів, котрі мають різні температури зберігання. При цьому різні температурні режими зберігання біологічних об'єктів забезпечуються шляхом сполучення відсіків з ними з різними типами ТЕБ, у тому числі виконаними каскадними.
2. Отримані залежності зміни температури контрольних ділянок дослідного зразка ТЕП в часі за різних величин струмів живлення ТЕБ, типів наповнювачів відсіків з біологічним матеріалом, температур навколишнього середовища.
3. У відповідності з отриманими даними збільшення струму живлення кожної з ТЕБ у межах до його

- максимального значення знижує температуру біологічної субстанції. За оптимального значення струму живлення в умовах експерименту встановлено, що для кожної використовуваної ТЕБ максимальне зниження температури біологічного об'єкта становить 257 К (відсік з двохкаскадною ТЕБ) і 261 К (відсік з однокаскадною ТЕБ).
4. Для інтенсифікації теплопередачі від ТЕБ до біологічного об'єкта доцільним є заповнення простору відсіку для зберігання останнього високотеплопровідним наповнювачем у вигляді високотеплопровідної стільникової конструкції, сітки, крихти.
 5. У результаті експериментів встановлено, що для організації необхідного температурного режиму зберігання біологічного матеріалу можуть бути використані стандартні термоелектричні модулі.
 6. Як впливає із отриманих даних, збільшення температури навколишнього середовища незначно впливає на температурний режим біологічного об'єкта в запропонованому конструктивному виконанні ТЕП, що дає можливість не вживати спеціальних заходів для теплової ізоляції пристрою.
 7. Результати експерименту задовільно збігаються з результатами розрахунків, максимальне відхилення їх від теоретичних значень не перевищує 7 – 7.5 °С.

Література

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. Нечеткий А.В., Вильянинов В.Н., Калеко С.П., Багаутдинов Ш.М., Петренко Г.И. Организационные аспекты применения низкотемпературных технологий в современной производственной трансфузиологии // Вестник Международной академии холода. – 2005. № 2. – С. 34 – 39.
3. Иволгин Д.А., Смолянинов А.Б., Багаутдинов Ш.М., Коровина 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.
4. Кальнин И.М., Фадеков К.Н. Оценка эффективности термодинамики циклов парокомпрессионных холодильных машин и тепловых насосов // Холодильная техника. 2006. – №3. – С. 6 – 25.
5. Чечеткин А.В., Вильянинов В.Н., Багаутдинов Ш.М. Низкотемпературные технологии хранения клеток крови и костного мозга // Здоровоохранение и медицинская техника. – 2005. – Т. 18, № 4. – С. 33 – 41.
6. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. – 2009. – № 7. – С. 34 – 37.
7. Филин, С.О., Закшевский Б. Современное состояние и перспективы разработки и производства стационарных термоэлектрических холодильников // 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. Т.А. Исмаилов, И.Ш. Миспахов, О.В. Евдулов, М.А. Хазамова Исследование теплофизических процессов в системе краткосрочного хранения и транспортировки биологических материалов // Вестник Международной академии холода. – 2014. – № 3. – С. 74 – 88.

Надійшла до редакції 05.05.2016.