

УДК 62-713.5

DOI: 10.20998/2411-0558.2022.02.12

**Я. С. ЗАБІЛО**, асп., НТУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ,

**В. В. ШЛИКОВ**, д-р техн. наук, доц., НТУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ,

**В. В. КОЗЯР**, канд. мед. наук, доц., НТУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", Київ

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВНУТРІШНЬОСУДИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДОНОРСЬКИХ ОРГАНІВ

Практика трансплантацій включає транспортування донорських органів в межах країн, між країнами та континентами із використанням різних складних та коштовних систем, здатних певний час забезпечувати життєздатність цих органів. В результаті чого виникає необхідність в розробці надійної та простої у використанні системи охолодження, собівартість якої була б прийнятною для закладів охорони здоров'я. Окремою проблемою є розробка конструкції системи внутрішньосудинного охолодження, для збереження життєздатності органу, призначеного для трансплантації, з урахуванням його особливостей. Іл.: 6. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** трансплантація; транспортування донорських органів; життєздатність органу; система охолодження; елемент Пельтьє; стабілізація температури.

**Постановка проблеми та аналіз літератури.** Трансплантація органу є серйозним хірургічним втручанням із застосуванням препаратів для придушення імунної системи та можливістю інфікування, відторгнення пересаженого органа та виникнення інших серйозних ускладнень, включаючи смерть [1]. Деякі органи, наприклад серце, неможливо отримати від живого донора, тому виникає проблема їх доставки до реципієнта. Для транспортування донорських органів використовують консервацію, яка переважно забезпечується за рахунок гіпотермії, в умовах якої зменшується метаболічна активність тканин, зберігаються запаси аденозину трифосфату (АТФ) та запобігається утворення вільних радикалів у фазі реперфузії [2]. Для зменшення пошкоджень у вилучених із тіла донора та ізольованих органах та тканинах використовують три основні способи консервації:

- нормотермічну перфузію – підтримка обмінних процесів на вихідному (оптимальному) рівні за рахунок безперервної доставки кисню та поживних речовин в умовах нормотермії [3];
- гіпотермічну перфузію та статичну консервацію – підтримка обмінних процесів на зниженому рівні за рахунок охолодження до субнормальних температур [4];

- заморожування при негативних температурах (кріоконсервацію) – максимально повне, оборотне припинення обмінних процесів у клітинах [5].

Вибір методу і конкретного способу консервації органів та тканин визначається їх структурою, інтенсивністю обміну речовин і виконуваною функцією [6]. Вважають, що перфузійні системи з пульсуючою подачею перфузату дозволяють не тільки покращити функціонування трансплантатів у ранньому та віддаленому пост трансплантаційному періодах, а й збільшити кількість донорських органів, придатних для трансплантації за рахунок їх пост ішемічної реабілітації під час перфузії [7].

З метою охолодження використовують пристрої різної складності, функціонування яких базується на ряді фізичних явищ. Перспективним є використання ефекту Пельтьє [8], який реалізований в відповідних елементах.

Технічні характеристики наявних на ринку елементів TEC1-12706 дають змогу розробити компактну та некоштовну систему, яка повинна забезпечити охолодження донорського органа при постійній циркуляції до температури 4 – 6 °С та підтримку такого режиму протягом 8 годин. Перевагою елемента Пельтьє є невеликі розміри, відсутність будь-яких рухомих частин, а також газів і рідин. При змінненні напрямку струму можливо як охолодження, так і нагрівання - це дає можливість термостатування при температурі навколишнього середовища як вище, так і нижче температури термостатування [9]. Основною проблемою в побудові елементів Пельтьє з високим ККД є те, що вільні електрони в речовині є одночасно переносниками і електричного струму, і тепла. Це обумовлено тим, що на додаток до тепла Пельтьє завжди виділяється і джоулівське тепло, яке частково перекриває ефект охолодження. З іншого боку, при одній і тій же кількості тепла, що виділяється внаслідок ефекту Пельтьє на одному контакті і поглинається на іншому, різниця температур між контактами буде тим більша, чим менша теплопередача від гарячого кінця провідника до холодного, тобто чим менший коефіцієнт теплопровідності [10]. Матеріал для елемента Пельтьє повинен одночасно володіти двома взаємовиключними властивостями – добре проводити електричний струм, але погано проводити тепло, інакше температурні ефекти будуть нівельовані.

**Мета роботи.** Підвищення результатів трансплантацій за рахунок надійної підтримки життєздатності донорських органів на етапі транспортування.

**Основна частина.** Досліджувалася робота елемента термоелектричного охолодження TEC1 потужністю 60 Вт (елемента Пельтьє) в залежності від різних умов (напруги, наявності тепловідведення, наявності рідини в теплообміннику). Охолодження здійснювалося за допомогою алюмінієвого радіатора, який контактував із усією площею гарячої сторони елемента TEC1 та закріпленого на ньому комп'ютерного кулера.

На рис. 1 представлена експериментальна система охолодження, в якості теплообмінника – алюмінієвий водяний блок 4x8x1 см з товщиною стінок 1 мм.

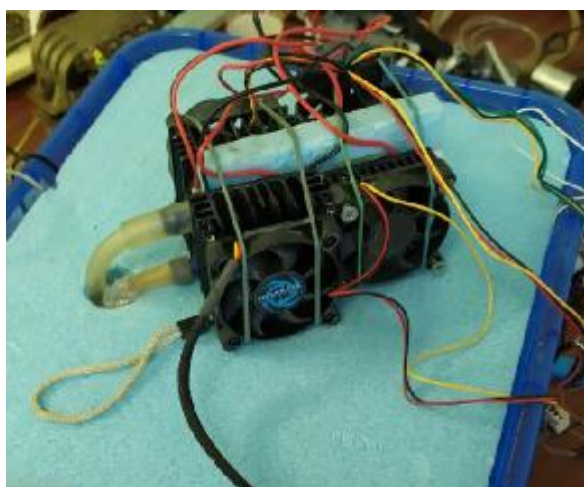


Рис. 1. Ізольована система з водяним блоком 4x8x1см

В якості симуляції органу виступає ємність з водою, об'ємом 150 мл, яка поміщена в середину контейнера, який покритий шаром піноізоли товщиною 1 см, для холодозбереження. Блок-схема експериментальної системи внутрішньосудинного охолодження представлена на рис. 2.

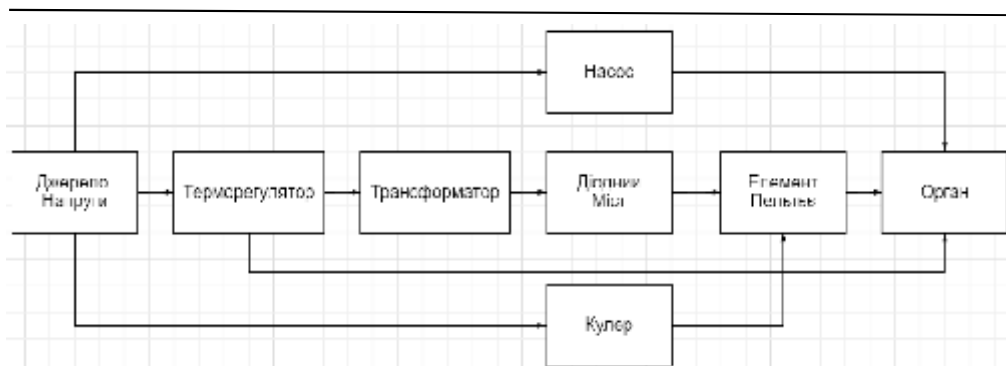


Рис. 2. Блок-схема системи охолодження для експерименту

Основними елементами системи є насос, кулер, елемент Пельтьє, а також терморегулятор, який в автоматичному режимі контролює температуру. Трансформатор та діодний міст потрібні для випрямлення струму від мережі. В ідеальних умовах має використовуватися акумулятор.

В табл. 1 представлено ефект використання теплообмінника об'ємом  $24 \text{ см}^3$  в системі циркуляції із насосом продуктивністю  $300 \text{ мл/хв}$ . Чотири елементи Пельтьє, 2 пари з'єднаних послідовно в комплекті з радіаторами (по  $160 \text{ см}^2$ ) та кулерами. Напруга живлення  $7 \text{ В}$  на кожен елемент окремо,  $14 \text{ В}$  на пару. Початкова температура  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таблиця 1  
Дослідження функціонування елементів Пельтьє

Час роботи, хв	Температура, $^\circ\text{C}$
10	10,6
20	9,8
30	9,5
40	9,2
50	9,0
60	9,0
Продуктивність знижена	до $200 \text{ мл/хв}$
70	9,0
80	8,9
90	8,8

Проводилося дослідження та аналіз системи внутрішньосудинного охолодження з теплообмінником  $4 \times 8 \times 1 \text{ см}$  з чотирма елементами Пельтьє за допомогою тепловізора FLIR i7 на предмет холодовтрат.

Характеристики тепловізора FLIR: роздільна здатність ІЧ-зображення:  $176 \times 220$  пікселів; термочутливість:  $0.10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; кут огляду/мін.

фокусна відстань: 50° x 38.6°; спектральний діапазон: від 8 до 14 мкм; частота оновлення зображення: 9 Гц; дисплей: 2,0 дюйма (50,8 мм) TFT LCD; діапазон температур: від -10 до 45°C.

На рис. 3 зображено знімок тепловізора, приціл якого направлений на бічну сторону теплообмінника. Температура об'єкту 10,9 °С.

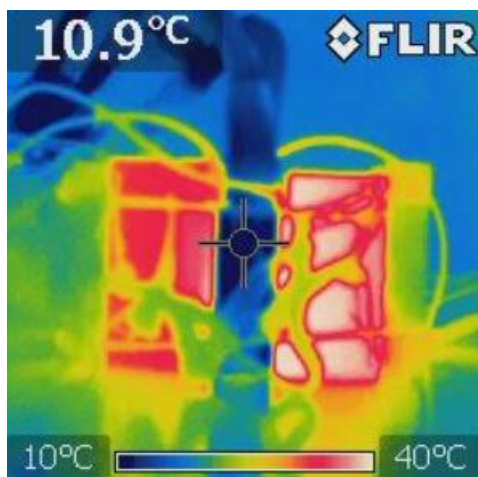


Рис. 3. Знімок бічної сторони теплообмінника

На рис. 4 зображено знімок тепловізора, вид зверху, приціл направлений на радіатор. Температура об'єкту 37,8 °С.

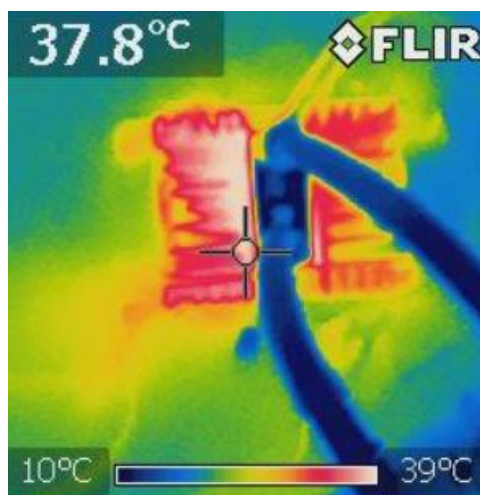


Рис. 4. Знімок системи охолодження зверху

На рис. 5 зображено знімок тепловізора, вид зверху, приціл направлений на частину насосу з трубками для циркуляції. Температура об'єкту 12,7 °С.

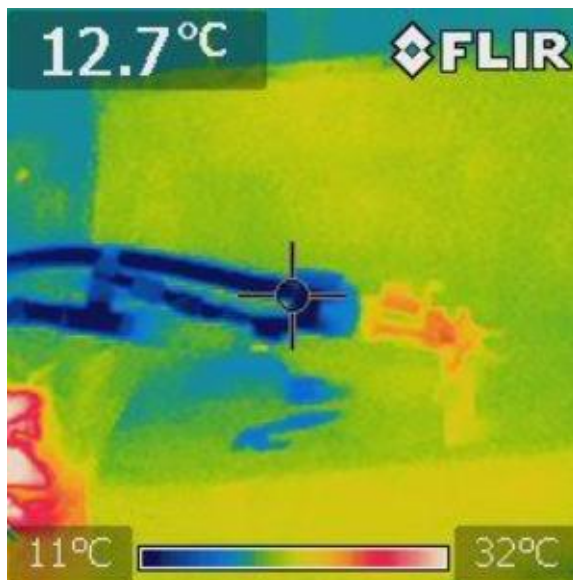


Рис.5. Температура насосу з трубками

На рис. 6 зображено знімок тепловізора, вид збоку, приціл направлений на стінку контейнера ізолювану пінополістиролом товщиною 1 см. Температура об'єкту 17,1 °С.

Ізольований пінополістиролом контейнер має гарну теплоізоляцію, це можна побачити з рисунку 6, так як на ньому немає червоних крапель, які б свідчили про високу температуру та тепловтрати. Найбільш гарячими точками виявилися радіатори для тепловідводу та корпус двигуна насосу.

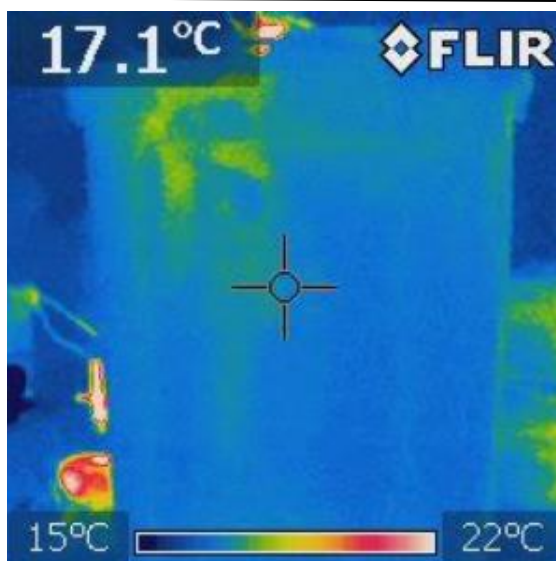


Рис. 6. Знімок стінки контейнера

Найхолоднішими точками є частина насосу з трубками та корпус ізольованого контейнера. Застосування тепловізора дає змогу з високою точністю виявити місця інтенсивного теплообміну в системі для удосконалення теплоізоляції об'ємів, які містять охолоджену рідину. І навпаки, виявлені ділянки інтенсивного нагріву можуть потребувати додаткових заходів тепловідведення.

**Висновки.** Існуючі методи збереження донорських органів передбачають використання систем різної складності, які забезпечують тривалу підтримку життєздатності трансплантатів. Оптимальною технологією при транспортуванні донорських органів на великі відстані є постійна гіпотермічна перфузія в різних варіантах. Згідно виконаних розрахунків для охолодження розчину, яким перфузується донорський орган, доцільно використовувати елементи Пельтьє, технічні характеристики яких дають змогу розробити компактну та некоштовну систему. Використання в створеній системі термоконтролера при оптимальному електроживленні 4-х елементів в експерименті забезпечує гіпотермічну перфузію донорського органа і підтримку температури на стабільному рівні.

**Список літератури:**

1. Юшков Ю.Я. Современные технологии консервации органов / Ю.Я. Юшков, М.Д. Голдштейн // Трансплантология: Журнал. – 2017. – 15 Июнь (т. 9, № 3). – С. 256-258.

2. Мусин И.П. Донорство органов человека для трансплантации. Учебное пособие / И.П. Мусин, М.А. Нартайлаков, Р.П. Нуриахметов, М.П. Гараев, Г.Н. Чингизова, Д.Р. Мушараров, А.Р. Загитов, К.Н.Золотухин, А.В. Самородов. – ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2019. – 51 с.
3. Актуальность нормотермической перфузии печени ex vivo при трансплантации [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-normotermicheskoy-perfuzii-pecheni-ex-vivo-pri-transplantatsii>
4. Экспериментальный комплекс для перфузии донорской печени [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnyu-kompleks-dlya-perfuzii-donorskoj-pecheni>
5. Концепция перфузионной реабилитации донорских органов в трансплантологии [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-perfuzinnoy-reabilitatsii-donorskih-organov-v-transplantologii/viewer>
6. Mühlbacher F. Preservation solutions for transplantation / F. Mühlbacher, F. Langer, C. Mittermayer. – Journal. – 1999. – Vol. 31. №. 5. – P. 2069-2070
7. Abadie A. The Impact of Presumed Consent Legislation on Cadaveric Organ / A. Abadie, S. Gay // Journal of Health Economics. – 2006. – №. 25. – P. 599-620.
8. Эффект Пельтье [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/3pravlov\\_osnovy\\_mikroelektroniky/72.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/3pravlov_osnovy_mikroelektroniky/72.htm)
9. Малишев В. Технічна термодинаміка та теплопередача / В. Малишев, В. Кретов, Т. Гладка. – М.: Університет, "Україна". – 2011. – 117 с.
10. Современная технология охлаждения элементом Пельтье [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [https://algimed.com/pdf/binder/kt53/2013\\_02\\_wp\\_Peltier\\_RU.pdf](https://algimed.com/pdf/binder/kt53/2013_02_wp_Peltier_RU.pdf)

#### **References:**

1. Yushkov, Y., Goldstein M. (2017), Modern technologies of organ preservation, *Journal of Transplantology*, pp. 256-258.
2. Musin, I., Nartailakov, M., Nuriakhmetov, R., Garaev, M., Chingizova, G., Musharapov, D., Zagitov, A., Zolotukhin, K., Samorodov, A. (2019), *Donation of human organs for transplantation*, tutorial fgbou vo bsmu of the Ministry of Health of Russia, 23-26 p.
3. Relevance of normothermic liver perfusion ex vivo during transplantation, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnost-normotermicheskoy-perfuzii-pecheni-ex-vivo-pri-transplantatsii>
4. Experimental complex for donor liver perfusion, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnyy-kompleks-dlya-perfuzii-donorskoj-pecheni>
5. The concept of perfusion rehabilitation of donor organs in transplantology, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-perfuzinnoy-reabilitatsii-donorskih-organov-v-transplantologii/viewer>
6. Mühlbacher F., Langer F., Mittermayer C. (1999), Preservation solutions for transplantation, *Journal*, 1999, Vol. 31, pp. 2069-2070.
7. Abadie, A., Gay, S. (2006), The Impact of Presumed Consent Legislation on Cadaveric Organ, *Journal of Health Economics*, No. 25, pp. 599-620.
8. Peltier effect, available at: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/3pravlov\\_osnovy\\_mikroelektroniky/72.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/3pravlov_osnovy_mikroelektroniky/72.htm)
9. Malishev, V., Kretov, V., Gladka, T. (2011), *Technical thermodynamics and heat transfer*, University "Ukraine", 117 p.



**10.** Modern Peltier cooling technology, available at:  
[https://algimed.com/pdf/binder/kt53/2013\\_02\\_wp\\_Peltier\\_RU.pdf](https://algimed.com/pdf/binder/kt53/2013_02_wp_Peltier_RU.pdf)

*Статтю представив д.т.н., проф. кафедри біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського О.В. Лебедев.*

*Надійшла (received) 09.10.2022*

Zabalo Yaroslav, master  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Str. Yangelya, 16/2, Kyiv, Ukraine, 03056  
Tel.: (097) 272-11-28, e-mail: yarzab55@gmail.com  
ORCID ID:0000-0002-0424-3021

Shlykov Vladyslav, Dr. Tech. Sci., Docent  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Str. Yangelya, 16/2, Kyiv, Ukraine, 03056  
Tel.: (067) 758-47-02, e-mail: v.shlykov@kpi.ua  
ORCID ID: 0000-0001-8836-4658

Kozyar Vasyl, PhD, Docent  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Str. Yangelya, 16/2, Kyiv, Ukraine, 03056  
Tel.: (096) 350-72-15, e-mail: kozyarvasilij@gmail.com

УДК 62-713.5

**Моделювання системи внутрішньосудинного охолодження донорських органів / Забіло Я.С, Шликов В.В., Козяр В.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2022. – № 1 – 2 (7 – 8). – С. 129 – 138.**

Практика трансплантацій включає транспортування донорських органів в межах країн, між країнами та континентами із використанням різних складних та коштовних систем, здатних певний час забезпечувати життєздатність цих органів. В результаті чого виникає необхідність в розробці надійної та простої у використанні системи охолодження, собівартість якої була б прийнятною для закладів охорони здоров'я. Окремою проблемою є розробка конструкції системи внутрішньосудинного охолодження, для збереження життєздатності органу, призначеного для трансплантації, з урахуванням його особливостей. Лл.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 10 назв.

**Ключові слова:** трансплантація; транспортування донорських органів; життєздатність органу; система охолодження; елемент Пельтьє; стабілізація температури.

UDC 62-713.5

**Modeling of the system of intravascular cooling of donor organs / Zabilo, Y.S., Shlykov, V.V., Kozyar, V.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2022. – № 1 – 2 (7 – 8). – P. 129 – 138.**

The practice of transplants includes the transportation of donor organs within countries, between countries and continents using various complex and expensive systems capable of ensuring the viability of these organs for a certain time. As a result, there is a need to develop a reliable and easy-to-use cooling system, the cost of which would be acceptable for healthcare facilities. A separate problem is the development of the design of the intravascular cooling system to preserve the viability of the organ intended for transplantation, taking into account its characteristics. Refs.: 6. Table: 1. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** transplantation; transportation of donor organs; organ viability; cooling system; Peltier element; temperature stabilization.