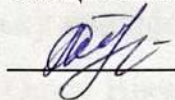


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

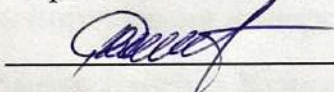
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

КОНТЕЙНЕР ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ДОНОРСЬКОЇ НИРКИ

Виконала: студентка 4 курсу,
групи БМІ-216,
спеціальності 163 Біомедична інженерія

 Лелека О. В.

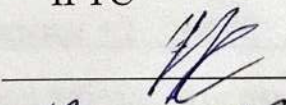
Керівник: к.т.н., доцент каф. БМІОЕС

 Штофель Д. Х.

« 13 » 06 2025 р.

Рецензент: к.т.н., старший викладач каф.

ІРТС

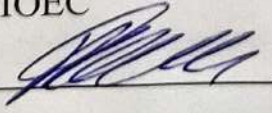
 Притула М. О.

« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

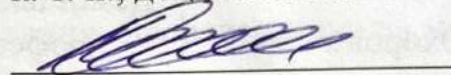
Зав. кафедри БМІОЕС

Коваль Л. Г.


« 16 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Бакалавр
Спеціальність 163 Біомедична інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри БМІОЕС
к. т. н., доцент Коваль Л. Г.



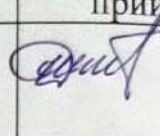
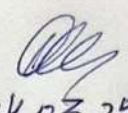
«20» 03 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу
студенту Лелеці Ользі Вікторівні, гр. БМІ-216

1. Тема БДР «Контейнер для транспортування донорської нирки», керівник роботи доцент каф. БМІОЕС Штофель Дмитро Хуанович, к.т.н., доцент, затверджені наказом ВНТУ від 20 березня 2025 року № 97.
2. Строк подання студентом роботи – до 02.06.2025 р.
3. Вихідні дані для роботи: портативний контейнер з подвійною теплоізоляцією; температурний режим +2...+8 °С; датчики температури, вологості, вібрацій; мікроконтролер з бездротовим зв'язком; автономна робота не менше 8 год; маса не більше 4 кг; габарити не більше 400×300×300 мм.
4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналітичний огляд сучасних засобів транспортування органів; 2. Конструкторська розробка контейнера; 3. Розробка сенсорної системи; 4. Опрацювання питань охорони праці.
5. Зміст ілюстративної частини (з точним зазначенням обов'язкових креслеників): схема електрична принципова, плата друкована, компонування приладу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Штофель Д. Х., к.т.н., доцент кафедри БМІОЕС	 20.03.2025	 13.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С. В., д. п. н., професор кафедри БЖДПБ	 24.03.25	 30.05.25

7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

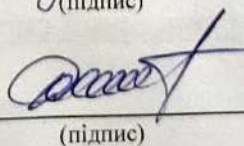
№ з/п	Назва етапів БДР	Строк виконання етапів БДР	Приміт
1	Формування та затвердження теми бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	До 20.03.2025	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	До 21.04.2025	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	До 19.05.2025	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	До 30.05.2025	
5	Попередній захист БДР	06.06.2025	
6	Нормоконтроль БДР	09.06.2025	
7	Рецензування БДР	13.06.2025	
8	Захист БДР	20.06.2025	

Студент


(підпис)

Лелека О. В.

Керівник роботи


(підпис)

Штофель Д. Х.

АНОТАЦІЯ

Лелека О. В. БКР на тему «Контейнер для транспортування донорської нирки». Вінниця : ВНТУ, 2025. 75 с.

Українською мовою. 34 рис., 3 табл., бібліогр. 39 найм.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено конструкцію контейнера для транспортування донорської нирки. У роботі представлено аналітичний огляд сучасних способів транспортування донорських органів, вимог до температурного режиму зберігання, проведено аналіз нормативної бази та існуючих конструкцій контейнерів. Розроблено 3D-модель контейнера з подвійною теплоізоляцією, системою зовнішнього охолодження на основі сухого льоду, температурними датчиками та клапаном скидання газу. Здійснено теплотехнічні розрахунки, обґрунтовано вибір матеріалів, спроектовано конструкцію у середовищі SolidWorks. Опрацьовано питання охорони праці при виготовленні та експлуатації контейнера.

ABSTRACT

Leleka O. V. Bachelor thesis on the topic «Container for transporting a donor kidney». Vinnytsia : VNTU, 2025. 75 p.

In Ukrainian. Figs. 34, Tables 3, Refs. 39.

The bachelor's qualification thesis presents the development of a container for transporting a donor kidney. The paper provides an analytical overview of current methods of organ transportation, storage temperature requirements, and an analysis of relevant standards and existing container designs. A 3D model of a thermally insulated container with external cooling based on dry ice, temperature sensors, and a gas release valve was designed. Thermal calculations were performed, material choices substantiated, and the construction was modeled in SolidWorks. Occupational safety issues during manufacturing and operation were also considered.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТРАНСПОРТУВАННЯ ДОНОРСЬКОЇ НИРКИ ..	7
1.1 Трансплантація нирки.....	7
1.2 Консервація донорської нирки	11
1.3 Нормативні документи та стандарти транспортування органів.....	14
1.4 Засоби зберігання і транспортування донорського біологічного матеріалу	15
2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	21
2.1 Аналіз сучасних рішень та вибір концепції контейнера.....	21
2.2 Результати проектування та теплотехнічного розрахунку	24
2.2.1 Знаходження часу охолодження нирки	26
2.3 3D моделювання приладу у програмному середовищі SolidWorks.....	28
3 СЕНСОРНА СИСТЕМА В КОНТЕЙНЕРІ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ДОНОРСЬКОЇ НИРКИ.....	42
3.1 Призначення і функції сенсорної системи	42
3.2 Вибір датчиків і контрольовані параметри	43
3.3 Структура та з'єднання сенсорної системи.....	50
3.4 Принцип роботи та обробка даних.....	52
3.5 Надійність, захист і перспективи розвитку	54
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	56
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....	56
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	58
4.2.1 Мікроклімат	58
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	60
4.2.3 Виробниче освітлення	60
4.2.4 Виробничий шум та вібрації	60
4.2.5 Виробничі випромінювання.....	61
4.3 Пожежна безпека.....	61

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	62
4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	62
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	65
ДОДАТКИ.....	69
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративна частина	70
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки на наявність текстових запозичень	73

ВСТУП

Актуальність теми створення спеціалізованого контейнера для транспортування донорської нирки зумовлена зростаючою потребою в ефективних рішеннях для збереження життєздатності трансплантованих органів. Трансплантація нирки є однією з найчастіших операцій у сучасній медицині, і її успішність значною мірою залежить від умов, у яких орган зберігається та транспортується від донора до реципієнта.

Під час транспортування донорська нирка піддається впливу температурних коливань, механічних вібрацій, а також може бути інфікована при порушенні умов стерильності. Для мінімізації ішемічного ушкодження та запобігання деградації тканин необхідно забезпечити стабільне охолодження до температури $+2...+8^{\circ}\text{C}$, герметичність, захист від зовнішніх впливів та моніторинг умов зберігання в режимі реального часу. Створення контейнера, що забезпечує ці параметри, є важливою інженерною задачею, що має безпосередній вплив на медичну практику.

З розвитком біомедичної інженерії з'являється можливість поєднувати традиційні методи охолодження з сучасними технологіями контролю параметрів — такими як сенсорні системи, GPS-моніторинг та «розумна» діагностика. Це дає змогу не лише безпечно транспортувати орган, але й отримувати дані про його стан упродовж всього маршруту, що підвищує рівень безпеки процедури трансплантації.

Метою дипломної роботи є розроблення конструкції контейнера для транспортування донорської нирки, який забезпечує оптимальні умови для зберігання органа відповідно до медичних, біологічних та технічних вимог.

Виходячи з мети, були визначені такі основні завдання роботи:

- проаналізувати сучасні вимоги до транспортування донорських органів, зокрема нирок;

- дослідити існуючі типи контейнерів та виділити їх переваги й недоліки;
- сформулювати технічні вимоги до конструкції контейнера;
- розробити конструкцію контейнера з урахуванням ергономічних, теплотехнічних та гігієнічних вимог;
- здійснити моделювання температурного режиму усередині контейнера;
- обґрунтувати вибір матеріалів та можливу технологію виготовлення.

Об'єкт дослідження – процес транспортування донорських нирок у системі охорони здоров'я.

Предмет дослідження – конструкція контейнера для транспортування донорської нирки з підтримкою відповідного температурного режиму та стерильності.

Результати цієї роботи можуть бути використані при розробці портативних біомедичних засобів для медичних закладів, трансплантологічних центрів та служб екстреної допомоги, що сприятиме зменшенню рівня відторгнення трансплантатів і підвищенню ефективності медичної допомоги.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТРАНСПОРТУВАННЯ ДОНОРСЬКОЇ НИРКИ

1.1 Трансплантація нирки

Трансплантація нирки— це хірургічна операція, яка використовується як метод замісної терапії при термінальній стадії ниркової недостатності. Операція полягає у пересадці нирки від донора. Живий донор може бути генетично споріднений або не споріднений із реципієнтом залежно від того, чи існує біологічний зв'язок між ними.

Трансплантація потрібна пацієнтам із термінальною стадією хронічної хвороби нирок, які перебувають на діалізі (перитонеальний чи гемодіаліз), або пацієнтам, які наближаються до розвитку кінцевої стадії хвороби нирок, але ще не перебувають на діалізі (переддіалізна трансплантація нирки).

Пацієнти з гострим ураженням нирок не потребують трансплантації нирки. Трансплантацію також не виконують у випадку ушкодження однієї нирки за умови нормального функціонування іншої. Трансплантацію проводять лише тоді, коли ниркова недостатність є незворотною.

Діаліз певною мірою замінює здатність нирок фільтрувати небажані продукти обміну. Проте всі інші функції нирок може виконувати тільки трансплантат. Отже, за наявності відповідного донора й відсутності протипоказань трансплантація нирки – найкращий вибір для повної реабілітації пацієнта з термінальною стадією ХХН. Оскільки трансплантація рятує життя й дає змогу цілковито насолоджуватися ним, її називають «подарунком життя».

Основні переваги успішної трансплантації нирки:

- Краще відновлення функцій нирки й кращий рівень життя: Пацієнти можуть вести нормальний, активний спосіб життя, маючи більше енергії, витривалості та продуктивності.
- Відмова від діалізу: Пацієнти уникають ускладнень, витрат і незручностей, пов'язаних із діалізним лікуванням, а також беруть свій час.
- Довша тривалість життя: Пацієнти після трансплантації живуть довше, ніж пацієнти на діалізі.

- Менше обмежень у дієті та вживанні рідини
- Економічна складова: Хоча початкова вартість трансплантації нирки досить висока, на 3-4-му році після пересадки витрати зменшуються, а загальна вартість трансплантації зазвичай менша, ніж вартість постійного діалізного лікування.
- Простежують поліпшення статевого життя й вищі шанси стати батьком у чоловіків та завагітніти у жінок.

Трансплантація має багато переваг, але існують також недоліки, серед яких:

- Ризик складної операції. Трансплантація нирки – серйозна хірургічна операція, яку проводять під загальною анестезією. Ризики можливі як під час, так і після операції.
- Ризик відторгнення. Ніхто не дасть стовідсоткової гарантії, що організм прийме пересажену нирку. Але за наявності нових і якісних імуносупресантів відторгнення менш вірогідне, ніж у минулому.
- Постійне вживання ліків. Пацієнти після трансплантації потребують регулярного вживати імуносупресивні препарати доти, доки як функціонує донорська нирка. Повне припинення, пропуски чи вживання неповної дози імуносупресантів може призвести до розвитку недостатності пересаженої нирки чи відторгнення.
- Ризики, пов'язані зі вживанням імуносупресивних препаратів. Ліки, які пригнічують імунну відповідь, можуть призвести до виникнення серйозних інфекцій. Запобігання інфекціям і скринінг розвитку основних форм злоякісних новоутворень – важливі складові догляду після трансплантації. Побічні ефекти препаратів: високий артеріальний тиск, високий рівень холестерину й глюкози в крові.
- Стрес. Очікування донорської нирки перед трансплантацією, невпевненість в успіху трансплантації (можливе відторгнення) і страх втратити функцію нової нирки є неабияким стресом для пацієнта.
- Початкова висока вартість. [1]

У сучасному світі трансплантація нирки залишається найбільш поширеною і ефективною операцією серед усіх видів трансплантації органів. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), щороку у світі виконується понад 90 тисяч трансплантацій нирок, однак потреба в донорських органах у кілька разів перевищує кількість доступних донорів. Це створює серйозні виклики для систем охорони здоров'я, адже черги на отримання донорської нирки залишаються довгими, а стан пацієнтів часто погіршується внаслідок тривалого очікування.

У зв'язку з цим дедалі більшого значення набувають міжнародні програми співпраці та обміну органами, які передбачають транспортування біологічного матеріалу на значні відстані. Важливість таких програм полягає не лише у розширенні доступу до донорських органів, але й у покращенні логістичних процесів, що дозволяють знизити час між забором органа та його імплантацією. Адже саме цей період є критичним для збереження життєздатності пересаджуваного органу.

Особливе значення має трансплантація від живих родинних донорів, адже у таких випадках результативність операції значно вища, а тривалість життя пацієнтів суттєво зростає — на 10–15 років у порівнянні з діалізною терапією. Проте на практиці багато пацієнтів отримують органи від померлих донорів, і саме тут виникають значні складнощі, пов'язані із дотриманням температурного режиму та часових обмежень під час зберігання нирки. Адже навіть незначні відхилення від встановлених параметрів можуть призвести до погіршення функції органу після трансплантації або навіть його відторгнення.

Максимальний допустимий період холодової ішемії для нирки становить 24–36 годин, однак клінічно найкращими результатами вважається проведення операції впродовж 6–12 годин після вилучення органа. Для цього необхідна бездоганна координація між медичними закладами, транспортними службами, лабораторіями та командами трансплантологів. Усі ці елементи мають працювати як єдиний механізм, де від точності та швидкості виконання кожного етапу залежить доля пацієнта.

Саме тому в останні роки значно зросла роль спеціалізованих транспортних контейнерів, які забезпечують підтримку стабільної температури в межах $+2...+8$ градусів Цельсія та захищають орган від механічних пошкоджень і впливу зовнішніх факторів. Сучасні термоконтейнери оснащуються не лише теплоізоляційними матеріалами, але й системами моніторингу температури, вологості, а іноді і вібрацій, що дозволяє лікарям та транспортувальникам контролювати умови зберігання у реальному часі. Це суттєво підвищує ймовірність успішної трансплантації і зменшує ризик ускладнень.

Крім того, трансплантація нирки має значний економічний ефект. Успішне виконання операції дає можливість пацієнтам уникнути тривалої та дорогої гемодіалізної терапії, яка часто супроводжується численними ускладненнями та значним погіршенням якості життя. Зменшення потреби в діалізі сприяє зниженню витрат на лікування, госпіталізації та супутні медичні послуги, що є вагомим аргументом для систем охорони здоров'я у різних країнах інвестувати в розвиток трансплантології.

Крім економічної вигоди, важливим є соціальний аспект. Пацієнти після трансплантації відновлюють свою працездатність, повертаються до активного способу життя, що позитивно впливає на їхню психоемоційну стабільність і загальний стан здоров'я. Також знижується ризик розвитку хронічних ускладнень, таких як серцево-судинні захворювання, що часто супроводжують хворих на ниркову недостатність.

Таким чином, трансплантація нирки — це не лише порятунок життя, але й комплексний процес, який вимагає застосування передових технологій, високого професіоналізму медичного персоналу, а також злагодженої роботи багатьох служб. Успіх трансплантації значною мірою залежить від умов транспортування і збереження органа, тому подальший розвиток інноваційних систем зберігання і транспортування донорських органів є одним із пріоритетних напрямків у медицині.

В перспективі, розвиток технологій у галузі трансплантації може включати застосування новітніх матеріалів для контейнерів з підвищеними теплоізоляційними властивостями, інтеграцію сенсорних систем, що відслідковують стан органа, а також впровадження штучних органів та методів регенеративної медицини, які дозволять знизити залежність від донорських органів. Проте вже сьогодні ефективність і доступність трансплантації нирки значно покращують життя тисяч пацієнтів у всьому світі, відкриваючи нові горизонти у лікуванні хронічної ниркової недостатності.

1.2 Консервація донорської нирки

Органи, такі як серце, легені, нирки, печінка та селезінка, є надзвичайно чутливими до впливу низьких температур і ішемії, тому навіть за умов охолодження до $+4-5^{\circ}\text{C}$ потребують додаткових заходів захисту. [2].

Після або в процесі вилучення ниркового трансплантата проводиться його холодова фармакоконсервація. Для збереження життєздатності донорського органу він повинен бути відмитий від крові і перфузований консервуючим розчином. Найчастіше зберігання трансплантата здійснюється за безперфузійною методикою в системі «потрійних пакетів»: відмитий консервуючим розчином орган поміщається в стерильний поліетиленовий пакет з консервантом, цей пакет в інший, заповнений стерильною сніжною кашею, другий пакет в третій з крижаним фізіологічним розчином. Орган в потрійних пакетах зберігається і транспортується в термоконтейнері або холодильнику при температурі $4-6^{\circ}\text{C}$. Найкращі результати досягаються при трансплантації нирки в першу добу після її вилучення. Іноді застосовується перфузійна методика зберігання донорської нирки, розроблена в 1906 р. Алексісом Каррелем і Чарльзом Ліндбергом. При цьому орган підключається до машини, що здійснює постійне промивання органу консервуючим розчином. Таке зберігання збільшує витрати, але дозволяє покращити результат трансплантації, особливо при використанні нирок від маргінальних донорів.[3]

Перед проведенням трансплантації донорські нирки повинні зберігатися в контрольованих умовах, і для цього використовують два основні методи: холодове безперфузійне зберігання та перфузійну консервацію. У першому випадку орган промивають консервуючим розчином, після чого поміщають у герметичну ємність із тим же розчином і транспортують у охолоджену стані. Другий спосіб передбачає постійне промивання нирки спеціальним апаратом, який забезпечує циркуляцію охолодженого розчину через артеріальну систему органа до моменту його пересадки. Хоча метод постійної перфузії дозволяє зменшити ризик відстроченого запуску функцій трансплантата навіть при тривалому зберіганні до 48 годин, він залишається складним у реалізації та дорогим. Тому більшість трансплантаційних центрів надають перевагу простішому безперфузійному способу, прагнучи обмежити час зберігання нирки до 30 годин, оскільки після цього ризик функціональних ускладнень істотно зростає. [4]

Дослідження показали, що зниження температури ізолюваних органів сприяє підвищенню їх стійкості до гіпоксії. Основний механізм захисного ефекту гіпотермії полягає в уповільненні метаболічних процесів, що зменшує енергетичні потреби тканин і, відповідно, потребу в кисні. При температурі 10–12 °C у нирках припиняються процеси реабсорбції та секреції в каналцях, що свідчить про значне зниження функціонального навантаження органа та сприяє його збереженню у стані консервації. [5]. Попри відсутність активної функціональної діяльності, ізолюваний орган потребує постійного енергетичного забезпечення для збереження структури білків та підтримки іонного балансу, зокрема концентрацій K^+ , Na^+ , Ca^{2+} між внутрішньо- та позаклітинним середовищем. Гіпотермія сприяє зниженню теплової активності молекул, посилюючи міжмолекулярні взаємодії, такі як ван-дер-ваальсові та водневі зв'язки. Водночас зменшується утворення вільних радикалів і активність водневих іонів, що разом знижує термодинамічну нестабільність тканин. Це веде до зменшення енергоспоживання клітин і зниження загальної потреби в енергії.

Сучасні технології консервації донорських нирок базуються на міждисциплінарному підході, що об'єднує досягнення медицини, біохімії, інженерії та матеріалознавства. Одним із ключових чинників, що впливає на успішність зберігання органа, є вибір консервуючого розчину. На сьогодні використовуються різні типи розчинів, серед яких найпоширенішими є розчин Університету Вісконсин (UW), НТК (Histidine-Tryptophan-Ketoglutarate) та розчин Celsior. Ці середовища мають низьку температуру замерзання, контрольований осмотичний тиск, антиоксидантні властивості та забезпечують стабілізацію клітинних мембран.

Консерванти не лише сприяють збереженню клітинної структури, а й попереджають виникнення ішемічно-реперфузійного ушкодження, яке виникає під час поновлення кровообігу після пересадки. Саме цей тип пошкодження часто стає причиною відстроченої функції трансплантата. Тому консервуючі розчини доповнюють спеціальними компонентами: аденозином, глутатіоном, алопуринолом, які запобігають окисному стресу та підтримують рівень АТФ у клітинах.

Окрему увагу приділяють контролю показників рН, осмолярності та електролітного складу розчинів. У нормі внутрішньоклітинне середовище має слабнокисле значення рН, а екстрацелюлярне – ближче до нейтрального. Порушення цього балансу під час зберігання органа може призвести до іонного дисбалансу, набряку клітин і апоптозу. Саме тому консервуючі середовища повинні бути не лише стерильними, але й стабільними в умовах гіпотермії.

У практиці трансплантації важливо не лише зберегти функціональну здатність органа, а й забезпечити його біомеханічну цілісність. Надмірний тиск або неправильне пакування нирки можуть пошкодити судинне русло або паренхіму, що ускладнить реваскуляризацію після імплантації. Для цього використовують спеціальні контейнери, які фіксують орган в обмеженому об'ємі рідини і захищають його від вібрацій та ударів під час транспортування. Останнім часом також зростає інтерес до біосумісних гелів, які забезпечують м'яке охолодження і амортизацію тканин.

У контексті досліджень, що проводяться останніми роками, особливе місце посідає гіпербарична оксигенація органів та використання нанотехнологій у консервації. Наприклад, наночастинки срібла або золота, введені у перфузійний розчин, можуть діяти як антибактеріальні або антиоксидантні агенти, сприяючи зниженню рівня запалення. Водночас гіпербаричне зберігання, що полягає в насиченні органа киснем під тиском, потенційно подовжує час збереження та покращує функцію після пересадки.

З практичної точки зору, важливим є моніторинг параметрів зберігання в реальному часі. Для цього застосовують температурні та вологісні датчики, які вбудовуються в пакети або контейнери. Отримані дані передаються бездротовим шляхом до смартфонів або серверів лікарень, що дозволяє оперативно реагувати у випадку порушення умов транспортування.

Нарешті, слід зазначити, що ефективність консервації тісно пов'язана з часом холодової ішемії. Навіть за дотримання всіх технологічних вимог, подовження цього періоду понад рекомендовані межі веде до морфологічних змін у нефронах, зменшення числа функціональних гломерул та підвищення ризику хронічної дисфункції трансплантата.

Таким чином, консервація донорської нирки є складним, багатофакторним процесом, у якому ключову роль відіграють температура, склад консервуючих розчинів, час зберігання та механічний захист органа. Подальші дослідження у цій сфері спрямовані на розробку нових методик, що дозволять зберігати нирки довше без втрати їх функціональності, що є критично важливим у сучасних умовах дефіциту донорських органів[6,7].

1.3 Нормативні документи та стандарти транспортування органів

Процедура транспортування донорських органів регулюється рядом нормативно-правових документів, що визначають вимоги до безпеки, якості, стерильності та простежуваності анатомічних матеріалів.

На міжнародному рівні застосовуються:

- Директива 2010/53/ЄС Європейського парламенту та Ради «Про стандарти якості та безпеки донорських органів, призначених для трансплантації» [8].
- Рекомендації ВООЗ «WHO Guiding Principles on Human Cell, Tissue and Organ Transplantation», які встановлюють етичні та практичні вимоги до трансплантації органів [9].

В Україні основним документом є:

- Закон України «Про застосування трансплантації анатомічних матеріалів людині» № 2427-VIII від 17.05.2018 р., який визначає правові та організаційні засади трансплантації [10].
- Наказ МОЗ України № 756 від 31.12.2020 р. «Про затвердження Порядку транспортування анатомічних матеріалів людини», що містить вимоги до упаковки, охолодження, стерильності та документації [11].

Також діють галузеві стандарти і протоколи Євротрансплант та Європейського директорату з якості лікарських засобів (EDQM), які визначають логістичні аспекти транспортування, зокрема умови маркування, ідентифікації, супровідної документації та дозволених засобів охолодження.

Таким чином, ефективне транспортування донорських органів можливе лише за умови суворого дотримання медичних, технічних та нормативних вимог на всіх етапах логістичного процесу — від вилучення до імплантації.

1.4 Засоби зберігання і транспортування донорського біологічного матеріалу

Основним засобом для зберігання та транспортування донорських органів є медичний термоконтейнер (термостат), який забезпечує стабільне підтримання заданої температури всередині. Визначальним критерієм для таких пристроїв є точність температурного режиму, а також, залежно від їхнього функціонального призначення, ширина діапазону регулювання температури.

Сучасні медичні термостати представлені широким спектром моделей, які класифікуються за різними параметрами: тип робочого середовища, температурний діапазон, тип датчиків, методи регулювання, потужність теплового потоку, рівень автономності тощо.

За типом конструкції термостати, призначені для транспортування і зберігання біологічних матеріалів, поділяють на дві основні категорії: стаціонарні та переносні (портативні) моделі[12].

До переносних термостатів відносять контейнер КОНТТЕРМ 12-01, що зображений на рис.1



Рис 1. – Портативний термостатичний контейнер КОНТТЕРМ 12-01

Внутрішня та зовнішня оболонки контейнера виготовлені з ударостійкого полістиролу, що відповідає вимогам медичної техніки та стійкий до багаторазової обробки дезінфекційними засобами, зокрема розчинами перекису водню, хлораміну й універсальними миючими препаратами. Охолодження робочої камери та стабілізація температурного режиму всередині контейнера здійснюється за допомогою попередньо заморожених холодоелементів. Конструкція передбачає рівномірний розподіл температури по всьому об'єму, що виключає виникнення значних температурних градієнтів у зоні зберігання біологічного матеріалу.

У таблиці 1.1 представлені технічні характеристики контейнеру.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики контейнеру КОНТТЕРМ 12-01

Максимально низька температура	Не вище -18°C
Габаритні розміри термоконтейнера	500*300*29 мм
Маса завантаженого контейнера	3,5 кг
Час збереження температури	48 годин
Число холодоелементів	10-14

Корпус контейнера, як зовнішній, так і внутрішній, виготовлений із міцного ударостійкого полістиролу, дозволеного для застосування в медичному обладнанні. Матеріал витримує багаторазову дезінфекцію за допомогою засобів на основі перекису водню, хлораміну та універсальних мийних розчинів. Для охолодження внутрішньої камери та підтримання необхідного температурного режиму використовуються заморожені холодоелементи. Завдяки конструктивним особливостям забезпечується рівномірний розподіл температури по всій камері, без різких перепадів у зоні розміщення біоматеріалу.



Рисунок 2 – Кріогенні контейнери серії GT фірми Cryopal - Air Liquide DMC

Для полегшення транспортування медичних контейнерів і запобігання їх фізичним пошкодженням під час перевезення різними видами транспорту застосовують термостатичну контейнер-сумку.

На рис.3. зображений термостатичний контейнер-сумка ЕЛЬФИ .



Рисунок 3 – Медична сумка-контейнер ЕЛЬФИ

У таблиці 1.2 наведені технічні характеристики контейнера, що розглядається.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики контейнеру ЕЛЬФИ

Середня температура	0° до +8°C
Габаритні розміри термоконтейнера	340*280*390 мм
Обсяг контейнеру	25 л
Час збереження температури	8 годин
Число холодоелементів	8

Цей контейнер зроблено з міцної синтетичної безпечної тканини. Він оснащений спеціальними кишенями для розміщення охолоджуючих елементів та документації. Стіни сумки, кришка та додатковий ізоляційний клапан виконані з високоякісного ізоляційного матеріалу.

Зі зростанням попиту на органи для трансплантації та розширенням географії транспортування, сучасні системи зберігання повинні не лише підтримувати необхідну температуру, а й інтегрувати електронні модулі моніторингу та керування умовами середовища. У світі активно впроваджуються «розумні» контейнери, які здатні в реальному часі передавати інформацію про стан температури, вологості, тиску, вібрацій та місцезнаходження. Такі контейнери містять GPS-модулі, сенсори руху,

температури та інтерфейси бездротового зв'язку. Це дозволяє лікарям та трансплантологам в режимі онлайн отримувати дані про стан транспортування і оперативно реагувати у разі відхилень.

Особливу роль у сучасних системах відіграє використання вбудованих мікроконтролерів (Arduino, ESP32, STM32), які збирають і обробляють дані з сенсорів, а також керують системою сигналізації. Крім того, багато розробок включають запис історії транспортування у внутрішню пам'ять або на SD-карту, що дає змогу проводити ретроспективний аналіз умов зберігання органа.

Такі технологічні рішення є особливо актуальними у випадках, коли транспортування здійснюється повітряним транспортом або у складних логістичних умовах. Використання автономних живильних джерел (акумуляторів, літєвих батарей) дозволяє забезпечити роботу всіх систем протягом 8–24 годин, що відповідає більшості клінічних сценаріїв. Подальше вдосконалення таких систем відкриває перспективи для використання активного охолодження, телемедицини та віддаленого втручання під час транспортування.

Крім технічних аспектів зберігання, важливим елементом при транспортуванні донорських органів є відповідність міжнародним стандартам і вимогам охорони здоров'я. Органи для трансплантації мають статус біологічного вантажу категорії B (UN3373), і транспортування має здійснюватися у спеціальних контейнерах, які відповідають вимогам BOOЗ, Європейської асоціації трансплантологів (ESOT), а також національних медичних стандартів.

Основні вимоги включають:

- термостабільність протягом мінімум 6–8 годин у діапазоні $+2...+8^{\circ}\text{C}$;
- герметичність і біозахист при можливому контакті з рідинами;
- наявність зовнішніх маркувань, які ідентифікують тип вантажу;
- ударостійкість при падінні з висоти не менше 1 м;
- можливість стерилізації або багаторазової дезінфекції;

- інтеграцію температурних реєстраторів, які підтверджують дотримання умов зберігання під час транспортування.

Деякі клініки вимагають додатково використання контейнерів із вбудованими RFID-мітками або QR-кодами для простежуваності шляху органа від донора до реципієнта. Такі системи забезпечують прозору логістику і можуть бути частиною єдиної цифрової медичної платформи, з якою працює медичний персонал у режимі 24/7.

2. КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз сучасних рішень та вибір концепції контейнера

У США компанія Transmedics розробила інноваційну систему збереження органів — Organ Care System, автономний контейнер, який підтримує життєдіяльність вилученого органа шляхом його насичення киснем та поживними речовинами. Завдяки цій технології вже проведено низку успішних трансплантацій серця. За інформацією виробника, максимальний час автономного збереження серця становить 12 годин, однак практичні дослідження підтвердили безпечне використання лише протягом 8 годин. Основною перешкодою до широкого впровадження цієї системи у світі є її висока вартість — близько 200 тисяч доларів США, що є непосильною для багатьох медичних закладів [13].

Об'єктом розробки в рамках даної роботи є бюджетний термоізований контейнер із пластиковим корпусом. У якості охолоджуючого елемента в ньому використовується «сухий лід» — твердий вуглекислий газ, який, поглинаючи тепло, переходить у газоподібний стан без утворення рідини. Основними елементами контейнера є: двошарова теплоізоляція, датчики та індикатори температури, а також клапан для відведення вуглекислого газу.

Для попереднього візуального представлення контейнера була використана програма SolidWorks. На рис. 3 представлено 3D-модель з загальними габаритами 380×265×295 мм.



Рис. 4. Загальна візуалізація контейнера у програмному середовищі SolidWorks

На рис. 5 показано внутрішню будову контейнера. На кришці розміщено два цифрових індикатори температури, датчики яких призначені для контролю температури як у відсіку з органом, так і безпосередньо всередині транспортуємого органа. Використані індикатори — цифрові пристрої моделі Kelilong Electron TM-902C, в яких застосовано термопару як датчик. Це забезпечує високу точність і стабільність вимірювань у діапазоні від -50°C до $+1300^{\circ}\text{C}$. Постійну температуру всередині контейнера підтримує теплоізоляційний шар товщиною 20 мм, виконаний з екструдованого пінополістиролу, що має теплопровідність у межах $0,033\text{--}0,040\text{ Вт/м}\times^{\circ}\text{C}$.



Рис. 5. Візуалізація контейнера у розрізі

Відсік для розміщення сухого льоду має розміри $70\times120\times230$ мм та об'єм 1932 см^3 . Ємність для сухого льоду не закріплена жорстко, що дозволяє зручно отримувати доступ до нижньої частини контейнера, де розташовується орган. Для зручності та безпеки маніпуляцій передбачено пластикову ручку. Дно ємності виготовлене з алюмінієвої пластини товщиною 2 мм, що сприяє ефективному теплообміну між відсіками. Сухий лід не контактує безпосередньо з органом, запобігаючи його пошкодженню. У верхній термоізоляційній кришці та зовнішній кришці контейнера передбачено отвори, які з'єднують ємність з регульованим клапаном скидання газу, що відкривається при тиску від 0 до 20 см вод. ст.

Відсік для транспортування донорського органа має габарити $120\times130\times230$ мм, що становить об'єм 3588 см^3 , чого достатньо для розміщення

навіть такого великого органа, як печінка людини. Відомо, що середня температура сухого льоду становить $t_{\text{л}} = -75^{\circ}\text{C}$, а теплота його сублімації дорівнює $Q_{\text{сублім.}} = 590 \text{ кДж/кг}$ [14].

Для прикладу розглянемо розрахунок теплообміну під час охолодження нирки масою 200 г до температури 3°C , виходячи з початкової температури, яка наближена до температури навколишнього середовища — 23°C . Об'єми контейнера зазначено вище, а значення теплоємності та теплоти сублімації сухого льоду були взяті з довідкових табличних даних. [14].

Склавши рівняння теплообміну у контейнері отримаємо:

$$Q_{\text{сублім}} = Q_{\text{метал}} + Q_{\text{нирки}} + Q_{\text{пов1}} + Q_{\text{пов2}}; \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{нирки}} = C_{\text{нирки}} \cdot m_{\text{нирки}} \cdot \Delta t = 13,4 \text{ кДж}$ – тепло, яке віддає нирка,

де $C_{\text{нирки}}$, питома теплоємність нирки = $3350 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$, $m_{\text{нирки}} = 0,2 \text{ кг}$, $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$.

$Q_{\text{пов1}} = C_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{контейн1.}} \cdot \Delta t = 1005 \cdot 1,205 \cdot 0,0019 \cdot 20 = 0,0460 \text{ кДж}$ – тепло, яке віддає повітря відсіку для льоду,

де $C_{\text{в}}$, питома теплоємність повітря = $1005 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$, $\rho_{\text{в}}$, питома щільність повітря = $1,205 \text{ кг/м}^3$, $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{контейн1.}} = 0,07 \cdot 0,12 \cdot 0,23 = 0,0019 \text{ м}^3$ - об'єм повітря у відсіку із сухим льодом.

$Q_{\text{пов2}} = C_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{контейн2.}} \cdot \Delta t = 1005 \cdot 1,205 \cdot 0,0034 \cdot 20 = 0,082 \text{ кДж}$ – тепло, яке віддає повітря відсіку для органу, де $C_{\text{в}}$, питома теплоємність повітря = $1005 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$, $\rho_{\text{в}}$, питома щільність повітря = $1,205 \text{ кг/м}^3$, $\Delta t = 20^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{контейн2}} = 0,12 \cdot 0,13 \cdot 0,23 = 0,00359 - 0,0002 = 0,00339 \text{ м}^3$ - об'єм повітря у відсіку із органом з врахуванням об'єму органу у відсіку.

$Q_{\text{метал}} = C_{\text{метал}} \cdot m_{\text{метал}} \cdot \Delta t = 920 \cdot 2700 \cdot 0,0000945 \cdot 20 = 4,69 \text{ кДж}$ - тепло, яке віддає металева пластина, де $C_{\text{метал}}$, питома теплоємність алюмінію = $920 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$, $m_{\text{метал}} = \rho_{\text{метал}} \cdot V_{\text{метал пласт}}$, $\rho_{\text{метал}}$, питома щільність алюмінію = 2700 кг/м^3 , $V_{\text{метал пласт}} = 0,002 \cdot 0,27 \cdot 0,175 = 0,0000945 \text{ м}^3$ – об'єм алюмінієвої пластини.

Сумарні втрати тепла становлять (без врахування тепловтрат термоізоляції та тепловтрат через стінку контейнера, якими можна в цьому

випадку нехтувати) становлять 18,22 кДж. Звідки визначаємо потрібну масу сухого льоду.

$$\lambda_{\text{льоду}} \cdot m_{\text{льоду}} = 18,22 \text{ кДж}$$

$$m_{\text{льоду}} = 0,0309 \text{ кг, тобто близько 31 г}$$

Таким чином встановлено, щоб знизити температуру органу масою 200 г від температури оточуючого середовища до +3°C достатньо лише 31 г сухого льоду.

2.2 Результати проектування та теплотехнічного розрахунку

Використання тонкої алюмінієвої пластини в конструкції контейнера забезпечує ефективний теплообмін і водночас фізично відокремлює сухий лід від донорського органа. Це дозволяє уникнути прямого контакту між ними, запобігаючи виникненню холодової травми та сприяючи збереженню функціональної цілісності трансплантата. При цьому такі органи, як серце, легені, нирки, печінка та селезінка, є надзвичайно чутливими до температурних коливань, навіть у межах допустимого діапазону охолодження до +4–5 °C. Тому для підтримання стабільного температурного режиму в конструкції контейнера передбачено ефективну систему теплоізоляції та подвійний контроль температури.

Дослідним шляхом встановлено, що зниження температури ізольованих органів сприяє підвищенню їхньої стійкості до гіпоксії. Це пояснюється впливом гіпотермії на уповільнення метаболічних процесів і зменшення утворення іонів H^+ , що суттєво знижує потребу тканин у кисні. Саме тому гіпотермія дозволяє подовжити допустимий період ішемії. Існують два основні способи гіпотермії — **зовнішнє** та **внутрішнє охолодження**. У розробленому контейнері реалізовано саме метод зовнішнього охолодження. На користь цього рішення свідчать результати досліджень А. Д. Дрогайцева та О. І. Горбатова, які виявили, що при перфузійному охолодженні нирок, особливо з використанням декстринового розчину, виникають помітні судинні ушкодження [цит. за 15].

Крім того, більшість трансплантаційних центрів не використовують нирки, які зберігалися понад 48 годин. При цьому навіть за умов безперервної

перфузії протягом цього часу лише близько 25% органів відновлюють свою функцію. Такий метод зберігання є складним і дороговартісним, тому в багатьох медичних установах надається перевага зовнішньому охолодженню, за умови що загальний час консервації не перевищує 30 годин. [16].

Матеріали, використані для виготовлення контейнера, відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного температурного режиму, герметичності та стерильності. Основним матеріалом для корпусу є ударостійкий полістирол, який дозволений для застосування в медичних виробках, стійкий до дії перекису водню, хлораміну та інших дезінфекційних розчинів. Цей матеріал має низьку теплопровідність та високу механічну міцність, що забезпечує надійний захист вмісту контейнера від зовнішніх впливів.

Для теплоізоляційного шару використано екструдований пінополістирол (XPS), який має замкнену пористу структуру. Це забезпечує високу стійкість до вологи та мінімальну теплопровідність, що критично важливо для тривалого збереження температурного режиму у межах $+2...+8^{\circ}\text{C}$. Ізоляційні блоки були виготовлені відповідно до внутрішніх розмірів контейнера з урахуванням щільного прилягання до корпусу, що дозволяє уникнути утворення теплових містків.

Алюмінієва пластина, яка розділяє відсік з сухим льодом і відсік для органа, обрана через свою високу теплопровідність і корозійну стійкість. Вона сприяє рівномірному розподілу температури і виконує захисну функцію — запобігає безпосередньому контакту льоду з біологічним матеріалом.

У конструкції контейнера також передбачено клапан скидання надлишкового газу, що утворюється при сублімації сухого льоду. Для його виготовлення використовуються термостійкі полімери (наприклад, поліуретан або ABS-пластик), які зберігають механічну стабільність навіть при низьких температурах. Клапан виконується шляхом 3D-друку або фрезерування, що дозволяє досягти високої точності при збиранні.

Виготовлення корпусних елементів здійснюється методом лиття під тиском, що дозволяє отримати жорстку та легку конструкцію з точними розмірами. Для формування теплоізоляційних блоків застосовується фрезерування XPS-панелей відповідно до внутрішньої геометрії. З'єднання компонентів між собою здійснюється клеєвими з'єднаннями на основі епоксидних або медичних клеїв, які не виділяють токсичних речовин і забезпечують герметичність.

Особливу увагу приділено можливості багаторазової дезінфекції контейнера. Для цього використовуються медичні засоби обробки: розчини перекису водню, хлораміну, спиртові антисептики. Контейнер витримує до 100 циклів дезінфекції без втрати функціональних характеристик. Для забезпечення стерильності біологічного матеріалу використовуються одноразові поліетиленові пакети, які розміщуються всередині робочої камери.

Таким чином, поєднання сучасних полімерів, теплоізоляційних матеріалів, алюмінієвих сплавів та адитивних технологій дає змогу створити високоефективний, ергономічний та безпечний контейнер для транспортування донорської нирки, який повністю відповідає медичним, гігієнічним і технічним вимогам.

2.2.1 Знаходження часу охолодження нирки

Оскільки процеси теплообміну відбуваються в температурному полі, яке змінюється з часом, система є нестационарною. Припускаємо, що нирка охолоджується до 0 °C, але не замерзає (рис. 2.2.1). Найбільший температурний градієнт спостерігається на початку процесу в зовнішньому шарі, який безпосередньо прилягає до поверхні, охолодженої сухим льодом.

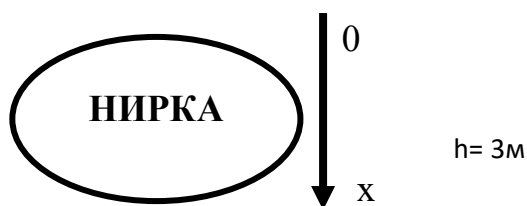


Рис.6 – Процес охолодження нирки

За формулою 2.2 визначимо пошарове охолодження нирки:

$$N = \frac{\varphi(\frac{t_1+t_2}{2}-t_l)}{x}. \quad (2.2)$$

В охолоджуваному шарі температура близька $\frac{t_1+t_2}{2} = \frac{30+0}{2} = 15^\circ$.

S - площа поперечного перерізу нирки $12 \times 6 = 72 \text{ см}^2$.

$$N = Q = \dot{m}i = C_B \times \rho_B \times V = C_B \times \rho_B \times S \times \dot{x}; \quad (2.3)$$

$$\frac{\varphi(\frac{t_1+t_2}{2}-t_l)}{x} * S = C_B * \rho_B * S * \dot{x} \quad (2.4)$$

Позначимо:

$$\frac{\varphi(\frac{t_1+t_2}{2}-t_l)}{C_B * \rho_B} = k; \quad (2.5)$$

$$X = \frac{k}{\dot{x}}; \quad (2.6)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{x}; \quad (2.7)$$

$$\int x dx = \int k d\tau; \quad (2.8)$$

$$\frac{k^2}{2} = k * \tau; \quad (2.9)$$

$$\tau = \frac{h^2}{2k} = \frac{h^2}{2} \times \frac{C_B \times \rho_B}{\varphi(\frac{t_1+t_2}{2}-t_l)} = 43 \text{с (Норма при контакті із сухим льодом)}$$

Контейнер буде зберігати тепло поки нирка буде нагріватись від 0 до 3°C і приймати $Q = C_B \cdot \rho_B \cdot V_{\text{нирки}} \cdot 3^\circ = 2,7 \text{ кДж}$.

Всередині контейнеру повітря добре перемішується, тому всі стінки всередині та ззовні однакової температури.

Так як розміри двох відсіків становлять $12 \times 13 \times 23 \text{ см}$ та $7 \times 13 \times 23 \text{ см}$. Тобто сумарно вся частина становить $19 \times 13 \times 23 \text{ см}$, товщина стін близька 2 см .

$$S_{\text{пов}} = 1966 \text{ см}^2; N = \frac{\varphi(t_{\text{поч}} - t_{\text{отгрм}}) \times S}{d} = 7,7 \text{ Вт}.$$

Вважаємо, що повітря у всюди і всередині стінок:

$$\tau = \frac{Q}{N} = 6 \text{ хвилин}$$

Контейнер буде зберігати тепло.

2.3 3D моделювання приладу у програмному середовищі SolidWorks

У середовищі SolidWorks було розроблено модель контейнера, яку створювали поетапно. Вона складається з багатьох окремих компонентів, які згодом були зібрані в єдину конструкцію.

На першому етапі було змодельовано основний елемент — корпус контейнера:

- у вкладці «Sketch» на площині «Top Plane» побудовано контур стінок контейнера;
- далі, за допомогою функції «Surface Extrude», стінки було витягнуто на необхідну висоту відповідно до заданих розмірів;
- використовуючи параметр «Draft Angle» у функції «Surface Extrude», було задано кут нахилу стінок (рис. 7).

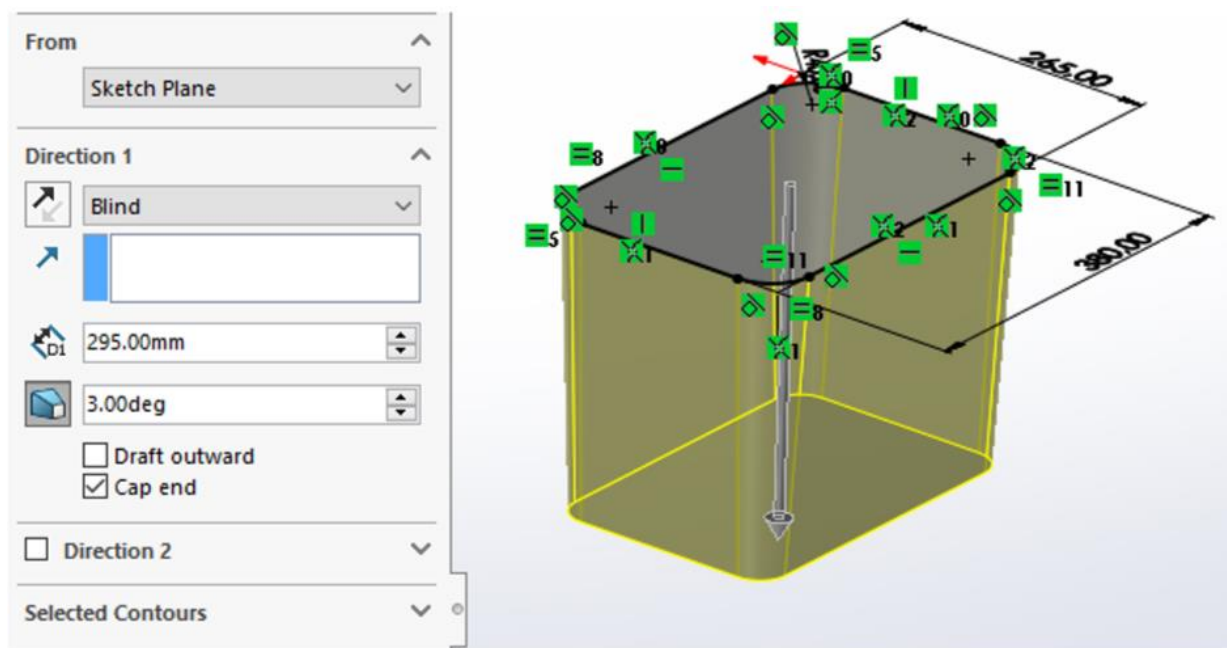


Рис.7 – Основа побудови моделі контейнера

– за допомогою функції «Ruled Surface» було виконано загин контейнера по верхньому краю (рис. 8). Цю операцію повторили для новостворених ребер, щоб забезпечити загин стінок контейнера всередину.

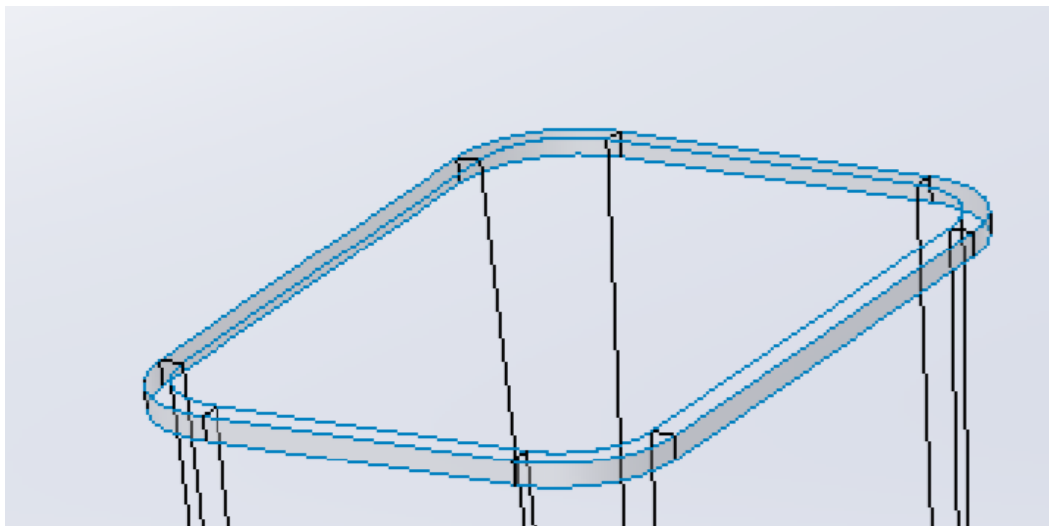


Рисунок 8 – Застосована функція «Ruled Surface» до моделі

– за допомогою параметра «Thicken» стінкам було надано товщину, яка у нашому випадку становить 1,5 мм;

– використовуючи функцію «Fillet», виконано заокруглення країв стінок, що надало моделі плавності та забезпечило реалістичну візуалізацію гладкої поверхні (рис. 9).

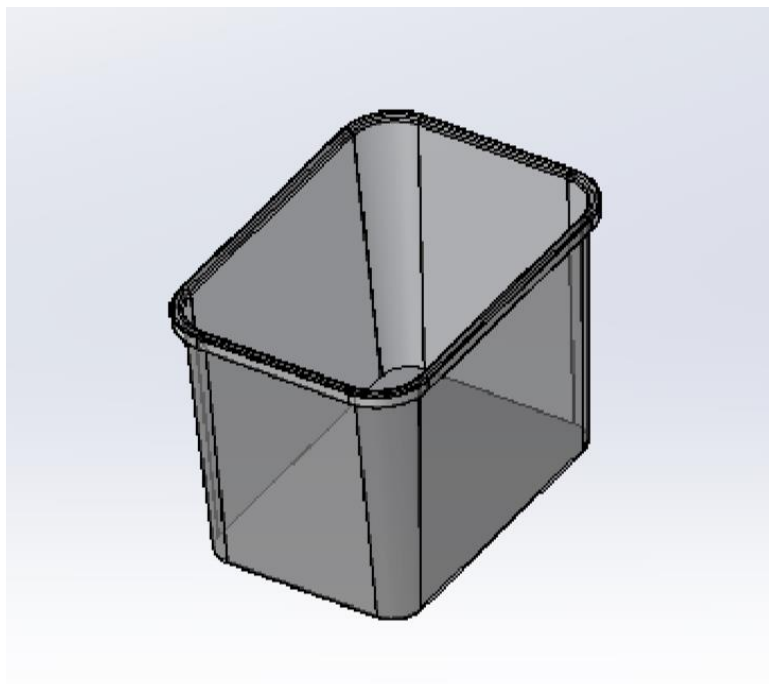


Рисунок 9 - Застосована функція «Ruled Surface» до моделі

Наступним етапом стало моделювання термоізоляційних блоків. Оскільки їх конструкція майже ідентична, розглянемо процес створення одного з них:

- у вкладці «Sketch» на площині «Top Plane» було намальовано контур термоізоляційного блоку (рис. 10);
- після цього за допомогою функції «Boss-Extrude» блок було витягнуто на задану висоту відповідно до розмірів.

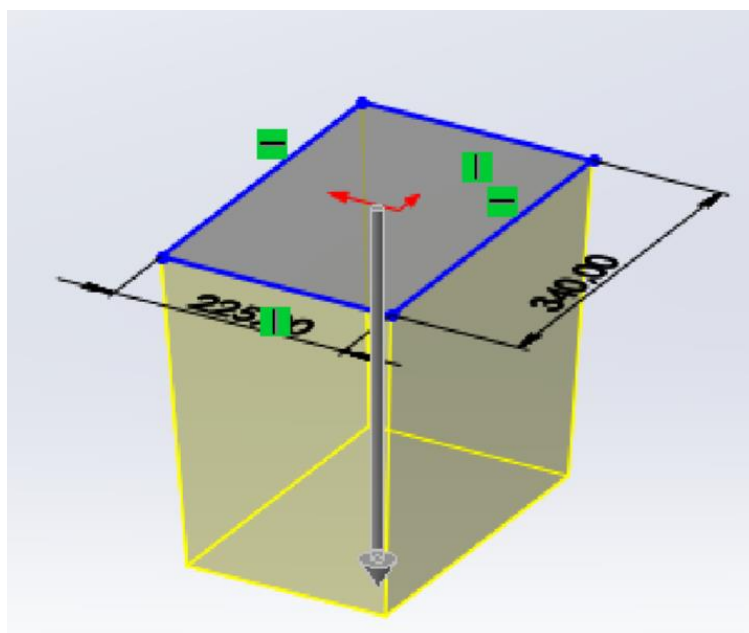


Рисунок 10 – Створена термоізоляція до моделі

– за допомогою функції «Cut-Extrude» було вирізано внутрішній простір, залишивши лише стінки термоізоляційного блоку відповідно до заданого контуру та висоти;
 – з використанням параметра «Fillet» виконано заокруглення кутів (рис. 11) для забезпечення ідеального прилягання блоку до стінок контейнера.

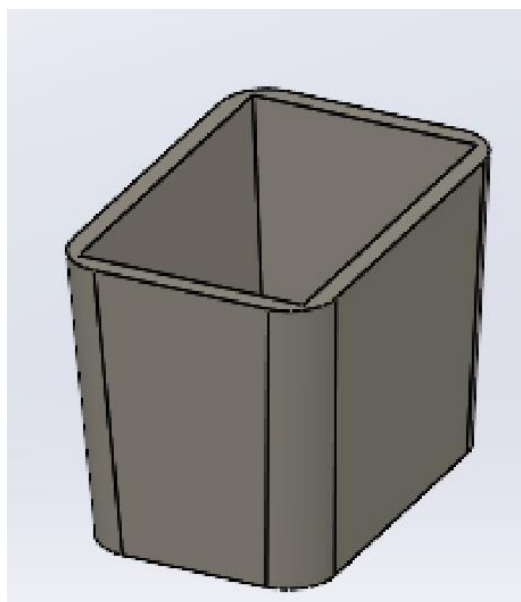


Рисунок 11 – Закруглення стінки термоізоляції

Далі було змодельовано розподільний лист між двома термоізоляційними відсіками:

- у вкладці «Sketch» на площині «Top Plane» був побудований контур листа;
- після цього за допомогою функції «Boss-Extrude» лист витягнули на задану висоту відповідно до розмірів (рис. 12).

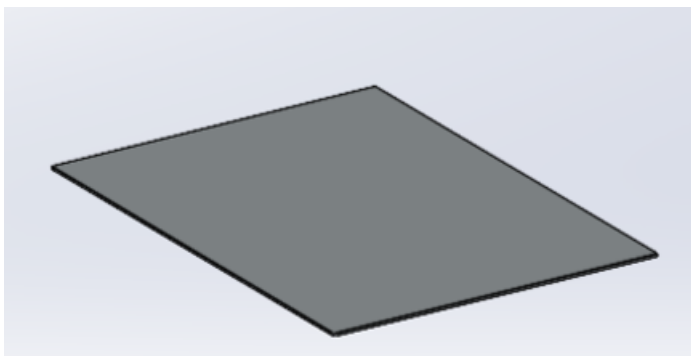


Рисунок 12 – Створена алюмінієва пластина

Наступним етапом було створення клапана викиду:

- у вкладці «Sketch» на площині «Front Plane» було намальовано контур клапана, після чого за допомогою функції «Boss-Extrude» блок витягнули на задану висоту згідно з розмірами;
- цей крок повторили кілька разів, змінюючи діаметри кіл датчиків та висоту витягування, щоб сформувати більш складну форму (рис. 13).

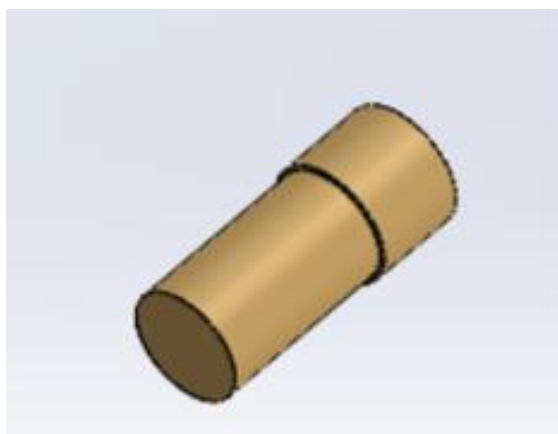


Рисунок 13 – Початковий етап створення клапан

Наприкінці на вкладці «Sketch» був намальований шестикутник, який було витягнуто за допомогою функції «Boss-Extrude».

Для моделювання початку дроту створили ескіз на площині «Top Plane», задавши хаотичну форму (можна використати функцію «Spline»).

Другий ескіз, розташований на площині «Front Plane», зобразив умовні стінки дроту, що з'єднують центр кола з початком ескізу дроту.

Далі за допомогою функції «Sweep» було витягнуто тіло по заданому шляху з певною товщиною.

Для більш привабливого вигляду кінця витягнутого круглого об'єкта застосували параметр «Fillet» для заокруглення (рис. 14).

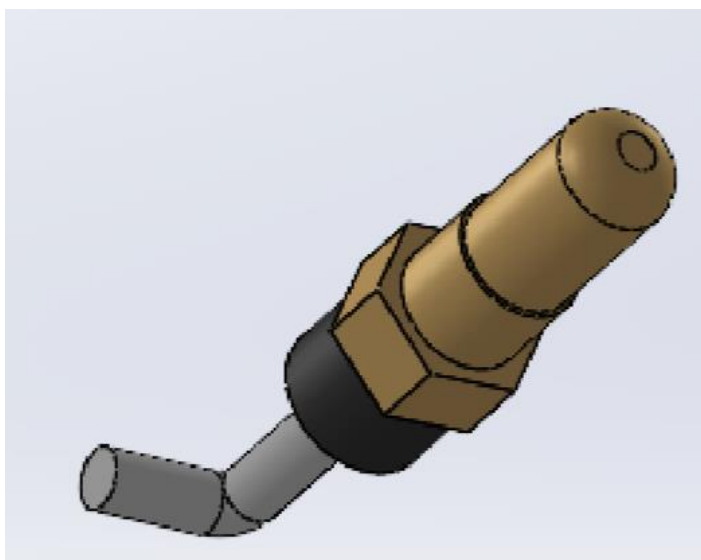


Рисунок 14 – Фінальний вигляд клапан викиду

Наступним кроком було змодельовання кришки контейнера

У вкладці «Sketch» на площині «Top Plane» був накреслений контур кришки, який потім за допомогою функції «Boss-Extrude» витягнули на задану висоту згідно з розмірами.

За допомогою функції «Ruled Surface» виконали загин кришки по верхньому ребру, повторивши цю операцію ще раз на новостворених ребрах для покращення зовнішнього вигляду.

Параметр «Thicken» використовували для задання товщини загину — 1,5 мм.

Заокруглення кінцевого об'єкта виконали за допомогою параметра «Fillet» для більш естетичного вигляду (рис. 15).

За допомогою функції «Cut-Extrude» у кришці зробили шість отворів для прокладання дротів та кріплення ніжок, на яких фіксуватимуться датчики.

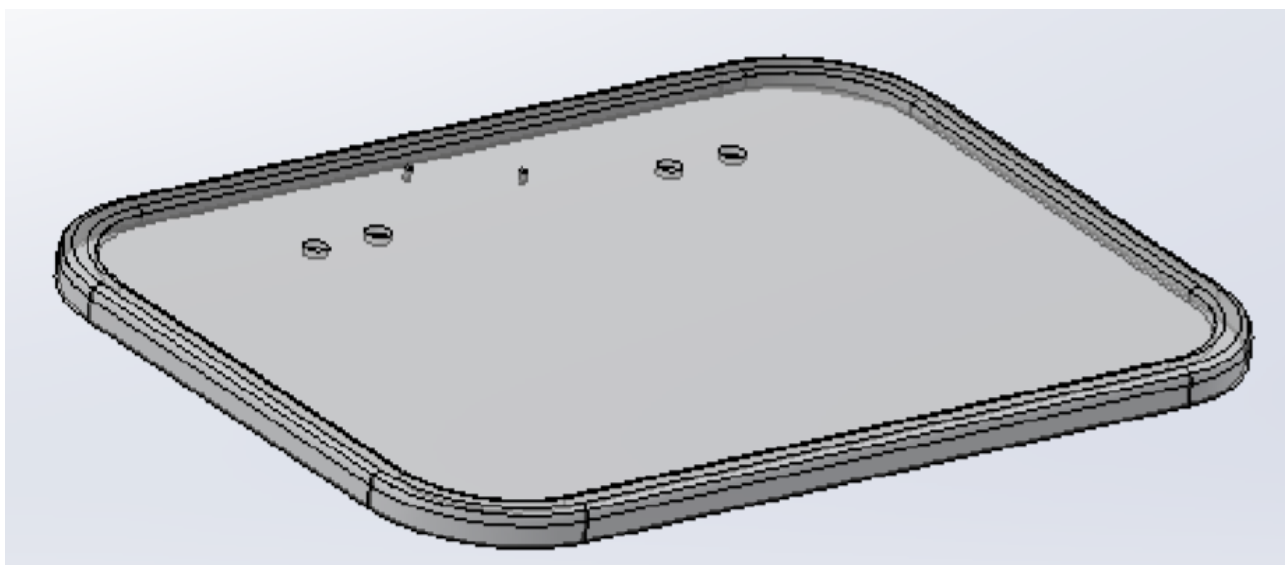


Рисунок 15 – Кришка контейнера з отворами для дротів

Далі була змодельована готова конструкція індикатора температури, а також виконано його дротове підключення.

У вкладці «Sketch» на площині «Right Plane» було накреслено контур місця кріплення датчика.

Потім за допомогою функції «Boss-Extrude» об'єкт витягнули на задану висоту відповідно до розмірів.

У нижній частині об'єкта було виконано два отвори для майбутніх ніжок (рис. 16).

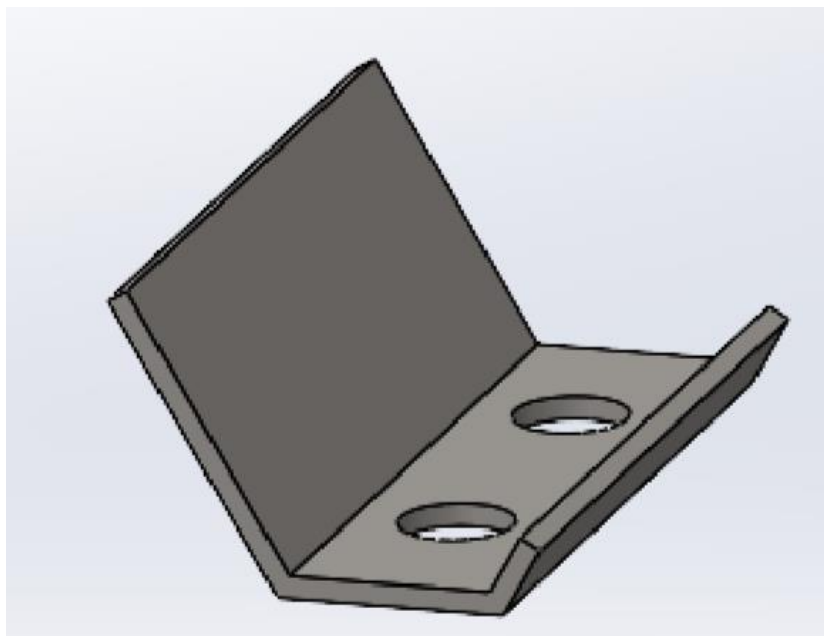


Рисунок 16 – Кріплення температурного індикатору

Ніжки створювалися шляхом витягування двох кіл за допомогою параметра «Boss-Extrude». Їхнє з'єднання було виконано наприкінці моделювання.

У вкладці «Sketch» на площині «Right Plane» накреслили ще один контур — власне датчика, який потім витягнули на задану висоту за допомогою функції «Boss-Extrude».

Для надання привабливого вигляду попередньому об'єкту застосували закруглення за допомогою параметра «Fillet».

Щоб змодельовати початок дроту, створили ескіз на площині «Top Plane» з хаотичною формою (можна використати функцію «Spline»). Другий ескіз на площині «Front Plane», що зображує умовні стінки дроту, з'єднав центр кола з початком ескізу проводу (рис. 17).

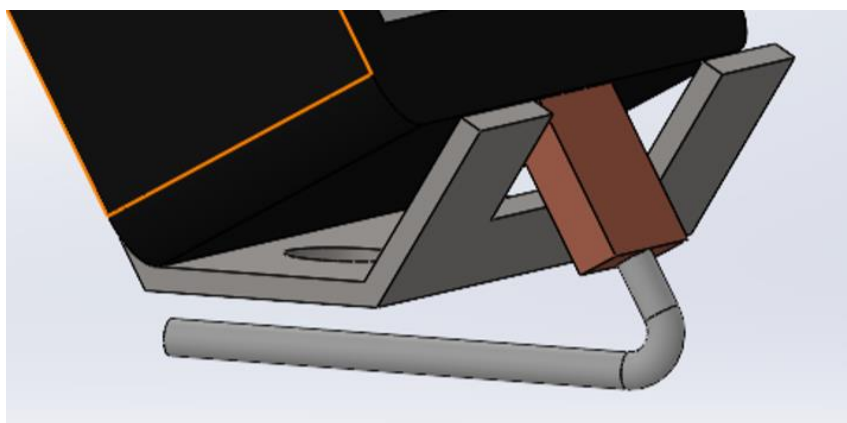


Рисунок 17 – Етап створення дроту під'єданого до контейнера

За допомогою функції «Sweep» було витягнуто тіло відповідно до заданих параметрів товщини та шляху.

Параметром «Cut-Extrude» виконано отвори в корпусі для умовних моніторів і кнопок (рис. 18).

Останньою деталлю стали дроти, які змодельовані умовно, оскільки проходять всередині термоізоляції. Їхня довжина відповідає відстані від датчика температури через термоізоляційний шар до термометра.

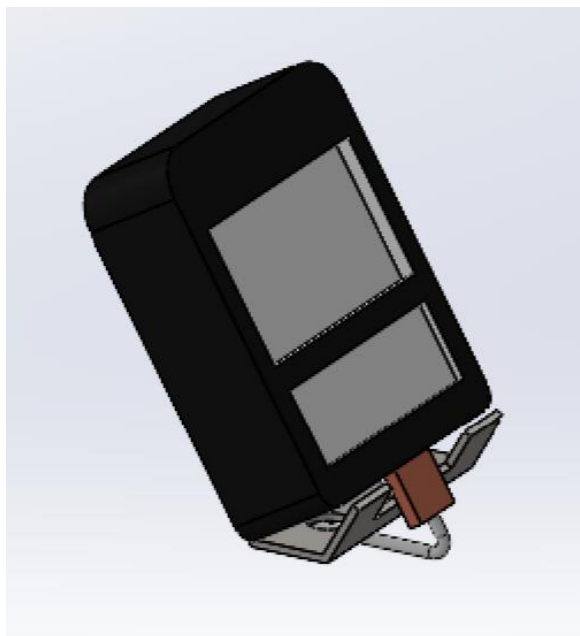


Рисунок 18 – Фінальний вигляд змодельованого індикатора температури

На двох різних планах «Top Plane» і «Front Plane» розроблений умовний маршрут дроту та задана товщина колом «Circle» (рис. 19).

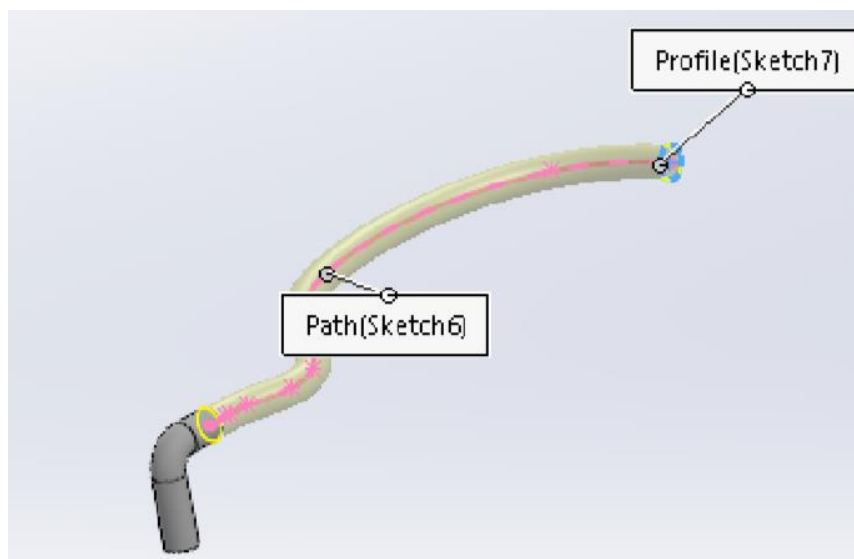


Рисунок 19 – Етап створення дроту

За допомогою функції «Sweep» витягнули тіло по заданим налаштуванням (товщина і шлях) (рис. 20).

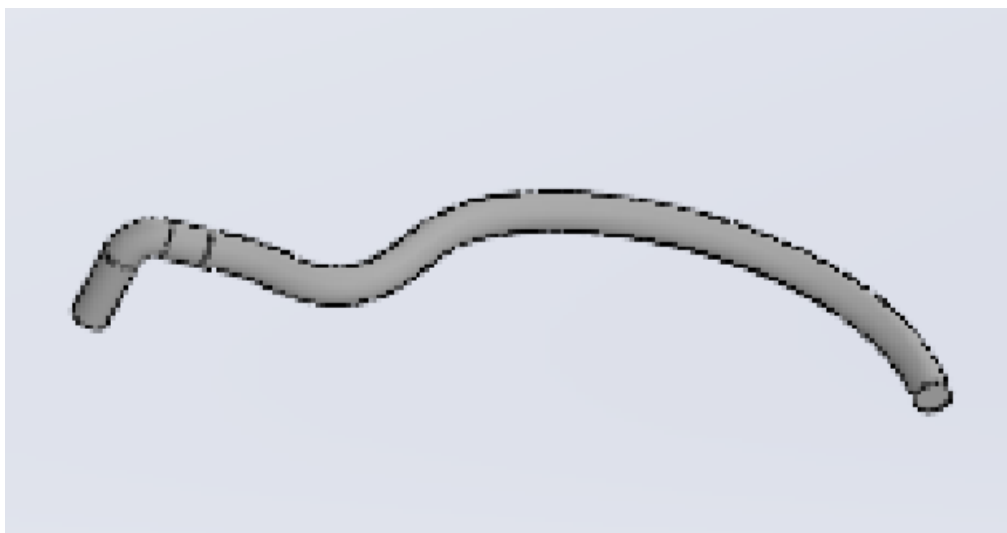


Рисунок 20 – Фінальний вигляд дроту

Наступним етапом стало складання моделі з готових деталей. Для зручності роботу розділили на дві окремі збірки: кришка з приладами та контейнер із термоізоляцією і датчиками температури. Почали зі складання кришки:

– збірка виконувалась у модулі «Assembly».

– усі необхідні деталі у потрібній кількості були завантажені у просторове меню; при цьому важливо, що першою деталлю була кришка, яка стала нерухомою базою (рис. 21).

– далі всі деталі були розміщені на відповідні місця. Ніжки термометрів з'єднали з отворами у кришці за допомогою функції «Mate». Для зручності налаштування, параметр «Mate» пропонує стандартний перелік з'єднань: Coincident, Parallel, Perpendicular, Tangent, Concentric.

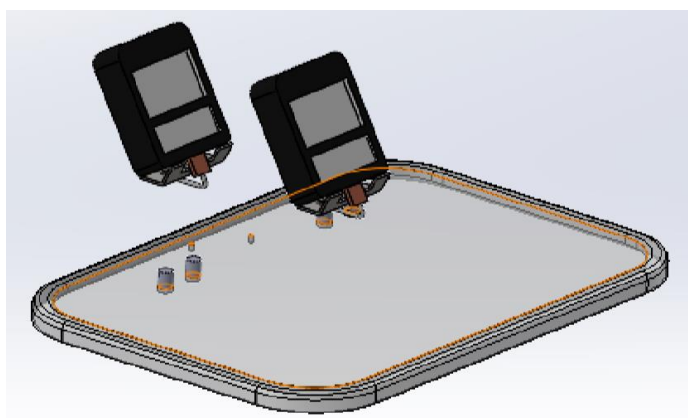


Рисунок 21 – Початковий етап збірки

Щоб вибрати поверхню для з'єднання, потрібно було натиснути на неї, а потім обрати поверхню, з якою її слід поєднати.

За допомогою функції «Mate» було з'єднано всі ніжки, на яких встановлені термометри.

До проводів термометрів додатково приєднані створені дроти. Підзбірка кришки вважається завершеною (рис. 22).

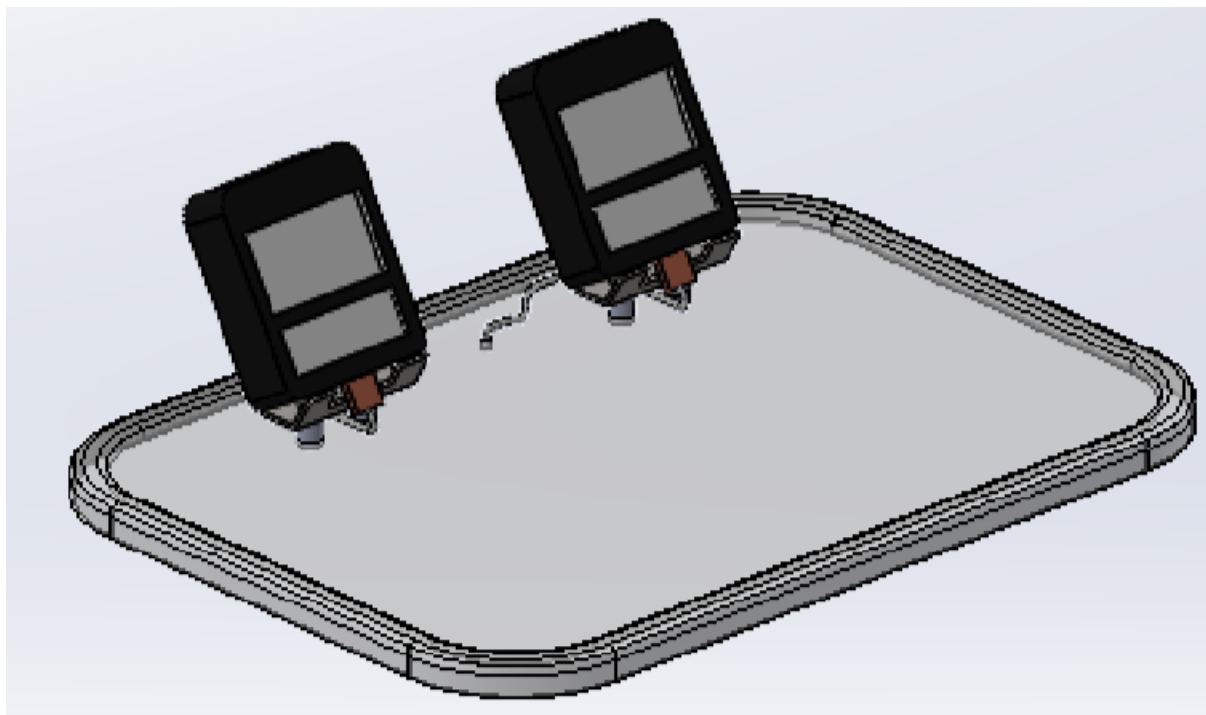


Рисунок 22 – Підбірка кришки

Останнім етапом було створення збірки нижньої частини контейнера та її об'єднання з підбіркою кришки:

- у просторовому меню були завантажені всі необхідні деталі у потрібній кількості; основою виступає контейнер, який залишився нерухомим;

- за допомогою функції «Mate» з використанням стандартного з'єднання Coincident було приєднано перший шар термоізоляції до контейнера, перемістивши його всередину (рис. 23).

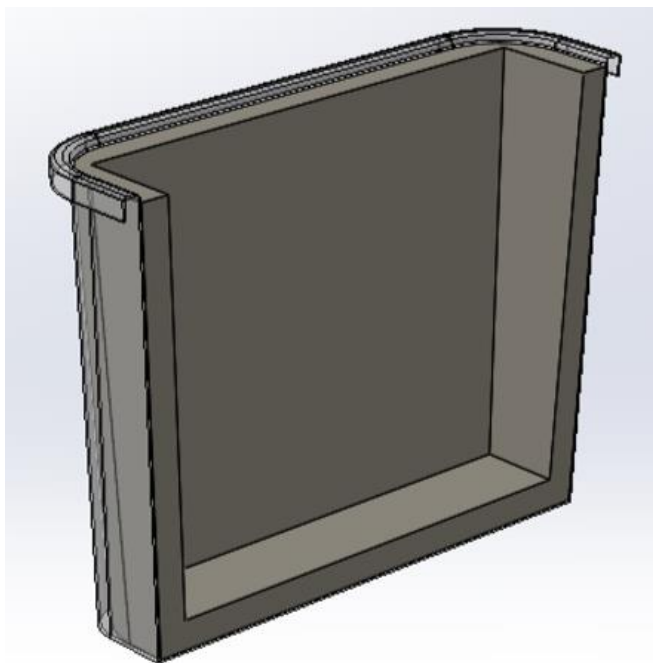


Рисунок 23 – Переміщення теплоізоляційного шару всередину контейнера

Аналогічно було виконано з внутрішнім термоізоляційним блоком, який з'єднали з першим шаром термоізоляції.

До верхньої частини стінок другого термоізоляційного блока прикріпили металеву пластину, що виконує функцію перегородки (рис. 24).

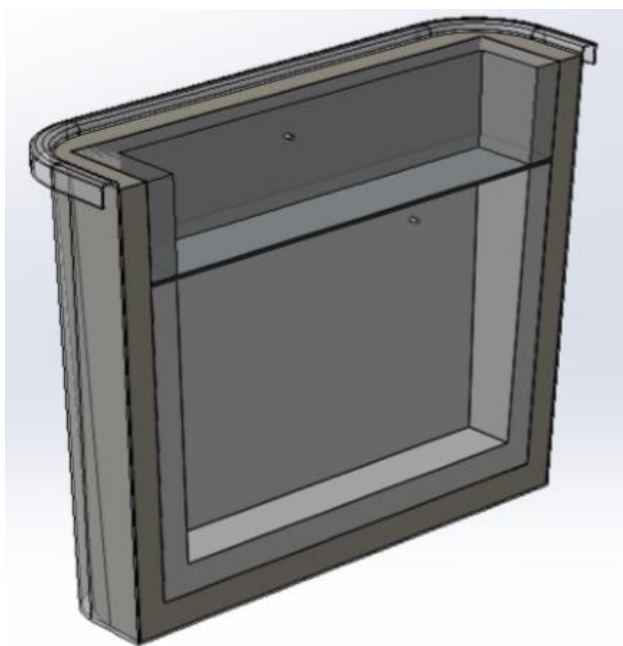


Рисунок 24 - Моделювання металевій пластини між відсіками

Безпосередньо в середовищі «Assembly» було створено кілька отворів у стінках термоізоляції за допомогою операції «Cut-Extrude». Діаметр отворів відповідає діаметру проводу, а глибина вирізів є невеликою (рис. 25).

За допомогою функції «Mate» з використанням стандартного з'єднання Coincident дроти датчиків було з'єднано з отворами у блоках.

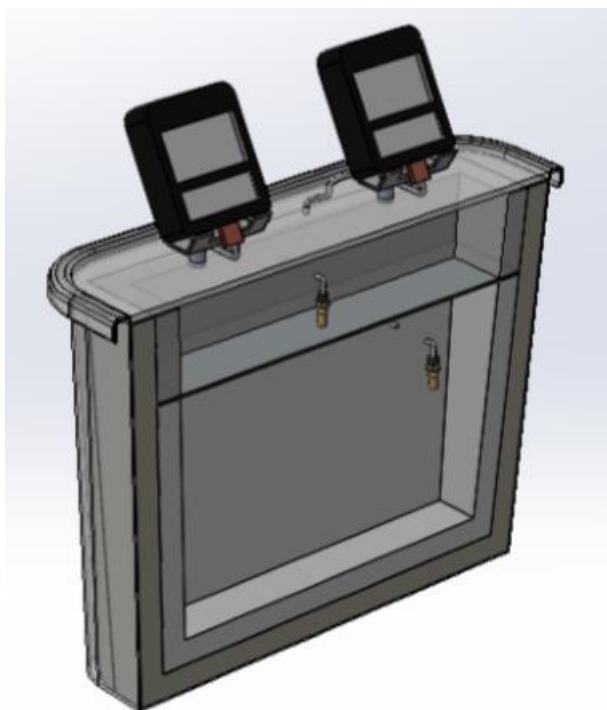


Рисунок 25– Завершальний етап моделювання контейнера

Останній крок – це з'єднання кришки із контейнером.

3 СЕНСОРНА СИСТЕМА В КОНТЕЙНЕРІ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ДОНОРСЬКОЇ НИРКИ

3.1 Призначення і функції сенсорної системи

Під час транспортування донорських органів надзвичайно важливо забезпечити стабільність середовища, в якому перебуває орган, з метою збереження його життєздатності до моменту імплантації [19, 21, 22]. Найменші відхилення від оптимальних умов можуть призвести до порушення функціональних властивостей органа, втрати біологічної сумісності та навіть до неможливості його використання. Саме тому сенсорна система, інтегрована в конструкцію контейнера, виконує критично важливу функцію — безперервний моніторинг параметрів середовища транспортування в режимі реального часу. Сенсорна система виконує кілька ключових функцій:

1. *Контроль температури.* Для збереження нирки потрібна стабільна температура в межах $+2...+8$ °C [17, 19]. Занадто низька температура може спричинити кристалізацію міжклітинної рідини, що пошкоджує тканини, а перевищення температури прискорює метаболічні процеси та призводить до втрати органом функціональності. Сенсорна система відслідковує температуру середовища в контейнері з точністю до $\pm 0,5$ °C [17, 20].
2. *Контроль вологості повітря.* Надмірна вологість або її нестача може призвести до конденсації або пересихання матеріалів, що вкривають орган. Також конденсат становить небезпеку для електронних компонентів [19, 20]. Вимірювання відносної вологості дозволяє вчасно виявити відхилення та включити вентиляцію або активувати сигналізацію.
3. *Фіксація вібрацій та ударів.* У разі падіння або різкого струшування контейнера можливе механічне пошкодження органа або порушення герметичності системи охолодження. Акселерометри у складі сенсорної системи здатні виявляти надмірні прискорення та сповіщати про інцидент користувача або логувати подію для подальшого аналізу[20].

4. *Геолокація і контроль маршруту.* GPS-модуль дозволяє відстежувати маршрут і місцезнаходження контейнера, що особливо важливо під час міжміських або міжнародних перевезень [20, 22]. Це дає змогу оцінити фактичну тривалість транспортування та забезпечити координацію між медичними установами.
5. *Контроль відкриття контейнера.* Незаплановане або несанкціоноване відкриття кришки під час транспортування становить загрозу безпеці органа. За допомогою простого магнітного сенсора або геркона можна фіксувати факт відкриття та сигналізувати про нього, записуючи час події [20].
6. *Фіксація часу та подій.* Модуль реального часу (RTC) дозволяє вести точний журнал подій із прив'язкою до часу. Це важливо для ретроспективного аналізу умов транспортування, підтвердження дотримання протоколу та звітності [20, 22].
7. *Оповіщення та індикація відхилень.* Якщо один або кілька параметрів виходять за межі норми, система може подавати світлові або звукові сигнали, а також надсилати повідомлення через бездротовий інтерфейс (Bluetooth, Wi-Fi, GSM) [20, 23].

Загалом, сенсорна система виконує роль інтелектуального моніторингового блоку, що дає змогу медичному персоналу отримати повну інформацію про умови зберігання та транспортування донорської нирки. Це не лише підвищує якість логістики медичних вантажів, а й безпосередньо впливає на шанси успішної трансплантації для реципієнта.

3.2 Вибір датчиків і контрольовані параметри

Для реалізації функціоналу сенсорної системи було обрано набір датчиків, які відповідають ключовим вимогам до точності, надійності, енергоефективності та сумісності з платформою Arduino або ESP32 [21]. Основна мета полягає в забезпеченні повного контролю умов транспортування донорського органа у режимі реального часу.

Температурний датчик DS18B20 є цифровим однопровідним сенсором з точністю $\pm 0,5$ °C та діапазоном вимірювання від -55 до $+125$ °C. Цей сенсор широко використовується у медичних і лабораторних системах контролю температури завдяки простоті підключення, стійкості до електромагнітних завад і можливості підключення декількох сенсорів до одного порту.



Рис.26 -Цифровий датчик температури DS18B20

Цифровий датчик температури 18B20 (названий також DS18B20) (рис.26) є компактним, точним і недорогим цифровим датчиком температури. Датчик використовує інтерфейс 1-Wire , розроблений компанією Dallas . Цей інтерфейс поширений і досить простий у освоєнні. Додатковим його плюсом є можливість паралельного підключення кількох датчиків однією шиною даних.

Датчики цього можуть працювати як за стандартною трипровідною схемою, так і за двопровідною схемою (з паразитним живленням).

Мікросхема 18B20 просто підключається до мікроконтролерів на базі Arduino, AVR, PIC, ARM та ін. Для роботи з Arduino є готова бібліотека, створена виробником [24].

Характеристики:

Напруга живлення	3.0..5.5 В
Діапазон температур	-55 °C.. $+125$ °C
Точність вимірювання температури	0.5 °C

Роздільна здатність	0.0625 °C
Інтерфейс	1-Wire
Споживаний струм	1mA

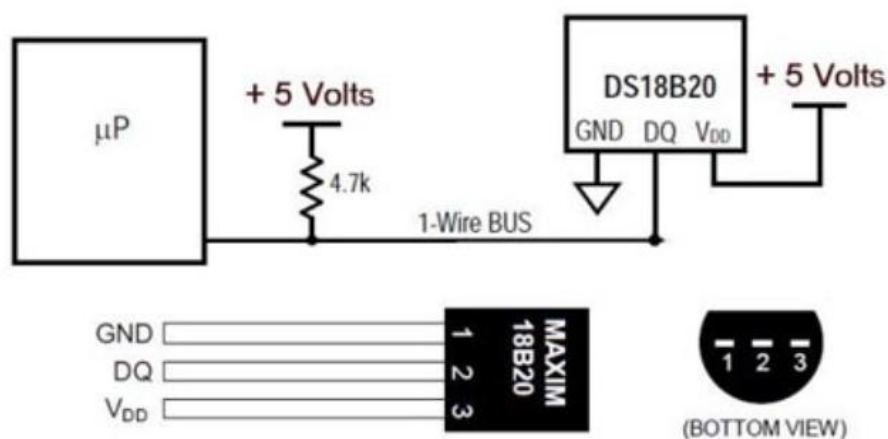


Рис.27 - Схема підключення датчика DS18B20

Датчик вологості DHT22 дозволяє вимірювати як температуру, так і відносну вологість з точністю $\pm 0,5$ °C і ± 2 % відповідно. Він забезпечує цифровий вихід, що спрощує обробку даних мікроконтролером. Використання даного сенсора є доцільним при необхідності моніторингу вологості всередині контейнера для уникнення утворення конденсату, який може пошкодити як орган, так і електроніку.

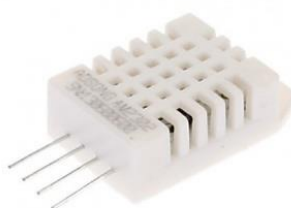


Рис.28 - Датчик температури та вологості DHT22

Датчик DHT22/AM2302 (рис.28) використовується для вимірювання температури та вологості повітря з підвищеною точністю. Передача даних здійснюється одним проводом з використанням власного протоколу. Може бути використаний у пристроях Arduino, AVR, PIC, ARM та ін. Для роботи з Arduino існують готові бібліотеки[25].

Характеристики:

Напруга живлення	3.5 ... 5.5 В
Діапазон температур	-40...+80 °С
Похибка показників температури	±0.5 °С
Діапазон вологості	0-100%
Похибка свідчень вологості	±2 %

Акселерометр MPU6050 забезпечує вимірювання лінійних прискорень та кутових швидкостей по трьох осях (рис.29). Це дозволяє реєструвати вібрації, удари, різкі зміни положення контейнера. Завдяки вбудованому цифровому фільтру він надає стабільні дані, що важливо для точної оцінки фізичного впливу на об'єкт транспортування.



Рис.29- Акселерометр та гіроскоп MPU-6050

MPU-6050 GY-521 – компактний та легкий модуль 3х осьового акселерометра та 3х осьовий гіроскоп керований за протоколом I2C (TWI). Даний датчик відмінно підходить для визначення положення простору [26].

Характеристики:

Живлення	3.3 – 5.0 В
Чип	MPU-6050
Діапазон гіроскопа	± 250, ±500, ±1000, ±2000 °/с
Діапазон акселерометра	±2, ±4, ±8, ±16 g
Розмір плати	20×16 мм

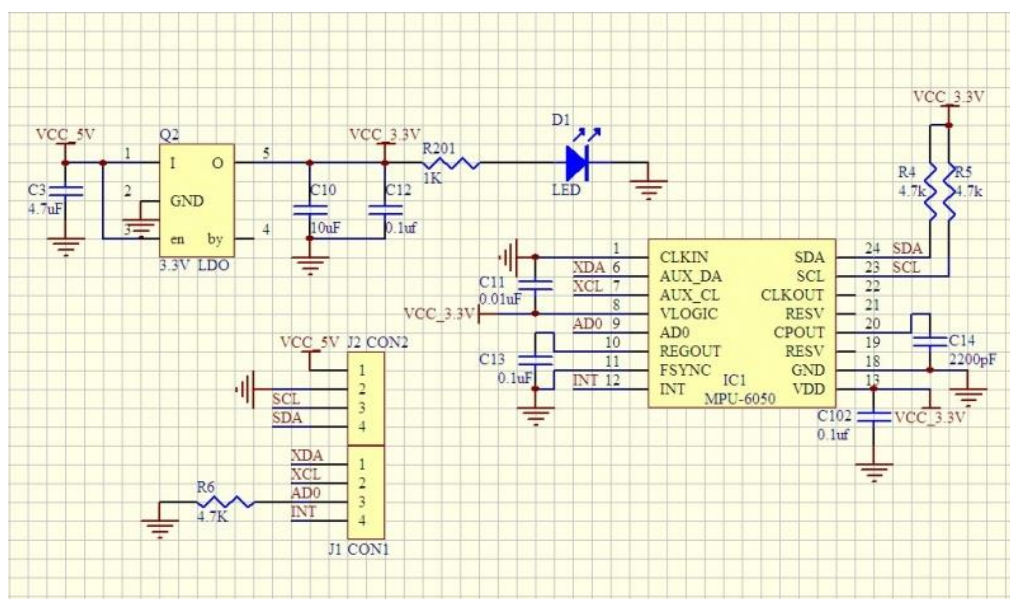


Рис.30 - Схема підключення датчика MPU-6050

Датчик атмосферного тиску BMP280 (рис.31) використовується для визначення змін висоти або тиску під час транспортування, що може бути корисним при авіаперевезеннях або в герметичних середовищах. Його точність становить до ± 1 гПа, а вбудовані компенсаційні алгоритми забезпечують коректну роботу в широкому температурному діапазоні.

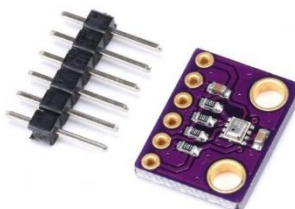


Рис.31 -Датчик атмосферного тиску, температури BMP280

Модуль на чіпі BMP280 поєднує в собі датчик атмосферного тиску та термометр . В основі плати лежить чіп Bosch BMP280, який є продовженням лінійки цифрових датчиків тиску BMP085 та BMP180.

Датчик BMP280 відрізняється від попередніх версій зменшеними габаритами та енергоспоживанням, підтримкою двох інтерфейсів зв'язку - SPI та I2C , великою роздільною здатністю показань по тиску та температурі, а також наявністю вбудованих фільтрів, що зменшують вплив шумів на показання датчиків[27].

Характеристики:

Діапазон вимірювання тиску	300...1100 гПа (що відповідає висоті від -500 до 9000 м над рівнем моря)
Точність вимірювання тиску	± 1 гПа
Напруга живлення	1.8 – 3.6 В
Споживаний струм	2.7 мкА (при частоті опитування 1 Гц)
Робочий температурний діапазон:	від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$
Розміри модуля	15 × 11 мм

GPS-модуль NEO-6М (рис.32) призначений для визначення координат контейнера в будь-який момент часу. Він працює з точністю до 2,5 м, підтримує протокол NMEA та легко інтегрується в систему моніторингу для відстеження маршруту доставки органа [28].



Рис.32 - GPS-модуль NEO-6М

Характеристики:

Напруга живлення	3-5 В
Тип інтерфейсу	UART-порт
Швидкість порту за замовчуванням	9600 бод
Розміри	Модуль: 25 × 35 мм Антенна: 25 × 25 мм

Магнітний сенсор (геркон) дозволяє фіксувати факт відкриття або закриття кришки контейнера. Він реагує на зміну положення магніту та забезпечує простий контактний сигнал, що може бути зчитаний будь-яким мікроконтролером. Це забезпечує фіксацію порушень цілісності контейнера.

Модуль реального часу DS3231 (RTC) (рис.33) дозволяє точно фіксувати час кожної події, незалежно від вимкнення живлення. Він має вбудований кварцовий генератор і батарею, що дозволяє вести безперервний відлік часу навіть при транспортуванні протягом багатьох годин або діб.



Рис.33 - Модуль реального часу DS3231 (RTC)

DS3231 - це високоточний і низьковитратний I2C RTC (реального часу годинник) модуль з інтегрованим температурно-компенсованим кварцовим осцилятором (TCXO) та кристалом. Цей модуль призначений для забезпечення точного відліку часу, навіть при відключенні основного живлення завдяки підтримці батареї [29].

Характеристики:

Вхідна напруга	3-5.5 В
Інтерфейс	I2C
Розміри	39 x 21.8 x 13 мм
Точність	± 0.432 сек/день
Тип мікросхеми	DS3231N

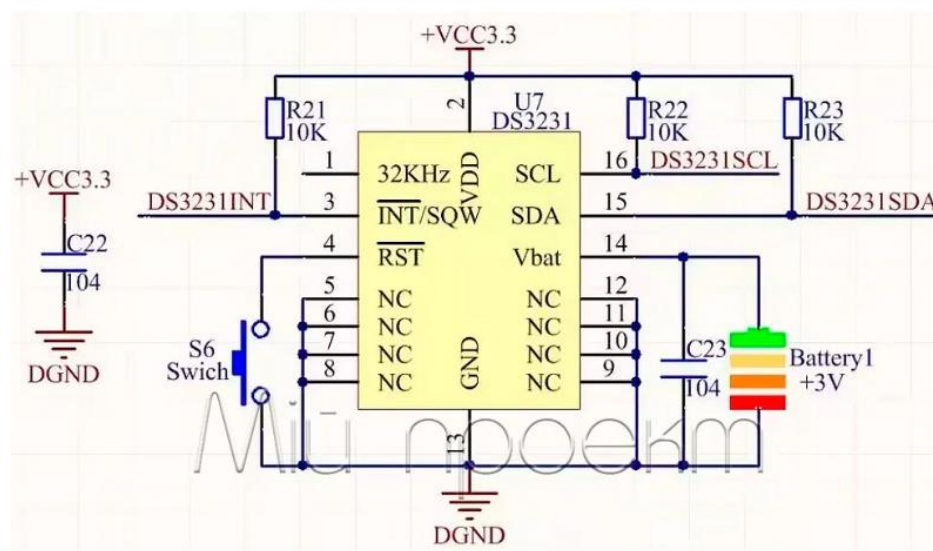


Рис.34 – Схема підключення модуля реального часу DS3231 (RTC)

Таким чином, вибір сенсорів здійснено з урахуванням їх точності, енергоспоживання, сумісності з мікроконтролерними системами та вимог до медичного транспортування.

3.3 Структура та з'єднання сенсорної системи

Сенсорна система, інтегрована в контейнер для транспортування донорської нирки, реалізується у вигляді модульної електронної платформи з використанням мікроконтролера ESP32 або Arduino. Усі сенсори, згадані в попередньому підпункті, підключаються до мікроконтролера за допомогою цифрових інтерфейсів I2C, UART, OneWire або GPIO, залежно від типу сенсора [20].

Схематично структура сенсорної системи включає такі основні блоки:

- Блок сенсорів: температура (DS18B20), вологість (DHT22), тиск (BMP280), вібрації (MPU6050), GPS (NEO-6M), відкриття кришки (геркон), RTC (DS3231);
- Мікроконтролерний модуль: обробка даних, логіка прийняття рішень, контроль аварійних ситуацій;
- Блок живлення: літій-іонний акумулятор з зарядним модулем TP4056;
- Комунікаційний модуль: Bluetooth або Wi-Fi (у випадку ESP32), або додатково GSM-модем (SIM800L) для надсилання повідомлень;
- Блок зберігання даних: microSD-карта або EEPROM-пам'ять;

- Індикація: світлодіодні індикатори та/або звуковий сигнал (бузер).

Пояснення до схеми з'єднання (див. додаток А):

- Температурний датчик DS18B20 з'єднується через OneWire на цифровому піні (наприклад, D2);
- DHT22 — через окремий цифровий пін (D3);
- BMP280 і MPU6050 — через спільну шину I2C (переважно SDA — D4, SCL — D5);
- GPS-модуль NEO-6M — зазвичай через UART (TX і RX на D6, D7);
- RTC-модуль DS3231 — також через I2C;
- SD-карта — через SPI (підключення до пінів CS, MISO, MOSI, SCK);
- Геркон — до цифрового входу з підтягувальним резистором;
- Світлодіоди або бузер — до виводів з програмованою логікою сигналізації [18, 19].

Мікроконтролер опитує сенсори з заданою періодичністю (наприклад, кожні 5 секунд), обробляє отримані значення та зберігає у вигляді записів з міткою часу. У разі виявлення критичних відхилень (наприклад, підвищення температури понад 8 °C або перевищення допустимого прискорення) активується індикація та (опційно) надсилається повідомлення на смартфон або сервер [21, 22].

Для живлення використовується акумулятор ємністю від 2000 до 5000 мА·год, якого вистачає на 12–24 години автономної роботи. Зарядка можлива через microUSB або Type-C через плату TP4056 із вбудованим захистом від перезаряду [20].

Компонування системи передбачає розміщення всіх елементів у окремій герметичній камері контейнера з теплоізоляцією та вологозахистом. Такий підхід забезпечує збереження функціональності електроніки навіть у складних умовах транспортування (низька температура, вібрації, конденсат) [19, 21].

Таким чином, структура та принцип з'єднання сенсорної системи дають змогу реалізувати стабільну, безпечну й точну систему контролю, яка є ключовою для успішного збереження органа при доставці.

3.4 Принцип роботи та обробка даних

Сенсорна система контейнера працює як єдина інтегрована електронна система, яка забезпечує постійний контроль параметрів середовища, в якому транспортується донорський орган. Після вмикання контейнера усі сенсори починають збирати дані, які передаються до мікроконтролера. Наприклад, температурні датчики DS18B20 вимірюють температуру з точністю до 0,5 °C і передають її за допомогою цифрового протоколу OneWire. Дані від усіх сенсорів — температури, вологості, вібрації, атмосферного тиску — надходять на центральний контролер, який обробляє їх у режимі реального часу.

Контролер аналізує ці показники, фіксує їх разом із часовими мітками, що надходять з модуля реального часу DS3231. У разі перевищення допустимих меж система здатна видавати звукові або світлові сигнали, а також надсилати інформацію на зовнішній пристрій за допомогою бездротового з'єднання. На дисплеї, розміщеному на корпусі контейнера, виводяться поточні значення температури та вологості, що дає змогу оперативно контролювати умови транспортування.

Також передбачено логування всіх подій у пам'ять з можливістю подальшого аналізу. Це важливо для підтвердження дотримання умов зберігання під час транспортування. Сенсорна система працює автономно і не потребує втручання з боку оператора, що значно підвищує її надійність у польових умовах.

Принцип роботи сенсорної системи ґрунтується на безперервному циклі збору, обробки, збереження та індикації даних. Усі компоненти працюють у координації під керуванням мікроконтролера (наприклад, ESP32), який виступає центральним обчислювальним вузлом системи [20].

Після ввімкнення системи, мікроконтролер ініціалізує всі підключені сенсори та модулі — встановлюється зв'язок через відповідні інтерфейси

(OneWire, I2C, UART, SPI). Далі запускається основний цикл опитування, в межах якого сенсори зчитуються з певним інтервалом — зазвичай від 2 до 10 секунд, залежно від важливості параметра та потреби в економії енергії [20, 21].

Отримані від сенсорів значення обробляються мікроконтролером — здійснюється фільтрація «шумів», усереднення за кілька циклів, перевірка на вихід за встановлені допустимі межі (температура, вологість, прискорення тощо). У разі фіксації відхилення активується попереджувальний сигнал (звук або світлодіод), а в пам'яті створюється запис події з міткою часу [20].

Дані також можуть зберігатися на microSD-карті у вигляді CSV-файлу або журналу подій з датами і точними показниками. Для цього використовується SPI-інтерфейс. У випадку використання ESP32 або GSM-модулів, дані можуть передаватися на смартфон, віддалений сервер або у хмарне сховище через Wi-Fi, Bluetooth або мобільну мережу (SMS, HTTP-запит) [20, 22].

Логіка обробки даних реалізована програмно в середовищі Arduino IDE або MicroPython (додаток А). Стандартна структура програми включає:

- ініціалізацію сенсорів (функція `setup`);
- постійний цикл зчитування даних (`loop`);
- порівняння з граничними значеннями (температура, вологість, прискорення);
- формування записів у пам'яті або на карті;
- вивід повідомлень або активація сигналів;
- перехід у режим сну (`deep sleep`), якщо система працює автономно [20].

Для забезпечення надійності реалізовано обробку помилок з повторною ініціалізацією сенсора у разі збоїв зчитування, а також контроль заряду батареї, що може впливати на точність роботи датчиків [20, 21].

Важливою функцією є також ведення журналу подій (логів), де фіксується:

- дата й час запуску системи;
- кожна подія перевищення порогу;
- координати місцезнаходження (при наявності GPS);
- повідомлення про відкриття кришки або удари [20].

Таким чином, сенсорна система виконує повноцінну функцію моніторингу умов транспортування органа з можливістю автономної або дистанційної обробки даних, що значно підвищує надійність доставки та безпеку трансплантації.

3.5 Надійність, захист і перспективи розвитку

Надійність функціонування сенсорної системи є одним із найважливіших критеріїв її ефективності в умовах реального транспортування донорських органів. Електронні компоненти системи працюють в умовах змін температур, вологості, вібрацій, а також обмеженого енергозабезпечення. Тому необхідно забезпечити фізичний, електричний та програмний захист усіх елементів.

Для уникнення програмних збоїв мікроконтролер обладнаний спеціальними механізмами перезапуску, що автоматично відновлюють його роботу у разі зависання. Вся інформація перевіряється на достовірність перед передачею або збереженням, що гарантує точність отриманих даних.

У перспективі система може бути розширена новими функціями. Зокрема, доцільно передбачити передачу даних через мобільний інтернет за допомогою GSM-модуля, що дозволить відстежувати стан контейнера з будь-якої точки. Можливим є також впровадження нових типів сенсорів, таких як датчики кисню або CO₂, для покращення контролю газового середовища. Завдяки використанню енергоефективних протоколів зв'язку, система може працювати тривалий час без підзарядки, що розширює її застосування у віддалених регіонах або в умовах надзвичайних ситуацій.

Фізичний захист включає:

- герметизацію датчиків і плати керування в спеціальному корпусі, що захищає від попадання води, пилу та конденсату;
- термоізоляцію корпусу для зменшення впливу зовнішньої температури на електроніку;
- амортизацію компонентів у корпусі (наприклад, за допомогою поролону або силіконових вставок) для зниження вібраційного навантаження.

Електроживлення системи реалізовано на основі літій-іонного акумулятора ємністю від 2000 до 5000 мА·год, що забезпечує безперервну роботу сенсорної системи протягом 12–24 годин [20, 21]. Для контролю заряду використовується плата захисту типу TP4056 із захистом від перезаряду та надмірного розряду.

Програмна стійкість досягається за рахунок використання алгоритмів обробки помилок — у випадку збою зчитування даних сенсори автоматично ініціалізуються повторно. Також реалізується логіка watchdog-таймера, яка забезпечує перезапуск системи в разі її зависання.

Перспективи розвитку системи включають:

- підключення GSM-модуля (наприклад, SIM800L) для надсилання SMS або трекінгу в мережі 2G;
- використання модуля NFC або RFID для обліку доступу до контейнера;
- розширення можливостей інтерфейсу — підключення OLED-дисплея для локального перегляду параметрів;
- інтеграція з хмарними сервісами (наприклад, Blynk, ThingSpeak, Firebase) для дистанційного контролю з будь-якої точки світу [20].

Таким чином, реалізовані заходи щодо фізичного та програмного захисту сенсорної системи значно підвищують її стійкість до несприятливих умов експлуатації, а запропоновані перспективи розвитку дають змогу модернізувати систему під конкретні завдання транспортування органів у майбутньому.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є невід’ємною складовою діяльності в галузі біомедичної інженерії, особливо при проектуванні та випробуванні медичних пристроїв. Це забезпечує не лише захист працівників, які виготовляють чи тестують обладнання, а й безпечне середовище для медичного персоналу та пацієнтів. Усі роботи, пов’язані з розробкою медичної техніки, повинні відповідати чинним нормативним вимогам і стандартам охорони праці, оскільки будь-яке порушення технологічного процесу чи нехтування заходами безпеки може призвести до травматизму, професійних захворювань або пошкодження обладнання.

Під час виконання кваліфікаційної роботи на тему «Розробка контейнера для транспортування донорської нирки», на дослідника відповідно до Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, впливали наступні шкідливі та небезпечні виробничі фактори:

1. Фізичні: знижена температура через використання сухого льоду; підвищена концентрація вуглекислого газу (CO_2) у повітрі при його випаровуванні; недостатня освітленість або нерівномірний розподіл світла на робочому місці; вібрації та шум від вентиляторів та обладнання; наявність електромагнітного випромінювання від контролера і датчиків.
2. Психофізіологічні: статичне навантаження через тривале перебування в одній позі під час складання пристрою; зорове навантаження під час роботи з мікроелектронікою; розумове напруження під час аналізу параметрів експериментів.
3. Хімічні: наявність CO_2 у повітрі робочої зони під час взаємодії з сухим льодом; можливе випаровування летких речовин з пластикових елементів під час нагріву.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об’єкта

Контейнер для транспортування донорської нирки, що розробляється в межах дипломного проекту, є складовою медичного обладнання, яке має

відповідати вимогам біологічної безпеки, а також стандартам безпечної експлуатації. Проектування, виготовлення і дослідження прототипу цього контейнера здійснюється в умовах лабораторії, тому основні питання охорони праці стосуються: безпеки роботи з електронними компонентами, термоізоляційними матеріалами, джерелами холоду (зокрема сухим льодом), а також загальної організації робочого місця.

Дослідницька частина бакалаврської кваліфікаційної праці робиться в умовах навчальної лабораторії. Тут виконуються проектні роботи, складання дослідного взірця контейнера та випробування його функціональних особливостей, зокрема теплового стану.

У роботі передбачено, що складання та випробування контейнера проводиться в лабораторному приміщенні, котре відповідає нормам безпеки праці згідно з ДСТУ 8604:2015. Робочі столи мають бути обладнані ергономічно, а між столами витримано прохід не менше 1 метра [30].

Для безпечної роботи з лабораторним устаткуванням забезпечено стійке розташування техніки, відсутність перешкод у проходах, наявність вентиляції та доступ до засобів пожежогашіння.

Сухий лід (CO_2 у твердому стані), що використовується як охолоджувач, є потенційно небезпечним компонентом. Його випаровування може призвести до утворення надлишкової концентрації вуглекислого газу, що загрожує кисневим голодуванням.

Щоб працювати було безпечно потрібно використовувати сухий лід лише в добре вентильованих приміщеннях. Також для безпеки працівників потрібно використовувати захисні рукавички при роботі (згідно з НПАОП 0.00-5.05-07) для запобігання обмороження [31]. Також важливо не перевищувати час контакту- не більше 10-15 хв без перерви. Та зберігання сухого льоду в спеціальних термоконтейнерах, не герметичних для газу.

У складі контейнера передбачено наявність температурного датчика та мікроконтролера для контролю температури. Електронні компоненти працюють при живленні 5–12 В, тому не становлять серйозної електротравматичної

небезпеки. Однак, електронні вузли слід розмістити в ізольованому від охолоджувального середовища відсіку. З'єднання повинні мати ступінь захисту не нижче IP54. Та потрібно застосовувати низьковольтні компоненти з подвійною ізоляцією.

У лабораторії використовується лабораторне джерело живлення 12 В та стандартна електромережа 220 В. Для забезпечення електробезпеки реалізовано такі заходи: розміщення джерел у захищених корпусах з ізоляційних матеріалів, виводи з фіксованими з'єднаннями, що унеможливають випадковий контакт, наявність автоматичних вимикачів живлення, система захисного заземлення, дотримання вимог ДСТУ EN 61140:2017 та ДСТУ EN 60204-1:2015 щодо монтажу і експлуатації електроустановок, а також проведення первинного інструктажу з електробезпеки.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Дослідницька частина бакалаврської кваліфікаційної праці робиться в умовах навчальної лабораторії. Тут виконуються проектні роботи, складання дослідного взірця контейнера та випробування його функціональних особливостей, зокрема теплового стану. У зв'язку з цим особливу увагу потрібно надати гігієнічним умовам праці в лабораторії – температурі, вологості, вентиляції, шумовому навантаженню, освітленню та іншим виробничим факторам.

4.2.1 Мікроклімат

Робочим простором є закрите лабораторне приміщення, в якому перебуває один-два працівники. Робота належить до категорії Ia – легка фізична, згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [32]. У таких умовах нормовані параметри мікроклімату мають відповідати значенням, наведеним у таблиці 4.1:

Таблиця 4.1 Нормативні параметри мікроклімату.

Період року	Температура, °C	Вологість, %	Швидкість повітря, м/с
Холодний	21-23	40-60	$\leq 0,1$
Теплий	22-25	40-60	$\leq 0,2$

Установлено витяжну вентиляцію, а також побутовий кондиціонер для підтримки мікроклімату.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

При випаровуванні сухого льоду в повітря робочої зони виділяється CO_2 , який при надмірній концентрації є шкідливим. Згідно з ДСН 3.3.6.096-2002, гранично допустима концентрація вуглекислого газу становить:

- **Максимально разова (ГДК_{мр})** – 0,9 % або 9000 мг/м³
- **Середньозмінна (ГДК_{сз})** – 0,5 % або 5000 мг/м³

Для запобігання перевищенню цих рівнів у лабораторії організовано ефективну витяжну вентиляцію, а робота з сухим льодом здійснюється у витяжній шафі. Крім того, час безперервного контакту з відкритим сухим льодом обмежено до 10–15 хвилин, а його зберігання проводиться в негерметичних ємностях, що дозволяє вивільненому газу рівномірно розсіюватися у просторі без утворення небезпечних локальних концентрацій [33].

Ще одним фактором, що може впливати на повітряне середовище, є наявність дрібнодисперсного пилу. Пил може утворюватися при розпакуванні або механічній обробці полімерних матеріалів, а також при демонтажі тимчасових конструкцій чи транспортуванні обладнання. У звичайному режимі експлуатації рівень запиленості не перевищує нормативні показники, однак при виникненні пилових робіт рекомендується проводити їх із використанням місцевої витяжки, у респіраторі або з періодичним провітрюванням приміщення. Загальний рівень запиленості контролюється шляхом вологого прибирання та регулярного провітрювання приміщення.

Таким чином, контроль складу повітря робочої зони є необхідною умовою безпечного виконання досліджень і забезпечується комплексом технічних та організаційних заходів.

4.2.3 Виробниче освітлення

Категорія роботи з монтажу та паяння електроніки належить до точних зорових робіт високої точності, що відноситься до категорії робіт IVб за ДБН В.2.5-28:2018 [34]. Для таких робіт нормативна освітленість на робочій поверхні має бути не меншою за 500 лк. У лабораторії використовується комбінована система освітлення: загальне та локальне освітлення, що дозволяє рівномірно розподілити світловий потік по всій площі робочих столів і уникнути тіней.

Загальне освітлення забезпечується світлодіодними світильниками з колірною температурою 4000–5000 К та індексом кольоропередачі $R_a \geq 80$, що відповідає вимогам до природного сприйняття кольору при роботі з дрібними електронними компонентами. Світильники рівномірно розміщені на стелі, а їх розсіювачі знижують пряме осліплення. Локальне освітлення здійснюється за допомогою настільних LED-ламп з регульованим нахилом, що дозволяє точково освітлювати зону паяння або зчитування показників на дисплеях.

Природне освітлення також відіграє важливу роль: у лабораторії встановлені вікна з прозорими склопакетами, які забезпечують достатній рівень денного світла. Коефіцієнт природної освітленості (КПО) у робочій зоні становить не менше 1,5 %, що відповідає нормативу для навчальних та лабораторних приміщень.

Загалом, виробниче освітлення у лабораторії відповідає вимогам санітарно-гігієнічних норм, створює зручні умови для роботи з дрібними деталями та сприяє зниженню втоми зору під час тривалої зосередженої праці.

4.2.4 Виробничий шум та вібрації

У лабораторних умовах, де здійснюється складання та тестування контейнера, на працівника діє низький рівень виробничого шуму, що створюється переважно вентиляторами охолодження, блоками живлення та лабораторними електронними приладами. Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99, для приміщень з виконанням розумової праці та робіт, що потребують концентрації

уваги, гранично допустимий рівень шуму не повинен перевищувати 50 Дба [35]. Заміряні значення в лабораторії становлять 40–45 дБА, що відповідає нормі. Щоб зменшити рівень шуму, вентилятори закріплено на м'яких прокладках, які знижують вібрацію, а корпуси пристроїв зроблені зі спеціальних матеріалів, що не пропускають шум назовні.

Вібрації в лабораторії теж незначні. Їх спричиняють ті ж вентилятори, що й шум. Усі пристрої стоять на важких столах, які добре поглинають коливання. Крім того, обладнання, що може трохи вібрувати, розміщене не поруч із працівником. Тому вібрації майже не відчуються і не заважають працювати. Умови залишаються комфортними та безпечними.

4.2.5 Виробничі випромінювання

У лабораторії працівники можуть піддаватися дії слабких електромагнітних полів. Таке випромінювання створюють різні пристрої: дисплеї, мікроконтролери, блоки живлення, модулі Wi-Fi або Bluetooth, осцилографи, паяльні станції, світлодіодні лампи та комп'ютерна техніка.

За нормами ДСНіП 3.3.6.096-2002, безпечний рівень електромагнітного випромінювання в діапазоні частот 30–300 МГц не повинен перевищувати 10 В/м. Вимірювання в лабораторії показують, що рівень випромінювання не перевищує 2 В/м — це значно нижче граничних значень [36].

Щоб зменшити дію ЕМВ на людину, всі дроти в лабораторії мають надійну ізоляцію, а прилади розміщують не ближче ніж на 50 см від голови працівника.

Крім того, працівники щогодини роблять перерви, щоб зменшити навантаження на зір і нервову систему. Усе це допомагає зробити умови роботи безпечними і комфортними.

4.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека є важливою складовою безпечної організації роботи з електронними пристроями та обладнанням, особливо в умовах лабораторій, де використовуються електромережі, полімерні матеріали та джерела тепла. Під час роботи над дипломним проєктом було враховано всі чинники, які можуть

спричинити займання: це коротке замикання, перегрів, іскріння, використання горючих матеріалів. Усі заходи щодо запобігання пожежі спрямовані на усунення цих ризиків шляхом технічного облаштування приміщення, вибору конструкційних матеріалів і дотримання правил експлуатації обладнання.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Навчальна лабораторія, у якій проводяться випробування контейнера для транспортування донорської нирки, належить до категорії В за пожежною небезпекою, а клас зони — П-Па згідно з ДБН В.1.1-7:2016 [37]. Основними джерелами потенційного займання є коротке замикання, перегрів електроніки, іскріння контактів, а також наявність горючих полімерних матеріалів і сухого льоду, що може спричинити підвищення тиску в замкнутому просторі.

Для запобігання виникненню пожежі в лабораторії впроваджено низку заходів. Усі електронні пристрої розміщуються в герметичних корпусах із негорючих або важкогорючих матеріалів. Прокладка кабелів виконана з урахуванням електричної безпеки, кабелі мають ізоляцію, стійку до нагрівання. Робоче місце оснащено кнопкою аварійного вимкнення електроживлення.

Відповідно до НПАОП 0.00-1.36-03, у лабораторії повинні бути вогнегасники з розрахунку один на кожні 20 м² площі. Оскільки площа лабораторії становить близько 40 м², необхідно встановити два вогнегасники. Рекомендовано використовувати вуглекислотні вогнегасники (наприклад, ВВК-2 або ВВК-5), які придатні для гасіння електрообладнання, оскільки не залишають слідів та не проводять струм[38].

У приміщенні також наявна система пожежної сигналізації, розроблено та вивішено план евакуації. Всі евакуаційні виходи позначені і відкриті для вільного доступу. Працівники та студенти проходять первинний інструктаж з пожежної безпеки, ознайомлені з інструкцією користування первинними засобами пожежогасіння та правилами поведінки при пожежі.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Конструкція контейнера для транспортування донорської нирки розроблена з урахуванням вимог пожежної безпеки, оскільки його

використання пов'язане з електронними компонентами, джерелами холоду (сухим льодом) та елементами корпусу з полімерних матеріалів.

Основним матеріалом корпусу є поліпропілен, який за класифікацією ДСТУ 8829:2019 належить до матеріалів помірної горючості (Г2–Г3). Щоб зменшити ризик займання, внутрішні поверхні контейнера обробляються вогнезахисними просоченнями, які знижують ймовірність займання у разі перегріву або короткого замикання електроніки [39].

Електронні компоненти контейнера — мікроконтролер, датчики температури, модулі зв'язку — розміщуються в окремому ізольованому відсіку, відділеному від відсіку з сухим льодом. Це зменшує вплив конденсату та можливість короткого замикання.

Джерело холоду (сухий лід) при зберіганні може виділяти велику кількість вуглекислого газу, що може спричинити підвищення тиску всередині контейнера. Щоб запобігти розгерметизації або вибуху, у конструкції передбачено вентиляційні клапани або розривні мембрани, які автоматично відкриваються при перевищенні допустимого тиску.

Додатково, всі з'єднання та елементи корпусу виготовлені з матеріалів, які не підтримують горіння або мають властивість самозагасання. Наявність теплоізоляції між електронікою та джерелом холоду також знижує пожежну небезпеку.

Отже, конструкція контейнера відповідає вимогам безпечної експлуатації і має достатній рівень пожежної безпеки завдяки вибору матеріалів, зонуванню функціональних блоків та застосуванню спеціальних інженерних рішень.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було розроблено контейнер для транспортування донорської нирки, який забезпечує необхідні умови збереження органа до моменту пересадки. Робота включала теоретичне обґрунтування вимог до транспортування, аналіз існуючих рішень та створення власної конструкції із сенсорною системою моніторингу.

Сформовано технічні вимоги до контейнера на основі вивчення медичних протоколів та нормативів. Запропонована конструкція містить ефективну теплоізоляцію, резервуар для сухого льоду, клапан скидання тиску та цифрові індикатори. Розрахунки показали, що кількість холодоагенту, необхідного для підтримання температури, є мінімальною, що свідчить про енергоефективність системи.

Модель реалізовано в середовищі SolidWorks із урахуванням вимог ергономіки та гігієни. Особливу увагу приділено сенсорній системі на базі ESP32, яка виконує моніторинг температури, вологості, тиску, вібрацій, координат та фіксацію відкриття кришки. Це значно підвищує надійність і контрольованість процесу транспортування.

Окремо проаналізовано питання охорони праці, гігієни та пожежної безпеки. Розроблене рішення є технічно обґрунтованим, функціональним і придатним до практичного впровадження у сфері медичної логістики та трансплантології.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трансплантація нирки:
<https://www.kidneyeducation.com/Ukrainian/Трансплантація-нирки/1081>
2. Денісов В. К. Трансплантологія / В. К. Денісов. – К. : Наукова. Думка, 1998. —248 с.
3. https://uk.wikipedia.org/wiki/Трансплантація_нирки
4. Лісовий В.М., Андон'єва Н.М. Актуальні питання трансплантації нирки : навч. посібник для лікарівінтернів. – Харків : ХНМУ, 2013. – 184 с
5. Bickford R.G Winton F.R Renal function in the isolated perfused Kidney, 1968, 1257-1265 p
6. Guibert E.E., Petrenko A.Y., Balaban C.L. et al. *Organ Preservation: Current Concepts and New Strategies for the Next Decade*. Transfus Med Hemother. 2011;38(2):125–142.
7. Toubanc B., et al. *Organ preservation with biocompatible gels: a novel approach*. Artificial Organs. 2015;39(4):E70–E78.
8. Directive 2010/53/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010 on standards of quality and safety of human organs intended for transplantation.
9. WHO Guiding Principles on Human Cell, Tissue and Organ Transplantation. — World Health Organization, 2010.
10. Закон України № 2427-VIII від 17.05.2018 «Про застосування трансплантації анатомічних матеріалів людині».
11. Наказ МОЗ України № 756 від 31.12.2020 «Про затвердження Порядку транспортування анатомічних матеріалів людини».
12. Введение в биоэтику . Ред. Б.Г. Юдин, П.Д. Тищенко. М.1998
13. Organ Care System [Internet]. <http://www.transmedics.com>. 2021 [cited 2021 march 29]. Available from: <https://www.transmedics.com/ocs-hcp/>
14. «Сухой лед»: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://4ipho.ru/data/documents/exp10-2.pdf>.

- 15.Шумаков В.И., Штенгольд Е.Ш., Онищенко Н.А. Консервация органов.
М.: Медицина, 1975. — 252 с. (Исследование А.Д Дрогайцева і О.І Горбатова).
- 16.Готьє С.В., Хомяков С.М., Арзуманов С.В., Астраков С.В.
Трансплантация почки/ Национальные клинические рекомендации 2013.
—17 с.
- 17.ДСТУ ISO 80601-2-56:2016 Медичне електричне обладнання. Частина 2-
56. Особливі вимоги безпеки до клінічних термометрів для вимірювання
температури тіла людини.
- 18.ISO 15189:2022. Медичні лабораторії. Вимоги до якості та
компетентності.
- 19.Плахотник О.В., Савченко М.В. Системи транспортування і зберігання
донорських органів. – Київ: Медицина, 2020.
- 20.Інструкція з використання сенсорів DS18B20, DHT22, MPU6050,
BMP280, NEO-6M на платформі Arduino / ESP32 [електронний ресурс].
- 21.Матеріали навчального посібника з трансплантації НМАПО імені П. Л.
Шупика. – Київ, 2021.
- 22.Протоколи транспортування донорських органів МОЗ України, 2019.
- 23.ДБН В.2.5-23:2010 Системи електропостачання. Норми проектування.
24. Датчик температури DS18B20: [https://www.mini-tech.com.ua/datchik-](https://www.mini-tech.com.ua/datchik-temperature-ds18b20)
[temperature-ds18b20](#)
- 25.Датчик температури та вологості DHT22: [https://www.mini-](https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-temperature-i-vlazhnosti-dht22#:~:text=%D0%94%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA%20DHT22%2FAM2302%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%83%D1%94%D1%82%D1%8C%D1%81%D1%8F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F,%D0%B7%20Arduino%20%D1%96%D1%81%D0%BD%D1%83%D1%8E%D1%82%D1%8C%20%D0%B3%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%96%)
[tech.com.ua/ua/datchik-temperature-i-vlazhnosti-](#)
[dht22#:~:text=%D0%94%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA%](#)
[20DHT22%2FAM2302%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D1%8](#)
[0%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%83%D1%94%D1%](#)
[82%D1%8C%D1%81%D1%8F%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F,%D0%B7](#)
[%20Arduino%20%D1%96%D1%81%D0%BD%D1%83%D1%8E%D1%82](#)
[%D1%8C%20%D0%B3%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%96%](#)

[20%D0%B1%D1%96%D0%B1%D0%BB%D1%96%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BA%D0%B8.](#)

26. Акселерометр і гіроскоп MPU-6050: https://arduino.ua/ru/prod512-akselerometr-i-giroskop-mpu-6050-modul-6dof?srsltid=AfmBOooGndjBbBPa5_c37GS5cMqojAZvvyqg6Idu_2Pr0GnhKON0Ydss
27. Датчик атмосферного тиску BMP280: <https://www.mini-tech.com.ua/barometr-termometr-bmp280>
28. GPS-модуль NEO-6M: <https://www.mini-tech.com.ua/gps-priemnik-gy-gps6mv2>
29. Модуль реального часу DS3231 (RTC): <https://myproject.com.ua/ru/chasy-realnogo-vremeni-ds3231-ru.html#:~:text=DS3231%20%2D%D1%8D%D1%82%D0%BE%20%D0%B2%D1%8B%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D1%8B%D0%B9%20%D0%B8%20%D0%BD%D0%B8%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9,%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BF%D0%B8%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%2C%20%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%BA%D0%B5%20%D0%B1%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%B5%D0%B8.>
30. ДСТУ 8604:2015. Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги.
31. НПАОП 0.00-5.05-07. Загальні правила безпеки при використанні холодоагентів (у т.ч. сухого льоду).
32. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
33. ДСНіП 3.3.6.096-2002. Норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

- 34.ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
- 35.ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
- 36.ДСНіП 3.3.6.096-2002. Норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.
- 37.ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
- 38.НПАОП 0.00-1.36-03. Правила пожежної безпеки в Україні.
- 39.ДСТУ 8829:2019. Матеріали будівельні. Метод визначення груп горючості.

ДОДАТКИ

Додаток А

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

1. Схема з'єднання для ESP32 (I2C та інші інтерфейси)

Підключення сенсорів:

Компонент	Інтерфейс	Піни ESP3	Живлення
BME280 (темп., вологість, тиск)	I2C	SDA -> GPIO21, SCL -> GPIO22	3.3V
MPU6050 (акселерометр для ударів)	I2C	SDA -> GPIO21, SCL -> GPIO22	3.3V
GPS NEO-6M	UART	TX -> GPIO16, RX -> GPIO17	3.3V
OLED 128x64 (опц.)	I2C	SDA -> GPIO21, SCL -> GPIO22	3.3V

Код MicroPython

```

from machine import Pin, I2C, UART
import time
import bme280
from mpu6050 import MPU6050
import ujson

# I2C
i2c = I2C(0, scl=Pin(22), sda=Pin(21))
bme = bme280.BME280(i2c=i2c)
mpu = MPU6050(i2c)

# GPS
uart = UART(2, baudrate=9600, tx=Pin(17), rx=Pin(16))

# Читання даних з GPS
def read_gps():
    if uart.any():
        line = uart.readline()
        if line and b'GPGGA' in line:
            return line.decode().strip()
    return "No GPS"

while True:
    # BME280: темп, тиск, вологість
    temp, pres, hum = bme.read_compensated_data()

    # MPU6050: акселерометр
    accel = mpu.get_values()

    # GPS
    gps_data = read_gps()

    # Вивід
    print(ujson.dumps({
        "temp": temp / 100,
        "humidity": hum / 1024,
        "pressure": pres / 25600,
        "accel_x": accel["AcX"],
        "accel_y": accel["AcY"],
        "accel_z": accel["AcZ"],
        "gps": gps_data
    }))

    time.sleep(2)

```



Рис А.1. – Портативний термостатичний контейнер КОНТТЕРМ 12-01



Рисунок А.2 – Криогенні контейнери серії GT фірми Cryopal - Air Liquide DMC



Рисунок А.3 – Медична сумка-контейнер ЭЛЬФИ

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Контейнер для транспортування донорської нирки

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 1,96 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

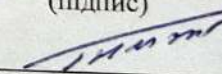
- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

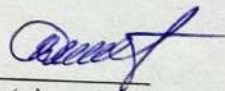
Коваль Л. Г., завідувач кафедри БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

Тимчик С. В., гарант ОПП «Біомедична інженерія»
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

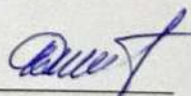
Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Штофель Д. Х.
(прізвище, ініціали)

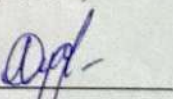
З висновком експертної комісії ознайомлені:

Керівник


(підпис)

Штофель Д. Х., доц. каф. БМІОЕС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач


(підпис)

Лелека О. В.
(прізвище, ініціали)