

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і
робототехніки**

Кафедра автомобілів і транспортних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

освітнього ступеня

бакалавр

Галузь знань 27 – «Транспорт»

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

на тему: «Мобільна воднева заправна станція»

Виконав: студент групи ААГ – 23



Микола КОСТЕНКО

Керівник:



Руслана КОЛОДНИЦЬКА

Завідувач кафедри:



Володимир ШУМЛЯКІВСЬКИЙ

Рецензент:



Олександр Тимощенко

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет: комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і
робототехніки

Кафедра: автомобілів і транспортних технологій

Освітній ступінь: «бакалавр»

Галузь знань: 27 «Транспорт»

Спеціальність: 274 – Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри А і ТТ

Володимир
ШУМЛЯКІВСЬКИЙ

« 01 » 06 2025р.

З А В Д А Н Н Я

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня бакалавр

Костенка Миколи Вікторовича

1. Тема роботи: «Мобільна воднева заправна станція» затверджена наказом вищого навчального закладу від «29» травня 2025 року № 212/с

Керівник роботи: Руслана Колодницька

2. Строк подання студентом завершеної роботи 04.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: довідникова література, нормативно-правові документи, інтернет ресурси.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): огляд літератури, конструкторський розділ, технологічний розділ, розділ безпеки, економічний розділ, список використаних джерел.

5. Пояснювально - роздавальний матеріал (презентація) – 15 слайдів.

Дата видачі завдання « 20 » 06 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Огляд літератури	17.02.2025	✓
2.	Конструкторський розділ	24.02.2025	✓
3.	Технологічний розділ	08.03.2025	✓
4.	Розділ безпеки	22.03.2025	✓
5.	Економічний розділ	25.05.2025	✓
6.	Оформлення пояснювальної записки	26.05.2025	✓
7.	Рецензування	01.06.2025	✓
8.	Захист	07-30.06.2025	

Студент



Микола КОСТЕНКО

Керівник роботи



Руслана КОЛОДНИЦЬКА

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
Розділ 1. Огляд літератури	5
Розділ 2. Конструкторський розділ мобільної водневої заправної станції	11
2.1. Вибір мобільної водневої заправної станції.....	11
2.2. Розробка схеми розміщення обладнання.....	11
2.3. Системи зберігання водню.....	12
2.4. Вибір та обґрунтування базового транспортного засобу для мобільної водневої заправної станції.....	13
2.5. Вибір та обґрунтування 40-футового ISO контейнера для розміщення обладнання МВЗС	17
2.6. Технологічний процес мобільної водневої заправної станції	18
2.7. Обладнання та його характеристики.....	20
2.8. Компонувальна схема розташування обладнання МВЗС	22
2.9 Загальний вигляд мобільної водневої заправної станції.....	23
2.10. Розрахунок міцності елементів кріплення модуля водневих резервуарів	24
2.10.1 Вихідні дані та прийняті припущення	25
2.10.2. Порядок та результати розрахунку	26
2.13. Загальні конструктивні зміни та експлуатаційні характеристики МВЗС.....	28
Розділ 3. Розрахунок технологічного обладнання та процесів	31
3.1. Розрахунок об'єму резервуарів для водню	31
3.2. Розрахунок потужності компресорів	31
3.3. Розрахунок охолоджувачів.....	32
3.4. Розрахунок центру мас (ЦМ) завантаженого напівпричепа МВЗС.....	32
3.5. Стійкість та прохідність автомобіля	35
Розділ 4. Безпека мобільного водневої заправної станції	39
4.1. Основні властивості водню та пов'язані з ними ризики	39
4.2. Нормативно-правова база та стандарти безпеки	40
4.3. Конструктивні заходи безпеки МВЗС	41
4.4. Безпека під час транспортування водню	43
4.5. Безпека під час заправки воднем.....	43

4.6. Організаційні та операційні заходи безпеки	44
4.7. Безпека мобільної водневої заправної станції при ДТП.....	45
4.7. Типовий маршрут транспортування водню та його безпекове обґрунтування.....	47
Розділ 5. Економічне обґрунтування та оцінка ефективності проекту	53
5.1. Інвестиційні витрати.....	53
5.2. Операційні витрати	54
5.3. Прогноз прибутку	54
5.4. Час окупності.....	54
5.5. Розрахунок витрат на обслуговування та експлуатацію.....	55
5.6. Прогнозований прибуток	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

ВСТУП

Сучасний світ активно переходить на екологічно чисті технології, що сприяють зменшенню викидів шкідливих речовин у довкілля. Одним із перспективних напрямів є використання водню як альтернативного пального для транспорту. Водневі технології забезпечують високу енергоефективність та екологічну безпеку, що робить їх ключовим елементом майбутньої транспортної інфраструктури [16,20,22].

Актуальність даної роботи полягає у необхідності створення універсального мобільного комплексу для транспортування та заправки воднем автомобілів різних типів. Такий підхід дозволяє вирішити проблему відсутності стаціонарної інфраструктури для заправки водневих транспортних засобів, що значно розширює можливості використання водневого пального [22].

Мета: Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка концепції мобільної водневої заправної станції на базі вантажного автомобіля, який забезпечить ефективне транспортування та заправку воднем, водневих транспортних засобів.

Для досягнення поставленої мети передбачається виконати такі завдання:

- Аналіз існуючих мобільних водневих заправних станцій та визначення їхніх основних характеристик;
- Вибір оптимального вантажного автомобіля для переобладнання під мобільну заправну станцію;
- Розробка технічної концепції системи зберігання, транспортування та видачі водню;
- Розрахунок необхідних параметрів установки та вибір обладнання;
- Оцінка економічної доцільності реалізації проекту.

Дана робота спирається на наукові дослідження, нормативно-правові акти, а також технічну документацію з проектування водневих систем. Особлива увага приділяється безпечному використанню водневого пального та методам його транспортування. Таким чином, реалізація проекту мобільного водневого заправного комплексу дозволить забезпечити більш гнучке використання водневого транспорту та сприятиме розвитку екологічно чистої транспортної інфраструктури. У вступі обґрунтовано актуальність створення мобільного водневого заправного комплексу як відповіді на потребу в гнучкій інфраструктурі для водневого транспорту. Визначено мету та завдання роботи, що охоплюють аналіз, проектування, розрахунки та економічне обґрунтування проекту.

Розділ 1. Огляд літератури

Сучасний стан водневої інфраструктури у світі та Україні представлений мережею як стаціонарних, так і мобільних заправних станцій. Країни з розвиненою економікою, зокрема Німеччина, Японія, Південна Корея та США, активно розширюють свою водневу інфраструктуру, запроваджуючи державні програми підтримки та фінансування. В Україні водневі технології перебувають на етапі становлення, проте вже розробляються стратегічні плани розвитку цього сектору. Водень – це безбарвний, легкий газ, який може стати основним енергетичним носієм у майбутньому завдяки своїй високій енергетичній щільності за масою. Це означає, що водень здатний забезпечити значну кількість енергії при малому обсязі матеріалу, однак при зберіганні його в газоподібному стані виникають складнощі через низьку щільність за об'ємом. Для транспортування водню його часто стискають або зберігають у рідкому вигляді при дуже низьких температурах [17].

Водень має значну перевагу перед традиційними енергетичними носіями, оскільки його використання не призводить до викидів шкідливих газів або вуглекислого газу [16,20]. У паливних елементах водень реагує з киснем, утворюючи воду, і вивільняючи значну кількість енергії, що робить його ідеальним для використання в якості палива для транспорту та інших мобільних систем [21]. Проте через вибухонебезпечні властивості водню в разі його змішування з повітрям, важливим аспектом є впровадження спеціальних систем для контролю витоків та безпеки на заправних станціях [9].

Існуючі мобільні водневі заправні станції представлені кількома компаніями, зокрема Air Liquide, Linde, Shell та Nikola, які розробляють автономні модулі для транспортування та заправки воднем автомобілів. Основною перевагою таких рішень є їхня мобільність та можливість розгортання у віддалених районах без розвиненої інфраструктури. Зокрема, компанія Nikola представила водневий мобільний комплекс, здатний заправляти як легкові автомобілі, так і вантажний транспорт.

Одним із перспективних рішень у сфері мобільних водневих заправних станцій є розробки компанії Huvia, спільного підприємства Renault Group та Plug Power. Huvia спеціалізується на створенні водневих технологій для комерційного транспорту та вже представила прототипи мобільних водневих заправних станцій на базі Renault Master. Ці комплекси оснащені резервуарами високого тиску, компресійними системами та модулями швидкої заправки, що робить їх ефективними та придатними для використання в міських умовах. Завдяки своїм розробкам Huvia сприяє прискоренню впровадження водневого транспорту, надаючи екологічно чисте рішення для мобільної інфраструктури заправки.

Технології зберігання та транспортування водню включають використання високотискових балонів, криогенних резервуарів та металогідридних систем. Сучасні мобільні водневі заправні станції здебільшого використовують компресійні методи, що дозволяють забезпечити збереження водню під тиском понад 350-700 бар. Також розглядаються перспективні рішення із зберігання водню у рідкому стані, що зменшує об'єм необхідного резервуара.

Огляд літератури та аналіз існуючих рішень свідчить про необхідність розробки універсального мобільного комплексу, здатного забезпечити автономну заправку широкого спектру водневих транспортних засобів. На рис. 1.1. показано Renault Master як база автомобіля концепту HIVIA, та на рис. 1.2. показано концепцію HIVIA.



Рис. 1.1. - Renault Master як база автомобіля концепту HYVIA

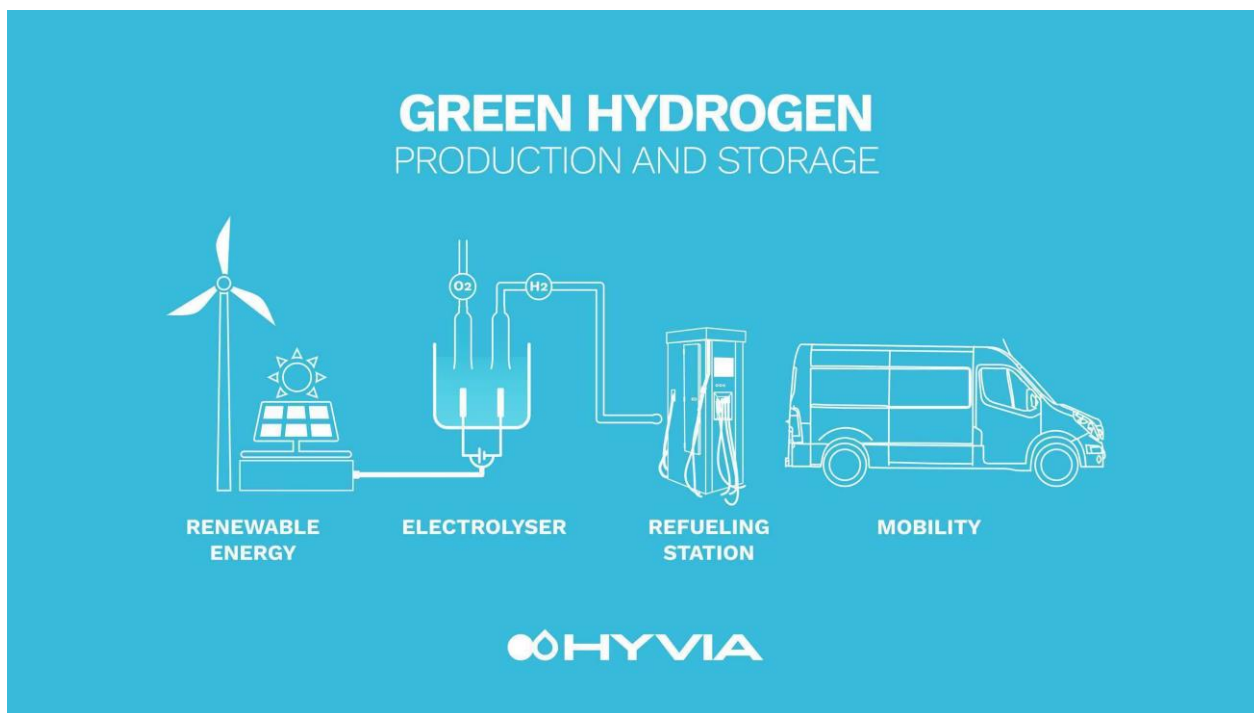


Рис. 1.2. - Концепція HYVIA

Також було досліджено мобільні водневі заправні станції, особливу увагу привернули дві роботи, які ретельно проаналізовані. Це був звіт про "Інноваційну вдосконалену мобільну водневу паливозаправну установку" (АНМФ) та фінальний звіт про "Мобільний водневий заправник" від Каліфорнійської енергетичної комісії/Gas Technology Institute. Цей аналіз дозволив мені краще зрозуміти існуючі підходи та підтвердити деякі мої власні інженерні рішення [32,33].

Аналіз почався з "Інноваційної вдосконаленої мобільної водневої паливозаправної установки", яка зображена на рис. 1.3 (АНМФ), яку я вивчав за матеріалами. Як видно з описання станції вона виглядає як досить компактна, самодостатня одиниця, що базується на причепі. Візуально вона має сучасний, інтегрований дизайн, де всі компоненти гармонійно вписані в корпус причепа, що робить її візуально досить акуратною та продуманою. Основний акцент тут зроблено на тому, що це "повнофункціональна" мобільна станція, яка розроблялася з нуля для вирішення проблем з інфраструктурою та зберіганням водню. Хоча конкретних числових характеристик, таких як об'єм заправки чи швидкість, у цьому документі не так багато, сама концепція "мобільної заправки" та її акцент на дизайні та інтеграції були дуже цінними [32].

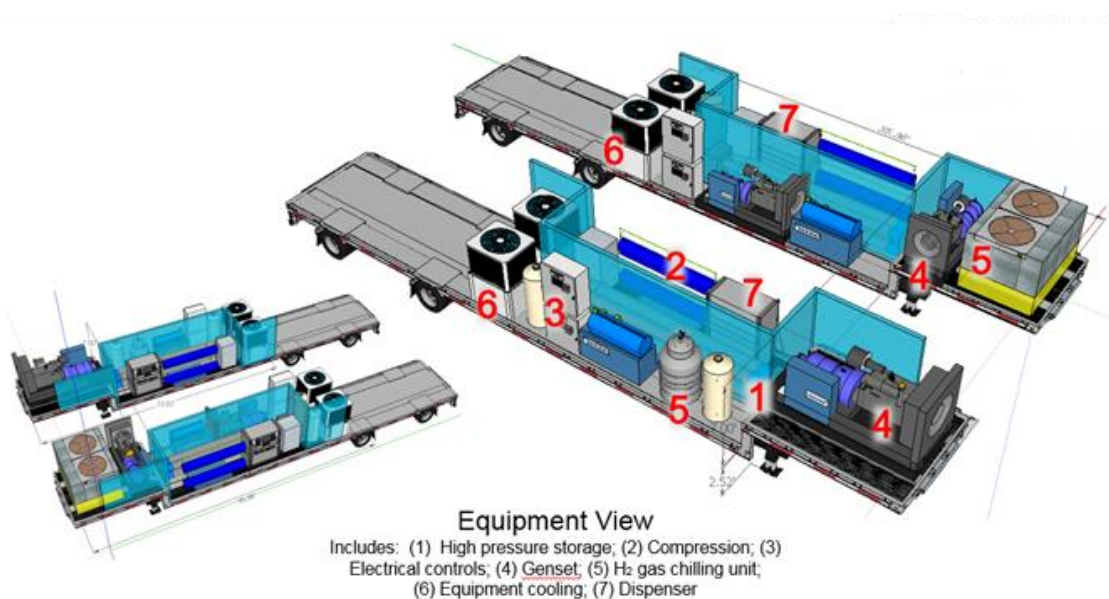


Рис. 1.3. - Інноваційна вдосконалена мобільна воднева паливозаправна установка" (АНМФ).

Про "Мобільний водневий заправник" від Каліфорнійської енергетичної комісії, який показаний на рис. 1.4. Ця робота виявилася дуже інформативною, адже тут були представлені конкретні технічні деталі. Станція також реалізована на базі 40-футового напівпричепа. Це досить велика платформа, що дає значний простір для розміщення всього необхідного обладнання. Що стосується компонентів, вона використовує шість композитних баків типу 3 для зберігання водню, що забезпечує значний об'єм для заправки. Компресійна система побудована на основі діафрагмового компресора, а для підтримки оптимальної температури водню під час заправки використовується охолоджувач. Для автономної роботи станція обладнана бортовим дизельним генератором, що є важливим для її незалежності від зовнішніх джерел живлення. Інформація про продуктивність: ця станція здатна видавати до 350 кг водню на день при тиску 350 або 700 бар, що повністю відповідає потребам сучасних водневих автомобілів. Її зовнішній вигляд, як я побачив на фотографіях, демонструє практичний, промисловий підхід до розміщення обладнання на відкритій платформі [33].

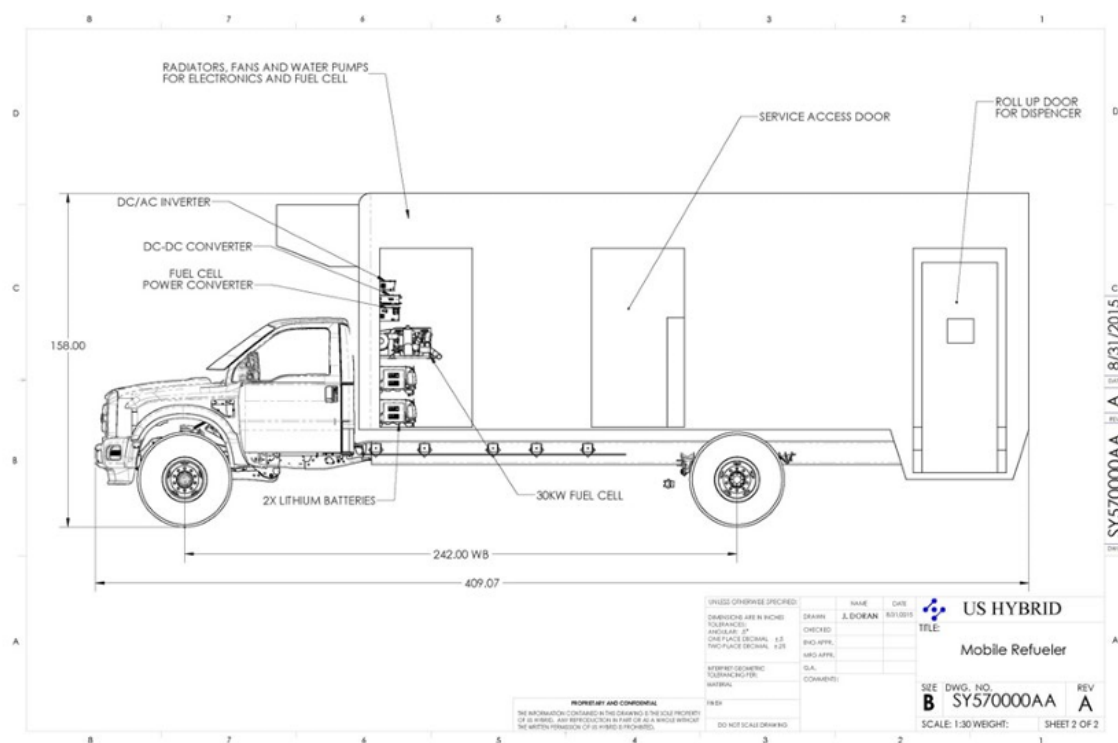


Рис. 1.4. - Мобільний водневий заправник

Аналізуючи ці дві роботи, можна зробити такі висновки. По-перше, обидва приклади підтверджують ефективність та логічність використання напівпричепів як базової платформи для створення мобільних водневих станцій. Це дає достатньо місця для розміщення всього обладнання та забезпечує необхідну мобільність. По-друге самодостатність з власним джерелом живлення (як-от дизель-генератор) є ключовим аспектом, який забезпечує гнучкість розгортання таких станцій у будь-якій локації. Щодо компонентів, використання композитних баків високого тиску та наявність системи попереднього охолодження водню до заправки.

Висновки до 1 розділу

У даному розділі проведено аналіз сучасного стану водневої інфраструктури у світі та Україні, що підкреслило актуальність розробки мобільних рішень для заправки водневих транспортних засобів. Детально розглянуто фізико-хімічні властивості водню, його енергетичну цінність, а також потенційні ризики, пов'язані з його вибухонебезпечністю. Проаналізовано існуючі мобільні водневі заправні станції від провідних світових виробників, а також досліджені технології зберігання та транспортування водню. Визначено, що для подальшого розвитку водневого транспорту необхідний універсальний мобільний комплекс, здатний забезпечити автономну та безпечну заправку різноманітних транспортних засобів, що є основою для подальшої розробки.

Розділ 2. Конструкторський розділ мобільної водневої заправної станції

Цей розділ присвячений конструктивній розробці мобільної водневої заправної станції, представленої у вигляді сідлового тягача та спеціалізованого контейнеру. Тут детально описано вибір базового транспортного засобу, компоновку основного обладнання, а також надано креслення, що ілюструють проектне рішення.

2.1. Вибір мобільної водневої заправної станції

Вибір базового транспортного засобу для створення мобільної заправної станції одним із важливих етапів [23]. Зазвичай для цієї мети використовуються вантажівки або напівпричепи, які можуть забезпечити достатню вантажопідйомність та стабільність при русі. Наприклад, використання вантажного фургона або контейнера з спеціалізованою конструкцією дозволяє розмістити необхідне обладнання та забезпечити максимальну ефективність при транспортуванні водню [23].

При виборі транспортного засобу необхідно враховувати кілька критеріїв:

1. Місткість: вантажопідйомність має бути достатньою для розміщення усіх необхідних елементів мобільної заправки, включаючи резервуари для зберігання водню, компресори та дозатори.
2. Технічні характеристики: для вантажівки має бути забезпечена потужність двигуна, що дозволить працювати з великими навантаженнями, зокрема при транспортуванні великої кількості водню на великі відстані [23].
3. Безпека: транспортний засіб повинен мати підвищену стійкість до різних впливів, таких як високі температури, вібрація та інші, що можуть впливати на безпеку перевезення водню [4, 9].

2.2. Розробка схеми розміщення обладнання

Однією з ключових задач при проектуванні мобільної водневої заправки є розміщення основних елементів комплексу на транспортному засобі. Які, включають в себе:

- Резервуари для зберігання водню. Вони мають бути встановлені на платформі з урахуванням рівномірного розподілу ваги для забезпечення стійкості транспортного засобу під час руху [7,19].

- Компресори для закачування водню під високим тиском у транспортні засоби. Зазначені елементи повинні бути компактними, але потужними, аби забезпечити швидкий процес заправки [13].

- Системи безпеки, такі як датчики витоків водню, автоматичні клапани, системи гасіння вогню тощо. Їх треба розмістити таким чином, щоб вони не заважали експлуатації, але водночас були доступні для швидкого обслуговування [15].

Планування розташування обладнання повинно враховувати не лише технічні характеристики, а й умови експлуатації, оскільки заправні станції повинні працювати в умовах високих навантажень та забезпечувати безпечний доступ до всіх основних компонентів у разі виникнення неполадок.

2.3. Системи зберігання водню

Процес заправки водневих транспортних засобів включає кілька основних технологій, які спрямовані на зберігання водню в компактному і безпечному вигляді. Одним з найбільш розповсюджених методів є використання високого тиску (350-700 бар), де водень зберігається у газоподібному стані в спеціальних балонах [7,19]. Цей метод дозволяє забезпечити достатню щільність зберігання та швидкість заправки, що важливо для комерційних заправних станцій. Однак необхідно враховувати, що стиснення водню потребує значних енергетичних затрат.

Іншим методом є кріогенне зберігання, при якому водень зберігається в рідкому вигляді при дуже низьких температурах (близько -253°C) [17]. Цей метод дозволяє зберігати водень з високою щільністю, що зручно для великих заправних станцій або транспортування водню на великі відстані. Проте кріогенне зберігання вимагає складних систем охолодження, що збільшує вартість інфраструктури.

Металогідриди також використовуються для зберігання водню у твердому стані. Цей метод є більш безпечним, оскільки водень зберігається в стабільному, нетоксичному стані, однак наразі ця технологія ще не стала достатньо ефективною для широкого впровадження, через високу вартість і низьку енергетичну ефективність у порівнянні з іншими методами.

Заправка водневих автомобілів зазвичай триває не більше 5 хвилин, що робить цей процес швидким і зручним для користувачів [10]. Однак важливим аспектом є наявність необхідної інфраструктури для підтримки безпечного зберігання та транспортування водню.

2.4. Вибір та обґрунтування базового транспортного засобу для мобільної водневої заправної станції

Вибір базового транспортного засобу критично важливий для проекту мобільної водневої заправної станції (МВЗС). Він визначає ефективність транспортування обладнання та безпеку перевезення небезпечних вантажів. Водень, класифікований за ADR ДОПНВ як займистий газ (клас 2.1), вимагає, щоб транспортні засоби відповідали суворим вимогам Частини 9 ДОПНВ, які показані в таблиці 2.1 [4]. Для реалізації концепції МВЗС обрано вантажний автомобіль Scania P250 (конфігурація 4x2) із жорсткою рамою, на яку безпосередньо встановлюватиметься 40-футовий контейнер з обладнанням. Обґрунтування вибору Scania P250 як легкої вантажівки. Scania P250 є середньотоннажною вантажівкою, призначеною для розвезення вантажів на короткі та середні відстані. Вона має двовісну конструкцію і може бути обладнана різним спеціальним устаткуванням [24]. Також в таблиці 2.2. показано порівняння Scania P250 з альтернативними жорсткими вантажівками для МВЗС. Вибір Scania P250 пов'язаний наступними перевагами:

Надійність та доступність. Поширеність Scania забезпечує легкість в обслуговуванні, доступність запчастин та високу надійність в експлуатації [24]. Це зменшує ризики простоїв МВЗС. Вантажопідємність Scania P250, як легка вантажівка, здатна перевозити значний вантаж на своєму шасі. Для розміщення 40-футового контейнера з важким водневим обладнанням, що може сягати

значної повної маси, це вимагатиме значного подовження рами та спеціалізованої конструкції шасі. Це впливає на маневреність та розподіл навантажень.

Маневреність. Scania P-series відома своєю маневреністю серед вантажівок свого класу [24]. Це дозволяє експлуатувати МВЗС як на трасах, так і в умовах міських агломерацій. Гнучкість переобладнання Шасі Scania P-series надає основу для монтажу спеціалізованих надбудов [24]. Адаптація для 40-футового контейнера буде вимагати індивідуального проектування та посилення рами.

Таблиця 2.1. - Відповідність Scania P250 вимогам ADR для перевезення небезпечних вантажів

Вимога ADR	Scania P250 (як жорстка вантажівка)	Обґрунтування відповідності
9.2.2 Електрообладнання	Відповідає	Електрообладнання спроектоване для мінімізації іскроутворення та перегріву, що є критичним для займистих газів. Всі ланцюги захищені, а кабелі прокладені безпечно [26].
9.2.3 Гальмове обладнання	Відповідає	Обладнаний антиблокувальною гальмовою системою (ABS) категорії 1, що забезпечує ефективне гальмування та стабільність вантажівки навіть у складних умовах [28].
9.2.1.2 Обмежувач швидкості	Відповідає	Стандартно встановлений обмежувач швидкості до 90 км/год, як це вимагається для транспортних засобів повною масою понад 3,5 тонни, що перевозять небезпечні вантажі [24].
9.2.1 Загальна конструкція	Відповідає (з адаптаціями)	Міцне шасі, розраховане на значні навантаження, може бути посилене та подовжене для розміщення 40-футового контейнера. Забезпечує достатній рівень безпеки та можливість інтеграції систем кріплення вантажу та протипожежного захисту [4].
Додаткові заходи безпеки	Можливе дооснащення	Scania дозволяє інтегрувати додаткові системи, такі як вимикачі маси, додаткові протипожежні засоби, що є важливим для спеціалізованих ADR-перевезень.

Таблиця 2.2. - Порівняння Scania P250 з альтернативними вантажівками для
MB3C

Характеристика	Scania P250 (4x2)	Mercedes-Benz Atego (4x2)	MAN TGL (4x2)	Обґрунтування вибору для MB3C
Тип/Клас ТЗ	Середньотоннажна вантажівка	Середньотоннажна вантажівка	Легка/Середньотоннажна вантажівка	Scania P250 має репутацію надійності та адаптивності, що важливо для спеціалізованого проекту MB3C.
Повна маса ТЗ (типова)	12-18 т (залежить від конфігурації шасі)	6-16 т	7.5-12 т	Scania P250, при відповідній конфігурації шасі, може забезпечити необхідну вантажопідйомність для MB3C.
Потужність двигуна (дизель)	250 к.с.	156-299 к.с.	150-250 к.с.	Потужність Scania P250 є достатньою для перевезення завантаженої MB3C на середні відстані, але для 40-футового контейнера, можливо, бажано більше.
Довжина шасі (типова, без надбудови)	До 7.8 м (залежить від колісної бази)	До 7.5 м (залежить від колісної бази)	До 10 м (залежить від колісної бази)	Для 40-футового контейнера (12.19 м) Scania P250 вимагатиме значного подовження рами та спеціальної конструкції, що є складним інженерним завданням.
Ширина (габаритна)	2.55 м	2.4-2.55 м	~2.5 м	Стандартна габаритна

				ширина, що відповідає дорожнім нормам.
Висота (кабіни/шасі)	~3.3 м	2.3-3.0 м	3.0-3.6 м	Стандартна висота, що не створює додаткових проблем з габаритами автопоїзда.
Надійність та ресурс	Висока, орієнтована на інтенсивну експлуатацію.	Висока.	Хороша.	Scania має репутацію надійності, що є критичним для мобільної станції.
Гнучкість переобладнання	Висока, модульна платформа [24].	Добра.	Добра.	Модульність Scania P-series, навіть як жорсткої вантажівки, спрощує адаптацію шасі під унікальну надбудову.
Загальний висновок	Scania P250 є прийнятним вибором за умови індивідуального подовження та посилення шасі для розміщення 40-футового контейнера, забезпечуючи баланс надійності, маневреності та відповідності ADR.	Більш орієнтований на легші вантажі; для 40-футового контейнера потрібні аналогічні або більші модифікації шасі.	Може запропонувати більшу довжину шасі в деяких конфігураціях, але також вимагатиме значної адаптації.	

Основні характеристики Scania P-Series P250 показані в таблиці 2.3:

Таблиця 2.3. - Основні характеристики Scania P-Series P250

Характеристика	Значення	Одиниця виміру	Примітки / Пояснення
Тип автомобіля	Легка вантажівка середнього класу	–	Оптимальний вибір для переобладнання під MB3C
Двигун	Дизельний/HVO	–	Потужність 250 к.с.
Колісна формула	4x2	–	Дві осі, привід на одну вісь
Тип кузова	Шасі	–	База для встановлення спеціалізованого обладнання
Максимальна вантажопідйомність	До 7 тонн	тонн	Залежить від конфігурації та типу навантаження
Габаритні розміри:			
Довжина	6,5	м	Довжина шасі без надбудови
Ширина	2,55	м	Стандартна габаритна ширина
Висота	3,3	м	Висота кабіни та шасі
Об'єм паливного бака	400	л	Для забезпечення автономності
Розмір колісної бази	4,4	м	Відстань між осями, впливає на маневреність
Максимальна швидкість	90-100	км/год	Обмеження для вантажного транспорту
Система трансмісії	Автоматична	–	Забезпечує зручність керування
Клас шасі	Середній	–	Відповідає вимогам до базового автомобіля MB3C

2.5. Вибір та обґрунтування 40-футового ISO контейнера для розміщення обладнання MB3C

Для розміщення технологічного обладнання мобільної водневої заправної станції обрано стандартний 40-футовий 1AA ISO контейнер. Цей вибір обґрунтований його універсальністю, стандартизацією для міжнародних перевезень, міцністю та захисними властивостями. Контейнер буде встановлений безпосередньо на подовжене шасі вантажівки Scania P250. Нижче в таблиці 2.4. буде показано основні характеристики контейнера типу 1AA.

Переваги використання 40-футового ISO контейнера:

1. Стандартизація та універсальність: ISO контейнери є міжнародним стандартом, що забезпечує легкість у транспортуванні та сумісність з існуючою логістичною інфраструктурою. Це розширює потенційний ареал використання МВЗС.

2. Міцність та захист: Контейнер має жорсткий сталевий каркас, що забезпечує надійний захист внутрішнього обладнання від механічних пошкоджень, погодних умов та несанкціонованого доступу. Це особливо важливо для водневого обладнання, яке вимагає підвищених заходів безпеки.

3. Можливість переобладнання: Контейнер є ідеальною "оболонкою" для інтеграції модульних систем. Його можна адаптувати, прорізати отвори для вентиляції, доступу та комунікацій, зберігаючи при цьому структурну цілісність.

Таблиця 2.4. Основні характеристики 40-футового ISO контейнера типу 1AA

Характеристика	Значення	Одиниця виміру	Примітка / Пояснення
Зовнішня довжина	12.19	м (40 футів)	Стандартна довжина ISO контейнера.
Зовнішня ширина	2.44	м (8 футів)	Стандартна ширина ISO контейнера.
Зовнішня висота (1AA)	2.90	м (9 футів 6 дюймів)	"High Cube" контейнер, забезпечує більший внутрішній об'єм.
Власна маса (тара)	3 500	кг	Відповідно 1AA контейнера.
Максимальна повна маса (брутто)	30480	кг	Максимальна маса контейнера з вантажем.
Максимальне навантаження (нетто)	26 280 – 26 980	кг	Максимальна маса вантажу всередині контейнера.
Об'єм внутрішній	~67.7 – 76.0	м ³	Відповідно до 1AA
Конструкція	Сталевий каркас, гофровані стінки, дерев'яна підлога	-	Забезпечує міцність та захист.
Тип транспортування	На подовженому шасі вантажівки; залізниця; морські судна	-	Універсальність логістики.

2.6. Технологічний процес мобільної водневої заправної станції

Технологічний процес функціонування мобільної водневої заправної станції є комплексом взаємопов'язаних етапів, що забезпечують безпечне та ефективне

транспортування водню, його зберігання під тиском, підготовку та безпосередню видачу кінцевому споживачеві — водневому транспортному засобу. Безпосередньо схема зображена на рис. 7 загальний вигляд мобільної водневої заправної станції (вигляд збоку, зверху)

Послідовність технологічного процесу МВЗС включає такі етапи:

1. Надходження та приймання водню. Водень доставляється на МВЗС у газоподібному стані під високим тиском у спеціалізованих цистернах. На станції водень підключається до системи МВЗС. Здійснюється контроль тиску, температури та чистоти водню.
2. Зберігання водню. Прийнятий водень направляється до вбудованих у контейнер високомісних композитних резервуарів (об'ємом по 2 м³ кожен), де він зберігається. Тиск зберігання в цих резервуарах становитиме 350 бар.
3. Компресія (підвищення тиску) водню. Перед заправкою в автомобіль, тиск водню з основних резервуарів (350 бар) підвищується до 700 бар. Це здійснюється за допомогою спеціалізованого водневого компресора високого тиску.
4. Охолодження водню. Під час компресії та швидкого заповнення баків автомобіля водень нагрівається. Для ефективної та безпечної заправки, а також для дотримання протоколів SAE J2601 [11], водень попередньо охолоджується до температури близько -40°C за допомогою системи охолоджувачів.
5. Видача водню (заправка). Охолоджений та стиснений до 700 бар водень подається до заправного дозатора. Автомобіль-споживач під'їжджає, підключається до заправного пістолета, і водень перекачується в його бортові резервуари. Процес є автоматизованим, контролюється системою безпеки та триває близько 5 хвилин на один автомобіль.
6. Моніторинг та безпека. Протягом всього технологічного процесу постійно здійснюється моніторинг ключових параметрів (тиск, температура, концентрація водню) за допомогою датчиків. У випадку відхилень або

аварійної ситуації системи безпеки (автоматичні клапани, вентиляція, аварійні зупинки) негайно активуються.

7. Генерація електроенергії. Усі системи MB3C (компресор, охолоджувач, системи керування та безпеки) живляться електроенергією. Її виробляє електрогенератор, підключений до двигуна Scania через відбір потужності (ВВП), забезпечуючи автономність станції.

2.7. Обладнання та його характеристики

Мобільна воднева заправна станція є комплексним інженерним рішенням, що включає низку взаємопов'язаних систем та компонентів. Нижче в таблиці 2.5. представлено перелік основного технологічного обладнання MB3C із зазначенням його ключових характеристик, розмірів, потужності та виробників. Ця інформація є фундаментальною для подальших розрахунків та проектування.

Таблиця 2.5. – Характеристики основного обладнання MB3C

№	Назва обладнання	Тип / Модель	Розміри (Д×Ш×В)	Потужність / Продуктивність	Ключові характеристики	Виробник (Типова)
1	Резервуари для водню	Тискосприйнятні, композитні	Діаметр: 1.1 м; Довжина: 2.3 м	Ємність: 160 кг H ₂	Макс. робочий тиск: 700 бар. Матеріали: вуглецеві/скловолоконні композити.	Luxfer Gas Cylinders / Type 3 Composite Cylinders [20]
2	Компресор для водню	Поршневий або безмасляний високого тиску	2.0 м × 1.5 м × 1.2 м	Потужність : 150 кВт; Продуктивність: 15–30 кг H ₂ /год	Підвищення тиску до 700 бар. Обладнаний системою охолодження та фільтрацією водню. Компактний дизайн.	Burckhardt Compression / Compressors for Hydrogen [14]
3	Система заправки воднем	Автоматизована, з пістолетом та дозатором	Пістолет: 0.7–1 м; Дозатор: 0.8 м ×	-	Підтримує стандарти ISO [8] та SAE [11] для водневих заправок (350/700	Linde Engineering / Hydrogen Dispensing

			0.5 м × 2.2 м		бар). Захисні клапани, датчики тиску/температур и.	g Units [19]
4	Охолоджува ч для водню	Для підтримки оптимальної температури водню	1.0 м × 0.5 м × 1.0 м	Потужність : 30 кВт	Підтримка температури водню близько - 40°C під час заправки для запобігання перегріву та збереження енергоефективно сті.	Cryostar / Cryocool er [15]
5	Електричні компоненти та інвертори	Система електроживл ення та керування	1.0 м × 0.5 м × 0.5 м	Потужність : до 30 кВт	Здатність працювати з високими навантаженнями. Захист від перевантажень, коротких замикань та надлишкового тепла. Надійний захист від вібрацій [26].	Siemens / Sinamics S120 [26]
6	Система безпеки	Аварійне відключення , датчики витоків, протипожеж ний захист	(Інтегров ана)	-	Датчики витоків водню. Автоматичне відключення при перевищенні тиску або температури. Протипожежні системи (інертні гази або вода).	Honeywe ll / Safety Sensors for Hydrogen [16]
7	Вентиляційн а система	Примусова вентиляція для замкнених просторів	Ширина труб: 0.5 м; Висота: 1.5–2 м	Потужність : 5–10 кВт	Безперервна робота для забезпечення безпеки та мінімізації ризиків вибуху від витоків водню. Зниження рівня водню в повітрі до безпечного [2, 5].	Trolex / Hydrogen Ventilatio n System
8	Електрогене ратор	Промислови й дизельний генератор /	1.5 м × 0.8 м × 1.0 м	Потужність : 200 кВт	Забезпечення автономного електроживлення	Cummins / Stamford

		Вал відбору потужності (ВВП)			всіх систем МВЗС із запасом. Підключення до двигуна Scania через ВВП.	(Типова конфігурація для РТО)
--	--	------------------------------	--	--	---	-------------------------------

2.8. Компонувальна схема розташування обладнання МВЗС

Ефективне та безпечне розміщення всіх технологічних модулів у межах 40-футового ISO контейнера є ключовим аспектом проектування МВЗС. Компонівка обладнання розроблена з урахуванням оптимального розподілу мас, мінімізації довжини комунікацій, зручності обслуговування та відповідності стандартам безпеки. Обладнання розміщено послідовно від передньої частини контейнера до задньої.

В передній частині контейнера (приблизно 0 м - 2.5 м від переднього торця) розташовується блок електроживлення та керування. Цей модуль є серцем енергетичної системи МВЗС. Він включає електрогенератор потужністю 200 кВт (наприклад, Cummins/Stamford), який живиться від двигуна Scania через вал відбору потужності (ВВП). Тут також знаходиться шафа керування з промисловими контролерами (PLC) та комутаційне обладнання, що забезпечує стабільне електроживлення всіх систем (компресорів, охолоджувачів, датчиків, автоматики) та централізоване керування ними [26]. Габаритні розміри модуля становлять: довжина 2.0 м, ширина 1.2 м, висота 1.8 м. Він розміщується вздовж однієї зі стінок контейнера, залишаючи прохід для доступу.

Безпосередньо за блоком електроживлення, в середній частині контейнера (приблизно 2.5 м - 6.0 м від переднього торця), встановлений блок компресії та охолодження. Його призначення підвищення тиску водню з резервуарів до 700 бар для заправки транспортних засобів, а також попереднє охолодження водню до оптимальної температури (-40°C). До складу блоку входять компресор високого тиску (Burckhardt Compression H2 Compressor), охолоджувач (Cryostar Cryocooler), а також системи фільтрації та очищення водню [14, 15]. Габаритні розміри цього модуля: довжина 3.0 м, ширина 1.5 м, висота 2.0 м. Таке розташування мінімізує довжину сполучних комунікацій з електрогенератором.

Далі, в центральній частині контейнера (приблизно 6.0 м - 8.3 м від переднього торця), знаходиться блок зберігання водню. Він слугує для зберігання основного запасу водню, необхідного для заправки споживачів. Блок складається з двох високоміцних композитних циліндричних резервуарів (Luxfer Gas Cylinders Type 3), кожен об'ємом по 2 м³, розрахованих на максимальний тиск 700 бар [20]. Для транспортування водень у них зберігається під тиском 350 бар. Резервуари розміщені пліч-о-пліч у спеціальній несучій рамі, що забезпечує оптимальний розподіл ваги та максимальну стабільність MB3C. Габаритні розміри блоку (два резервуари разом) становлять: довжина 2.3 м, ширина 2.2 м, висота 1.1 м.

В задній частині контейнера (приблизно 8.3 м - 12.19 м від переднього торця) розташований блок заправки та системи безпеки. Цей блок безпосередньо відповідає за видачу водню в транспортні засоби та комплексний контроль безпеки під час всіх операцій. Він включає заправний дозатор (диспенсер) Linde Engineering Hydrogen Dispensing Unit з пістолетом для водню, який відповідає стандартам ISO та SAE для водневих заправок [8, 11, 19]. Його габаритні розміри: ширина 0.8 м, глибина 0.5 м, висота 2.2 м.

Диспенсер встановлюється збоку контейнера, забезпечуючи зручний доступ для заправки та візуальний контроль. Поруч або в легкодоступному місці для оператора розміщується шафа контролю безпеки та пожежогасіння, що містить датчики витоку водню (Honeywell Safety Sensors) та елементи системи Trolex [16]. Системи трубопроводів, арматура, аварійні кнопки (E-stop) та ручні засоби пожежогасіння інтегровані в конструкцію контейнера та розміщуються на зовнішніх поверхнях модулів у стратегічно важливих місцях, забезпечуючи швидкий доступ та мінімізацію ризиків [4, 10].

2.9 Загальний вигляд мобільної водневої заправної станції

Загальний вигляд, в якому продемонстрований вантажний автомобіль Scania P250 – базовий транспортний засіб, що є невід'ємною частиною мобільної водневої заправної станції (MB3C). Зображення детально ілюструє бічний вигляд автомобіля, ключові габаритні розміри та особливості компоновки, які мають вирішальне значення для проектування всього комплексу MB3C. На рис.

7 показаний загальний вигляд мобільної водневої заправної станції, яка складається з таких основних частин: 1) Блок електроживлення та керування 2) блок компресії та охолодження 3) блок зберігання водню 4) заправний дозатор 5) система контролю безпеки 6) примусова вентиляція.

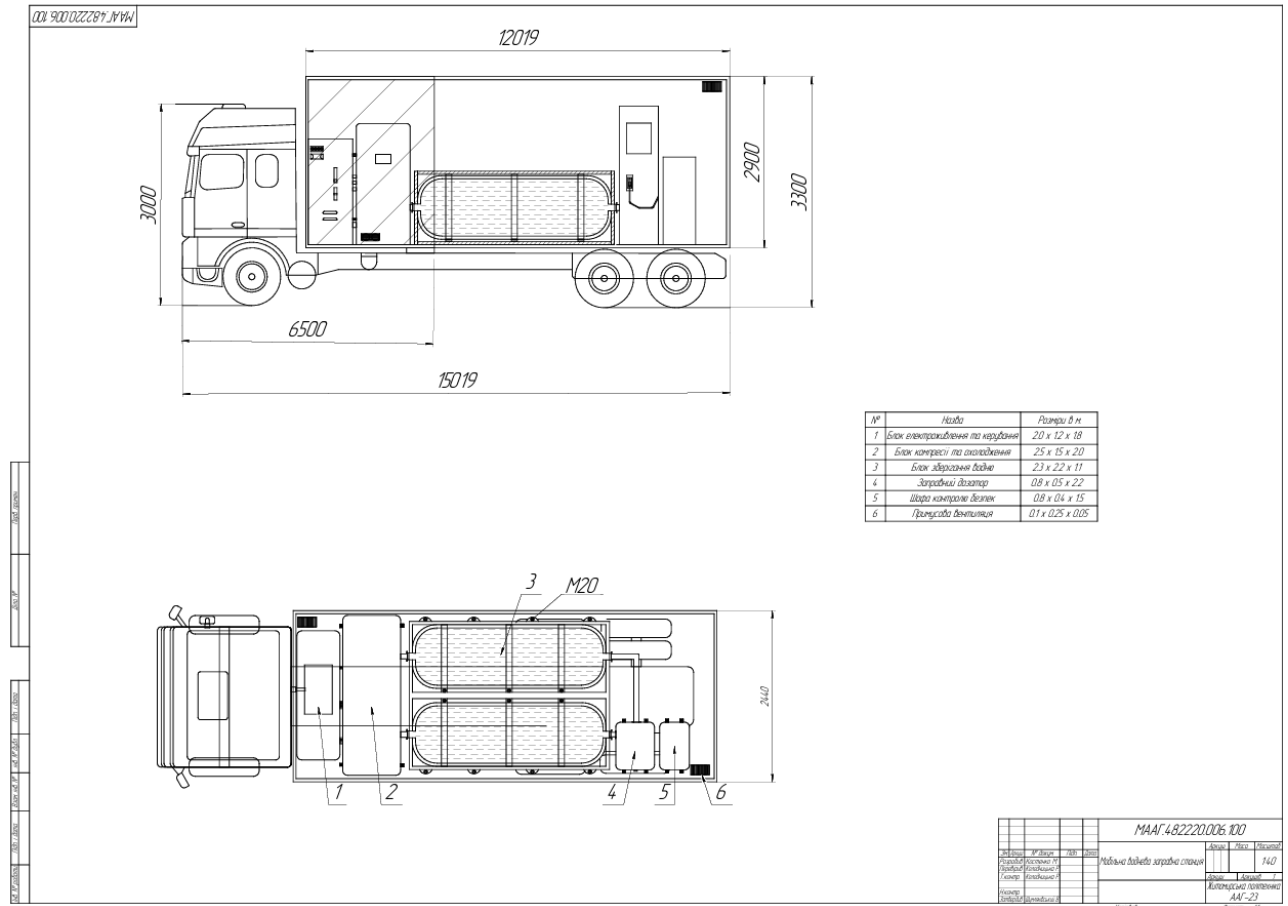


Рис. 7 - Загальний вигляд мобільної водневої заправної станції (вигляд збоку, зверху)

2.10. Розрахунок міцності елементів кріплення модуля водневих резервуарів

Забезпечення надійного та міцного кріплення основного технологічного обладнання до рами транспортного засобу є фундаментальним аспектом проектування (МВЗС). Особливо це стосується модуля зберігання водню, який є складним компонентом та вміщує вибухонебезпечну речовину. Даний розрахунок спрямований на підтвердження достатньої міцності болтових з'єднань, що кріплять модуль водневих резервуарів до напівпричепа, при дії максимальних інерційних навантажень під час руху. Цей аспект є критично

важливим для забезпечення безпеки дорожнього руху та цілісності системи в цілому [4,28].

2.10.1 Вихідні дані та прийняті припущення

Вихідні дані для розрахунку міцності елементів кріплення показані в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6. – Вихідні дані для розрахунку міцності елементів кріплення

Параметр	Символ	Значення	Одиниця виміру	Джерело / Пояснення
Маса блоку зберігання водню	m _{блок}	1600	кг	Включає масу порожніх резервуарів, водню (160 кг) та опорної рами модуля. Приймається за результатами розрахунків центру мас та об'ємів обладнання МВЗС [26].
Прискорення вільного падіння	g	9.81	м/с ²	Загальноприйнята фізична константа.
Максимальне інерційне прискорення	a _{max}	0.8	g	Приймається для розрахунку на найбільш несприятливий випадок (екстремальне гальмування або боковий удар). Відповідає нормативним вимогам безпеки при перевезенні небезпечних вантажів [4,28].
Кількість кріпильних болтів	N	8	шт.	Вибрана кількість для забезпечення рівномірного розподілу навантаження та надійної фіксації модуля по периметру його опорної рами [37].
Клас міцності болтів	—	8.8	—	Високоміцні болти, які широко застосовуються в машинобудуванні для відповідальних силових з'єднань, що працюють під значними навантаженнями [27].
Межа текучості матеріалу болта	σ _y	640	МПа	Характеристика міцності матеріалу болта, що визначає максимальне напруження, при якому матеріал не отримує залишкових деформацій. Стандартне значення для болтів класу 8.8 [30].

Діаметр болтів	d	20 (M20)	мм	Номінальний діаметр метричного болта M20. Забезпечує достатню площу перерізу для передачі значних сил [30].
Площа перерізу одного болта на зріз	Ab	314.16	мм ²	Розраховується за формулою $Ab = 4\pi \cdot d^2$. Ця площа є критичною для сприйняття зрізаючих навантажень.
Допустиме напруження на зріз болтів	$\tau_{доп}$	384	МПа	Величина, яка визначає максимальне напруження, яке болт може безпечно витримувати на зріз без руйнування. Приймається як 0.6-су для пластичних матеріалів при розрахунках на зріз [30].

2.10.2. Порядок та результати розрахунку

1. Визначення максимальної інерційної сили ($F_{інерції}$):

$$F_{інерції} = m_{блок} \cdot a_{тах} \quad (2.1)$$

$$F_{інерції} = 1600 \text{ кг} \cdot (0.8 \cdot 9.81) = 1600 \cdot 7.85 = 12560 \text{ Н} = 12.56 \text{ кН}$$

2. Визначення загальної площі зрізу болтів ($A_{заг_зріз}$):

$$A_{заг_зріз} = N \cdot Ab = 8 \cdot 314.16 = 2513.28 \text{ мм} \quad (2.2)$$

3. Визначення розрахункового напруження на зріз у болтах ($\tau_{розр}$):

$$\tau_{розр} = \frac{A_{заг_зріз}}{F_{інерції}} \quad (2.3)$$

$$\tau_{розр} = \frac{12560}{2513.28} \approx 5.0 \text{ Н/мм}^2 = 5.0 \text{ МПа} \quad (2.4)$$

4. Перевірка умови міцності:

$$\tau_{розр} \leq \tau_{доп} \quad (2.5)$$

$$5.0 \text{ МПа} \leq 384 \text{ МПа} \quad (2.6)$$

Умова міцності виконується.

5. Розрахунок коефіцієнта запасу міцності (SF):

$$SF = \frac{\tau_{доп}}{\tau_{розр}} = \frac{384}{5.0} \approx 76.8 \quad (2.7)$$

Отже, проведений розрахунок міцності елементів кріплення модуля водневих резервуарів показав, що при використанні 8 болтів M20 класу міцності 8.8, розрахункове напруження на зріз становить 5.0 МПа, що значно нижче

Technical drawing of a rectangular container with rounded ends, showing three views: top, side, and front.

- Top View:** Shows a rectangle with rounded ends. The overall width is 2300. The distance between the centers of the rounded ends is 600. The overall height is 2200. The material is specified as M20.
- Side View:** Shows the profile of the container. The overall height is 1100. The distance between the centers of the rounded ends is 2300.
- Front View:** Shows the front of the container. The overall width is 560. The distance between the centers of the rounded ends is 540. The material is specified as M20.

Technical drawing of a rectangular container with rounded ends, showing three views: top, side, and front.

- Top View:** Shows a rectangle with rounded ends. The overall width is 2300. The distance between the centers of the rounded ends is 600. The overall height is 2200. The material is specified as M20.
- Side View:** Shows the profile of the container. The overall height is 1100. The distance between the centers of the rounded ends is 2300.
- Front View:** Shows the front of the container. The overall width is 560. The distance between the centers of the rounded ends is 540. The material is specified as M20.

27

2.13. Загальні конструктивні зміни та експлуатаційні характеристики MB3C

Проектування (MB3C) передбачає комплексні конструктивні зміни та доповнення до базового транспортного засобу. У Таблиці 2.7. узагальнено основні зміни, які перетворюють стандартну вантажівку на спеціалізований багатофункціональний комплекс для транспортування та видачі водню, а також ключові експлуатаційні характеристики розробленої MB3C.

Таблиця 2.7. - Конструктивні зміни та експлуатаційні характеристики MB3C

Категорія зміни / Характеристика	Вихідний стан (Стандартна вантажівка Scania P250)	Перетворення / Додатки (Мобільна Воднева Заправна Станція)	Призначення / Вплив
1. Базова платформа	Шасі вантажівки (Scania P250, 4x2)	Адаптація та подовження шасі, монтаж 40-футового ISO контейнера.	Основа для розміщення обладнання.
2. Енергетична система (розподіл)	Базова електрична система вантажівки	Додано інвертори, розподільчі щити, кабельні мережі для живлення обладнання.	Забезпечення стабільного електроживлення систем MB3C.
3. Електрогенератор	Немає	Електрогенератор (200 кВт), що працює від валу відбору потужності (ВВП) двигуна Scania.	Автономне живлення всіх систем MB3C (компресор, охолоджувач, керування).
4. Зберігання палива (Водень)	Немає	Додано високоміцні резервуари для водню (Type IV, 350 бар для транспортування, 160 кг H ₂).	Зберігання водню під тиском, безпечним для дорожнього перевезення.
5. Система компресії	Немає	Додано водневий компресор (потужністю 150 кВт).	Стиснення водню від тиску зберігання (350 бар) до заправного тиску (700 бар).
6. Система охолодження	Немає	Додано охолоджувач водню (потужністю 30 кВт).	Підтримка оптимальної температури водню (-40°C) під час заправки.
7. Система заправки	Немає	Додано заправний дозатор та пістолет (стандарти ISO, SAE).	Безпосередня видача водню в транспортні засоби.
8. Системи безпеки	Базові автомобільні системи	Комплексні системи безпеки: датчики витоку водню,	Виявлення та запобігання витокам/займанню

		автоматичні клапани, протипожежні системи.	водню, захист при аваріях.
9. Вентиляція	Природна для вантажівки	Додано примусову вентиляційну систему (для 40-футового контейнера).	Запобігання скупченню водню в замкнених просторах.
10. Кріплення обладнання	Базові точки кріплення шасі	Розроблені та встановлені спеціальні рами та високоміцні болтові з'єднання для всіх модулів.	Надійна фіксація обладнання в контейнері, забезпечення стійкості та безпеки при русі.
11. Загальні габарити	Типові для вантажівки з надбудовою	Збільшення загальної довжини (до ~12.2 м з контейнером) та висоти (до ~4.0 м з контейнером).	Впливає на логістику та маршрутизацію (проїзд під мостами, тунелями).
12. Маса	~6-8 тонн (порожня вантажівка)	Значне збільшення маси (загальна маса завантаженої МВЗС ~14000 кг).	Впливає на динаміку, витрати палива та навантаження на осі.
13. Стан водню для заправки	-	Газоподібний водень	Стандартизований тип палива для заправки.
14. Рухома частина комплексу	-	Вантажівка Scania P250 (4x2, жорстка рама).	Базовий транспортний засіб, що забезпечує мобільність МВЗС.
15. Паливо рушійної частини	-	Дизельне паливо/HVO	Забезпечення роботи двигуна Scania.
16. Тип автомобіля, що заправляється	-	Легкові автомобілі	Цільовий сегмент водневого транспорту, що обслуговується.
17. Стандартний час заправки автомобіля	-	5 хв	Ключовий показник продуктивності та зручності заправки для користувача.
18. Тиск заправки (макс.)	-	700 бар	Забезпечення сумісності з сучасними водневими автомобілями, що працюють під високим тиском.

Висновки до розділу 2

У даному розділі розроблено конструктивну концепцію мобільної водневої заправної станції на базі вантажного автомобіля Scania P250 з інтегрованим 40-футовим ISO контейнером. Обґрунтовано вибір базового транспортного засобу та детально описано раціональну компоновку основного технологічного обладнання. Представлені рішення підтверджують технічну можливість та доцільність створення такого мобільного комплексу для ефективної та безпечної заправки водневих транспортних засобів.

Розділ 3. Розрахунок технологічного обладнання та процесів

3.1. Розрахунок об'єму резервуарів для водню

Як показав наш аналіз, існує потреба в заправці 10 автомобілів на день, кількість необхідного об'єму водню для одного автомобіля 5 кг. Тому для заправки 10 автомобілів знадобиться 50 кг водню. Потрібно враховувати, що 1 м³ водню при 700 бар в нормальних умовах має вагу 0,08988 кг.

Нижче показана формула для розрахунку об'єму водню в резервуарах:

$$V_{\text{res}} = \frac{m_{\text{H}_2}}{\rho_{\text{H}_2}} \quad (3.1)$$

де V_{res} - об'єм резервуару (м³),

m_{H_2} - маса водню (кг),

ρ_{H_2} - густина водню при певному тиску (кг/м³).

Водень під тиском 700 бар має густину близько 24 кг/м³ (при температурі - 40°C). Нижче показаний розрахунок об'єму водню в резервуар:

$$V_{\text{res}} = \frac{50 \text{ кг}}{24 \text{ кг/м}^3} = 2,0833 \text{ м}^3 \quad (3.2)$$

Отже, для зберігання 50 кг водню потрібно мінімум 2,08 м³ об'єму резервуарів. Оскільки у нас два резервуари, можна обрати два резервуари об'ємом по 2 м³ кожен для зберігання водню.

3.2. Розрахунок потужності компресорів

Для МВЗС потрібно витратити на заправку одного автомобіля - 5 хвилин.

Якщо кожен автомобіль заправляється за 5 хвилин, то за 1 годину можна заправити 12 автомобілів. Тепер, щоб визначити необхідну потужність компресора, потрібно врахувати, що компресори для заправки воднем працюють під тиском 700 бар, що вимагає значної потужності для підтримки постійного потоку газу при таких умовах. Для розрахунку необхідної потужності компресора можна використовувати наступну формулу для водню:

$$P = \frac{\Delta P \cdot V}{t} \quad (3.3)$$

де P - потужність компресора (Вт),

ΔP - різниця тиску (Па),

V - об'єм водню, що передається за певний час (м^3),

t - час передавання водню (с).

Компресору для транспортування 1 м^3 водню за 5 хвилин потрібно 150 кВт потужності.

3.3. Розрахунок охолоджувачів

Для охолодження водню, що зберігається під високим тиском, використаємо охолоджувачі, які підтримують температурний режим водню на рівні -40°C . Також, використовуємо компресор з потужністю 150 кВт, та враховуємо максимальну кількість заправок у вигляді 10 автомобілів на день.

Теплова потужність охолоджувачів знаходиться за наступною формулою:

$$Q = P_{\text{compressor}} * t \quad (3.4)$$

де Q - теплове навантаження охолоджувача (Вт),

$P_{\text{compressor}}$ - потужність компресора (Вт),

t - час, за який здійснюється процес охолодження (с).

Для кожного компресора необхідно забезпечити додаткові 20% потужності для охолодження. Отже, для компресора потужністю 150 кВт:

$$Q = 150\text{кВт} * 0,2 = 30\text{кВт}$$

Для кожного охолоджувача розрахуємо теплову потужність, яка повинна бути не менше 30 кВт.

3.4. Розрахунок центру мас (ЦМ) завантаженого напівпричепа МВЗС

Помістимо початок координат (0,0,0) на рівні землі, по центру переднього краю платформи напівпричепа (точка кріплення до тягача). В таблиці 2.2. показано компоненти МВЗС та їх параметри. Вісь X : вздовж довжини напівпричепа, напрямом до задньої частини. Вісь Y : поперек ширини

напівпричепа, позитивний напрямок — вправо від центру. Вісь Z: вертикально вгору від рівня землі.

Таблиця 3.1. – Перелік та основні параметри компонентів MB3C

№	Компонент (Назва блоку)	Маса (m), кг	Розміри (Д×Ш×В), м	Призначення / Опис	Координати ЦМ (X, Y, Z), м*
1	Вантажівка Scania P250 (шасі, подовжене) з 40-футовим ISO контейнером (тара)	7000	12.19 × 2.44 × 2.90	Подовжене шасі вантажівки Scania P250 з інтегрованим 40-футовим ISO контейнером, що є основною оболонкою для обладнання MB3C.	(6.8; 0; 2.15)
2	Блок електроживлення та керування	1500	2.0 × 1.2 × 1.8	Забезпечення автономного електроживлення всіх систем MB3C. Включає електрогенератор потужністю 200 кВт, що живиться від двигуна Scania.	(1.0; -0.6; 2.1)
3	Блок компресії та охолодження	3000	3.0 × 1.5 × 2.0	Стиснення водню від тиску зберігання (350 бар) до заправного тиску (700 бар) та його попереднє охолодження.	(3.5; 0; 2.2)
4	Блок зберігання водню (2 резервуари)	1600	2.3 × 2.2 × 1.1	Зберігання запасу водню (загальна ємність 4 м³, транспортується близько 48-50 кг) під тиском 350 бар для подальшої заправки.	(7.15; 0; 1.75)
5	Заправний дозатор (диспенсер)	400	0.8 × 0.5 × 2.2	Безпосередня видача водню до баку автомобіля-споживача при тиску 700 бар.	(8.7; 0.75; 2.3)
6	Допоміжне обладнання (трубопроводи, арматура, рами тощо)	500	(розподілено)	Забезпечення функціонування основних систем та їх інтеграції.	(6.8; 0; 1.5)

Для забезпечення стійкості та безпеки мобільної водневої заправної станції (MB3C) критично важливим є визначення координат її центру мас (ЦМ) як окремих компонентів, так і всього завантаженого комплексу. Початок координат

(0,0,0) знаходиться на рівні землі, по центру переднього краю вантажівки. Вісь X спрямована вздовж довжини вантажівки до задньої частини, вісь Y — поперек ширини (позитивний напрямок вправо), вісь Z — вертикально вгору від рівня землі.

Нижче наведено перелік компонентів МВЗС з їхніми масами та визначеними координатами центру мас:

1. Вантажівка Scania P250 (шасі, подовжене) з 40-футовим ISO контейнером (тара):

- $m_1=7000$ кг
- $CM_1=(6.8;0;2.15)$ м

2. Блок електроживлення та керування:

- $m_2=1500$ кг
- $CM_2=(1.0;-0.6;2.1)$ м

3. Блок компресії та охолодження:

- $m_3=3000$ кг
- $CM_3=(3.5;0;2.2)$ м

4. Блок зберігання водню (2 резервуари):

- $m_4=1600$ кг
- $CM_4=(7.15;0;1.75)$ м

5. Заправний дозатор (диспенсер):

- $m_5=400$ кг
- $CM_5=(8.7;0.75;2.3)$ м

6. Допоміжне обладнання (трубопроводи, арматура, рами тощо):

- $m_6=500$ кг
- $CM_6=(6.8;0;1.5)$ м

Розрахунок загального центру мас завантаженої МВЗС.

Загальна маса завантаженої МВЗС ($M_{заг}$) визначається як сума мас усіх компонентів:

$$M_{заг} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 \quad (3.5)$$

$$M_{заг} = 7000 + 1500 + 3000 + 1600 + 400 + 500 = 14000 \text{ кг} \quad (3.6)$$

Координати загального центру мас (X_{CM}, Y_{CM}, Z_{CM}) розраховуються за формулами:

$$X_{CM} = M_{\text{заг}} \sum (m_i \cdot x_i) \quad (3.7)$$

$$Y_{CM} = M_{\text{заг}} \sum (m_i \cdot y_i) \quad (3.8)$$

$$Z_{CM} = M_{\text{заг}} \sum (m_i \cdot z_i) \quad (3.9)$$

Підставляючи значення:

$$X_{CM} = \frac{77920}{14000} \approx 5.57 \text{ м} \quad (3.10)$$

$$Y_{CM} = \frac{-600}{14000} \approx -0.04 \text{ м} \quad (3.11)$$

$$Z_{CM} = \frac{29270}{14000} \approx 2.09 \text{ м} \quad (3.12)$$

Отже, координати центру мас завантаженої мобільної водневої заправної станції становлять: $CM_{\text{зав.МВЗС}} = (X = 5.57 \text{ м}, Y = -0.04 \text{ м}, Z = 2.09 \text{ м})$

Вищеприведені результати підтверджують збалансоване розміщення обладнання з незначним відхиленням від центральної осі по ширині (Y_{CM}) та оптимальне поздовжнє положення (X_{CM}). Висота центру мас ($Z_{CM} \approx 2.09 \text{ м}$) є прийнятною для транспортного засобу такого типу з урахуванням габаритів 40-футового контейнера, забезпечуючи належну стійкість під час руху.

3.5. Стійкість та прохідність автомобіля

Для повної оцінки безпеки мобільної водневої заправної станції (МВЗС) важливо враховувати її поперечну стійкість в різних експлуатаційних умовах, зокрема на сухій, мокрій та слизькій дорозі. Швидкість перекидання ($V_{\text{пер}}$) є незмінною для даної геометрії автомобіля, тоді як швидкість заносу (V_z) прямо залежить від коефіцієнта зчеплення дорожнього покриття (ϕ).

Вихідні дані для розрахунку:

- Радіус кривизни полотна дороги (R): 20 м, 40 м, 60 м, 80 м, 100 м.
- Ширина колії автомобіля (B): 2.0 м.
- Висота центру мас автомобіля (h_g): 2.09 м (згідно з розрахунками ЦМ).
- Прискорення вільного падіння (g): 9.81 м/с².

Коефіцієнти зчеплення (ϕ) для різних дорожніх умов:

- Суха дорога (Асфальт): $\phi = 0.75$

- Мокра дорога (Асфальт): $\phi=0.45$
- Слизька дорога (Лід/Сніг): $\phi=0.15$

Формули для розрахунку критичних швидкостей:

1. Швидкість перекидання ($V_{\text{пер}}$):

$$V_{\text{пер}} = \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot B}{2 \cdot h_g}} \quad (3.13)$$

2. Швидкість заносу (V_z):

$$V_z = g \cdot R \cdot \phi \quad (3.14)$$

Розрахунки значень $V_{\text{пер}}$ та V_z для різних радіусів R показані в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2. – Розрахункові значення критичних швидкостей $V_{\text{пер}}$ та V_z

R (м)	$V_{\text{пер}}$ (км/год)	V_z (Суха) (км/год)	V_z (Мокра) (км/год)	V_z (Слизька) (км/год)
20	17.47	43.67	32.06	18.57
25	19.53	48.86	35.86	20.76
30	21.41	53.51	39.29	22.77
35	23.16	57.90	42.54	24.64
40	24.71	61.73	45.36	26.28
45	26.22	65.52	48.14	27.90
50	27.67	69.17	50.81	29.45
55	29.07	72.67	53.38	30.93
60	30.27	75.64	55.57	32.18
65	31.60	79.03	58.07	33.64
70	32.89	82.26	60.47	35.04
75	34.15	85.41	62.79	36.39
80	34.92	87.35	64.21	37.22
85	36.63	91.56	67.31	39.00
90	37.75	94.36	69.37	40.20
95	38.85	97.12	71.40	41.38
100	39.07	97.60	71.75	41.59

Швидкість перекидання $V_{\text{пер}}$ показує максимальну швидкість, при якій автомобіль може рухатися по повороту без ризику перекидання. Швидкість заносу V_z вказує на швидкість, при якій колеса автомобіля втрачають зчеплення з дорогою, що призводить до неконтрольованого заносу. Умова безпечного руху

полягає в тому, що фактична швидкість руху повинна бути меншою за обидві критичні швидкості ($V_{\text{пер}}$ та V_3). Крім того, необхідно, щоб $V_{\text{пер}} < V_3$, що означає, що автомобіль спочатку піде в занос, а не перекинетися, що є більш безпечним сценарієм. У даному випадку, $V_{\text{пер}}$ значно менша за V_3 для всіх радіусів, що свідчить про високий рівень стійкості до перекидання.

Нижче представлено графік на рис. 9, що ілюструє залежність швидкості перекидання ($V_{\text{пер}}$) та швидкості заносу (V_3) від радіусу кривизни повороту (R).

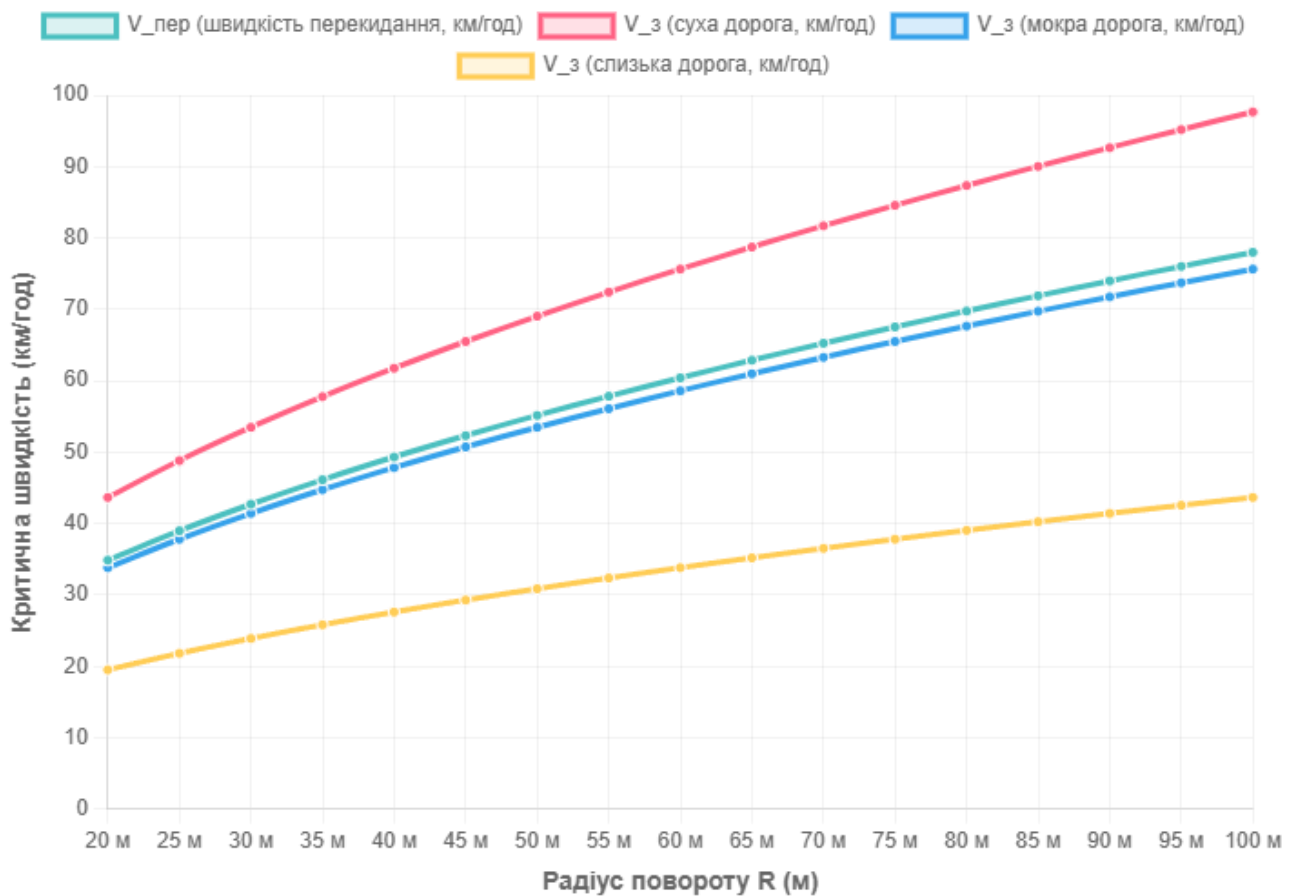


Рис. 9 – Графік поперечної стійкості водневої станції

Висновки до розділу 3

У даному розділі виконано ключові інженерні розрахунки, що обґрунтовують технічні параметри мобільної водневої заправної станції. Було визначено оптимальний об'єм резервуарів для зберігання водню, розраховано необхідну потужність компресорів та охолоджувачів для забезпечення ефективного процесу заправки. Особливу увагу приділено розрахунку центру мас

завантаженого комплексу, що підтвердило його збалансоване розташування ($X=5.57$ м, $Y=-0.04$ м, $Z=2.09$ м) та високу стійкість. Крім того, проаналізовано стійкість та прохідність автомобіля при русі по криволінійній траєкторії, демонструючи його безпекову межу швидкості перекидання та заносу. Загалом, проведені розрахунки підтвердили технічну доцільність та оптимальність обраних конструктивних і технологічних рішень.

Розділ 4. Безпека мобільного водневої заправної станції

Забезпечення безпеки є ключовим аспектом при проектуванні, будівництві та експлуатації мобільних водневих заправних станцій (МВЗС). Водень, як паливо, має унікальні фізико-хімічні властивості, які вимагають надзвичайно ретельного підходу до всіх етапів його обігу – від виробництва до транспортування та безпосередньо заправки. Також дуже важливим аспектом є безпечний радіус, навколо автомобіля. При великому витоку водню, може відбутися потужний вибух. Розповсюдження ударної теплової хвилі зображено на рис 4.1 [31].

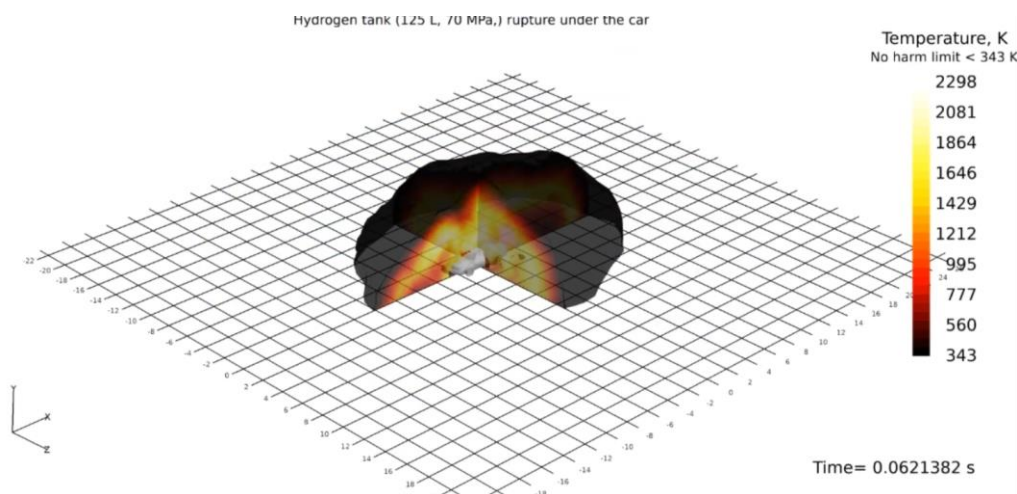


Рис. 4.1. – Розповсюдження ударної теплової хвилі.

4.1. Основні властивості водню та пов'язані з ними ризики

Водень (H_2) є найлегшим елементом, безбарвним, без запаху та смаку газом. Його основні властивості, що визначають вимоги до безпеки, включають в себе низьку щільність: Водень значно легший за повітря (приблизно в 14 разів), що сприяє його швидкому розсіюванню у відкритому просторі або добре вентильованих приміщеннях. Це зменшує ризик утворення вибухонебезпечних концентрацій при невеликих витоках у відкритих зонах.

Широкий діапазон вибуховості (займистості): суміш водню з повітрям є вибухонебезпечною у дуже широкому діапазоні концентрацій – від 4% до 75% за об'ємом водню в повітрі. Це вимагає надзвичайно точного та надійного контролю за його концентрацією.

Низька мінімальна енергія займання (МЕЗ): для займання воднево-повітряної суміші потрібна дуже мала кількість енергії (близько 0.02 мДж), що

робить його одним із найлегкозаймистих газів. Будь-яка іскра, відкритий вогонь, нагріті поверхні, або навіть статичний розряд можуть спричинити займання.

Висока швидкість горіння (детонації): водень горить дуже швидко, що може призвести до швидкого поширення полум'я. У певних умовах можлива детонація.

Невидиме полум'я: полум'я водню практично невидиме неозброєним оком водень, що ускладнює виявлення пожежі.

Основні ризики при використанню водню:

Через малий розмір молекул водень може проникати через мікроскопічні дефекти, недосконалі ущільнення. Неконтрольований витік може призвести до накопичення вибухонебезпечної суміші. Займання водню при контакті з джерелом займання. Накопичення вибухонебезпечної концентрації водню в замкненому просторі з подальшим займанням.

4.2. Нормативно-правова база та стандарти безпеки

Проектування та експлуатація МВЗС повинна відповідати низці міжнародних та національних стандартів, що регулюють безпеку водневих систем та транспортування небезпечних вантажів.

Нижче показані Міжнародні та Європейські стандарти щодо безпеки водню:

1. ISO 22734: "Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial and commercial applications" (Генератори водню з використанням електролізу води – Промислові та комерційні застосування).
2. ISO 19880-1: "Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 1: General requirements" (Газоподібний водень – Заправні станції – Частина 1: Загальні вимоги).
3. SAE J2601: "Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles" (Протоколи заправки для легкових автомобілів на газоподібному водні).
4. NFPA 2: "Hydrogen Technologies Code" (Кодекс водневих технологій) – розроблений Національною асоціацією протипожежного захисту США.

5. ATEX Directives (2014/34/EU та 1999/92/EC): Директиви ЄС, що регулюють обладнання та захисні системи, призначені для використання у потенційно вибухонебезпечних середовищах, та вимоги до мінімальних поліпшень безпеки праці для працівників, які піддаються ризику від вибухонебезпечних атмосфер.
6. ADR (Європейська угода про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів): Регулює вимоги до конструкції транспортних засобів, маркування, пакування та процедур перевезення водню (як стисненого газу) автомобільним транспортом.
7. ДБН В.2.5-56:2014 "Системи протипожежного захисту" (адаптація європейських стандартів безпеки).
8. НПАОП 0.00-1.76-15 "Правила охорони праці під час експлуатації систем водневого господарства" (або інші відповідні НПАОП для газового господарства).
9. ДСТУ ISO/IEC 80079-20-1 "Вибухонебезпечні середовища. Частина 20-1: Характеристики матеріалів для класифікації газів та парів, методи випробувань" (або інші відповідні ДСТУ).

4.3. Конструктивні заходи безпеки МВЗС

Проектування МВЗС передбачає впровадження багаторівневих систем захисту таких як резервуари для водню які, виготовлені з високоміцних композитних матеріалів (наприклад, вуглепластик, склопластик) для зниження ваги та підвищення міцності, стійкості до водневого окрихчення. Резервуари мають міжнародну сертифікацію EC 79, ISO 11119 [7]. Резервуари встановлені у спеціальних ударостійких контейнерах/кожухах для захисту від механічних пошкоджень під час руху та експлуатації. Також встановлена система контролю температури стінок резервуарів, щоб уникнути перегріву. Використовується високоякісна нержавіюча сталь та спеціальні сплави, стійкі до водню, з високим тиском та мінімальна кількість роз'ємних з'єднань. Перевага віддається зварним з'єднанням. Всі з'єднання подвійно герметизовані. Встановлена прокладка трубопроводів у захисних кожухах та в місцях, недоступних для механічних

пошкоджень. Встановленні високочутливі датчики водню (електрохімічні або напівпровідникові) у всіх потенційно небезпечних зонах: біля резервуарів, компресорів, охолоджувачів, заправних пістолетів, у закритих відсіках. Також налаштовані датчики на спрацьовування при низьких концентраціях водню 1% від НМВК - нижньої межі вибуховості, тобто 0.04% об'ємних для раннього виявлення. При спрацьовуванні датчиків система автоматично відключає подачу водню та ініціює аварійні процедури (звукова/світлова сигналізація, ввімкнення примусової вентиляції). Автоматичні швидкодіючі клапани, перекривають подачу водню з резервуарів у разі перевищення тиску, температури, витoku або активації кнопки аварійної зупинки. На резервуарах та трубопроводах встановлюються запобіжні клапани для скидання надлишкового тиску в безпечну зону. Кнопки аварійної зупинки (E-stop) розміщені у легкодоступних місцях на МВЗС та поруч із зоною заправки, які негайно відключають всю систему. Примусова вентиляція для закритих відсіків, де розташоване обладнання, що працює з воднем, обов'язкова примусова припливно-витяжна вентиляція з кратністю повітрообміну, що виключає утворення вибухонебезпечних концентрацій. Система вентиляції інтегрована з датчиками водню та автоматично збільшує продуктивність у разі виявлення витoku. Все електричне обладнання (двигуни, датчики, освітлення, кабелі, інвертори, контролери) у зонах, де можливе утворення вибухонебезпечних сумішей водню з повітрям, відповідає вимогам Директиви АТЕХ. Клас зони визначається згідно з НПАОП. Обов'язково заземлюється всі металеві частини МВЗС, що може накопичувати статичний заряд, та автомобіль, що заправляється. Ефективна система блискавкозахисту. Встановлюються автоматичні систем пожежогасіння дренчерні системи водорозпилення, та системи на основі інертних газів, таких як азот), які активуються при виявленні займання або перевищенні температури. Вогнегасники (порошкові, вуглекислотні) для класу С (горючі гази) та класу А/В (тверді/рідкі речовини). Знаходяться в легкодоступних місцях. Персонал навчений використанню протипожежного обладнання.

4.4. Безпека під час транспортування водню

Транспортування водню у складі MB3C підпадає під дію міжнародних та національних правил перевезення небезпечних вантажів які дотримуються ADR. Класифікація стисненого водню належить до 2 Класу (Гази), підкласу 2.1 (Займисті гази). Обов'язкове маркування транспортного засобу спеціальними табличками оранжевого кольору та знаками безпеки (ромб з полум'ям та символом газу). Наявність повного пакету транспортних документів (дозволи, інструкції, сертифікати на вантаж). GPS-моніторинг з відстеженням параметрів руху (швидкість, маршрут). Можливість дистанційного моніторингу тиску та температури в резервуарах. Водії повинні мати відповідну категорію та спеціальний допуск ADR для перевезення небезпечних вантажів. Регулярні медичні огляди. Дотримання швидкісного режиму, заборона на зупинки в небезпечних місцях (біля скупчень людей, житлових будинків).

4.5. Безпека під час заправки воднем

Процес заправки автомобілів воднем є найбільш критичним етапом з точки зору безпеки, тому потрібно правильно обирати місця заправки. Заправка повинна здійснюватися виключно на відкритих майданчиках, що добре провітрюються, подалі від будівель (житлових, громадських), джерел відкритого вогню, іскор, електроустановок, каналізаційних люків, підземних комунікацій. Майданчик має бути рівним, без вибоїн, з твердим покриттям, що не допускає скупчення рідин. Зона заправки повинна бути чітко позначена та огорожена, а доступ до неї під час заправки - обмежений для сторонніх осіб. Перевірка технічного стану MB3C та автомобіля, що заправляється. Обов'язкове заземлення автомобіля. Переконавшись у відсутності джерел займання поблизу. Дотримання протоколів заправки SAE J2601, що регулюють тиск, температуру та швидкість подачі водню та постійний моніторинг оператором. Максимальна автоматизація процесу заправки з мінімальним втручанням оператора. Система "fail-safe" (відмова безпеки), яка автоматично припиняє заправку при виявленні будь-яких відхилень.

Зона небезпеки (Hazard Radius): радіус небезпечної зони визначається розрахунками відповідно до стандартів NFPA 2, і залежить від кількості водню, тиску зберігання, типу витоку та умов вентиляції. Для МВЗС зони небезпеки можуть становити: Зона негайної небезпеки (вибухонебезпечна концентрація): Кілька метрів безпосередньо навколо місця витоку або заправного пістолета. Тут заборонено знаходитися без спеціальних засобів захисту. Зона потенційної небезпеки (можливість розсіювання): Десятки метрів, де вимагається контроль доступу та відсутність джерел займання. Ці зони позначені на місці заправки та вимагати особливого контролю. Негайна активація аварійної зупинки при виявленні витоку, евакуація людей, ввімкнення вентиляції. Активація систем пожежогасіння, виклик екстрених служб, евакуація. Персонал чітко проінструктований щодо цих процедур та мати засоби індивідуального захисту.

4.6. Організаційні та операційні заходи безпеки

Технічна безпека має бути доповнена суворими організаційними процедурами таких як навчання та сертифікація персоналу: Весь персонал (оператори, механіки, водії) повинен пройти спеціалізоване навчання з безпеки водню, включаючи основи фізико-хімічних властивостей, процедури експлуатації, технічного обслуговування, реагування на аварійні ситуації та використання ЗІЗ. Розробка та дотримання регламентів (СОПи) має чіткі стандартні операційні процедури для кожної дії – від приймання водню до заправки, транспортування, технічного обслуговування та аварійного реагування. Регулярні перевірки та випробування включають в себе постійний контроль технічного стану всіх компонентів МВЗС, включаючи датчики, клапани, резервуари. Періодичні гідравлічні та пневматичні випробування. План реагування на надзвичайні ситуації (ПРНС) детально розроблений у разі витоків, пожеж, вибухів чи інших аварійних ситуацій. Включає контактні дані екстрених служб, схеми евакуації, розташування аварійного обладнання. Ведення повної технічної документації, журналів обслуговування, актів перевірок та інструктажів.

У цьому розділі було детально розглянуто критичні аспекти безпеки мобільної водневої заправної станції, обумовлені унікальними фізико-хімічними

властивостями водню. Визначено основні ризики, пов'язані з його вибухонебезпечністю та легкістю займання. Обґрунтовано необхідність дотримання міжнародних (ISO, SAE, NFPA, ATEX, ADR) та національних (ДБН, НПАОП, ДСТУ) стандартів та нормативів на всіх етапах життєвого циклу МВЗС. Визначено комплекс конструктивних заходів безпеки, що включають вимоги до резервуарів, трубопроводів, систем моніторингу витоків, аварійних клапанів, вибухозахищеного електрообладнання, вентиляції та систем пожежогасіння. Детально описано протоколи безпечного транспортування водню згідно з правилами ADR та процедури безпечної заправки, включаючи вибір місця, послідовність дій та визначення зон небезпеки. Підкреслено важливість організаційних заходів, таких як навчання персоналу, регулярні перевірки та наявність плану реагування на надзвичайні ситуації, для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації комплексу.

4.7. Безпека мобільної водневої заправної станції при ДТП

Особлива увага приділяється забезпеченню безпеки мобільної водневої заправної станції у випадку дорожньо-транспортної пригоди (ДТП). Водневі резервуари, що використовуються у МВЗС (тип IV, виробництва Luxfer Gas Cylinders), розроблені та випробувані на високу стійкість до механічних пошкоджень та вогневих впливів відповідно до суворих міжнародних стандартів, таких як UN/ECE Regulation No. 134 [11] та NFPA 2 [9]. Ці випробування включають краш-тести та тести на вогнестійкість, що підтверджує їхню здатність зберігати цілісність навіть при значних деформаціях [19]. Додатково, система оснащена автоматичними запірними клапанами (ESV) та запобіжними клапанами скидання тиску (PRD), які спрацьовують при виявленні витoku або критичному підвищенні температури, мінімізуючи ризик пожежі чи вибуху після зіткнення [9].

Основні потенційні ризики при ДТП:

1. Витік водню: Пошкодження резервуарів, трубопроводів або арматури може призвести до неконтрольованого витoku водню.

2. Займання водню: Витік водню може бути ініційований іскрою від зіткнення, нагрітими елементами, пошкодженою електропроводкою або полум'ям від пожежі, що виникла внаслідок ДТП.
3. Пожежа/Вибух: Швидке займання великої кількості водню у відносно замкнутому просторі (наприклад, під кожухом обладнання) може призвести до дефлаграції або, в найгіршому випадку, до вибуху.

Конструктивні та системні заходи безпеки:

1. Високоміцні водневі резервуари (Type IV):

Використання композитних балонів Type IV (повністю обгорнутих композитом) забезпечує виняткову стійкість до механічних пошкоджень. Ці резервуари розроблені та протестовані на відповідність суворим міжнародним стандартам (ECE R134) на стійкість до ударів, проколів та пожежі. Їхня конструкція з полімерним лайнером та карбоновим волокном дозволяє поглинати значну частину енергії удару без руйнування. Місце розташування резервуарів повинно бути горизонтально та максимально низько на платформі напівпричепа, переважно в центральній частині. Це не лише знижує центр ваги, а й забезпечує додатковий захист від прямих ударів, оскільки вони розташовані всередині габаритів шасі та між іншими, менш критичними, елементами. Захисна рама для блоку резервуарів та іншого обладнання встановлюються в спеціальних міцних металевих рамах/модулях, які слугують додатковим пасивним захистом при зіткненнях, поглинаючи енергію удару.

2. Системи аварійного відключення та стравлювання тиску (ESV та PRD):

Автоматичні запірні клапани (Emergency Shut-off Valves, ESV): Встановлені на виході з резервуарів та перед основними споживачами. Ці клапани спрацьовують автоматично при виявленні значного падіння тиску (що свідчить про витік), перевищенні температури, або при активації датчиків удару. Вони миттєво перекривають подачу водню, локалізуючи потенційний витік. Запобіжні клапани скидання тиску (Pressure Relief Devices, PRD): Встановлені на резервуарах. При нагріванні резервуара під час пожежі внаслідок ДТП водень всередині розширюється, підвищуючи тиск. PRD активуються при досягненні

певного критичного тиску/температури та безпечно стравлюють водень назовні (зазвичай через вентиляційні отвори спрямовані вгору), запобігаючи вибуховому руйнуванню балона.

3. Системи моніторингу витоків та пожежогасіння:

Датчики витоку водню: Розміщені по периметру обладнання та в закритих відсіках. Вони подають сигнал тривоги та автоматично активують аварійні протоколи (відключення систем, спрацювання ESV, вентиляція). Системи пожежогасіння: Хоча водень важко гасити водою, системи можуть включати автоматичні порошкові або газові (CO₂) системи пожежогасіння для захисту прилеглих до водневої системи компонентів електрообладнання, паливного баку тягача.

4. Відповідність міжнародним та національним стандартам:

ADR (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road): Уся конструкція MB3C має відповідати найжорсткішим вимогам ADR для транспортування небезпечних вантажів. Це включає вимоги до міцності шасі, кріплення вантажу, систем гальмування та аварійних систем. ECE R134 (UN Regulation No. 134): Цей стандарт визначає вимоги до безпеки компонентів систем паливних елементів транспортних засобів, що використовують стиснений водень, включаючи тести на стійкість до зовнішніх впливів (зіткнення, пожежа). NFPA 2 (Hydrogen Technologies Code): Цей американський стандарт (який часто використовується як еталон) містить детальні вимоги до безпечного поводження з воднем, включаючи аварійні ситуації

4.7. Типовий маршрут транспортування водню та його безпекове обґрунтування

Для демонстрації логістичних можливостей та обґрунтування мобільності водневої заправної станції (MB3C) розглянуто типовий маршрут транспортування від умовної точки постачання водню в Рені, Одеська область, до пункту призначення в Житомирі. Вибір Рені, як великого портового міста, обґрунтовує потенційний імпорт водню або його отримання з регіональних

центрів виробництва для подальшого автотранспортного перевезення. Цей маршрут є характерним для міжрегіональних перевезень в Україні та дозволяє оцінити дорожні умови, час у дорозі та загальні логістичні аспекти з точки зору безпеки перевезення небезпечних вантажів. Точка забору водню в Рені. Водень може бути отриманий з ділянок, розташованих на території Ренійського морського порту або поблизу промислових зон міста. Порт Рені, будучи стратегічним логістичним вузлом на Дунаї, забезпечує можливість прийому водню як у газоподібному стані (у контейнерах-цистернах або трубних трейлерах), так і в перспективі, у рідкому вигляді, що доставляється водним транспортом. Наявність відповідної інфраструктури для перевалки вантажів у порту робить його логічною точкою для завантаження водню на МВЗС.

Маршрут: Рені – Житомир.

Основним маршрутом для вантажного транспорту з Рені до Житомира є комбінація національних та міжнародних автомобільних доріг:

1. Рені – Одеса (траса М-15 / Е87):
 - Відстань: 296 км.
 - Стан дороги: Траса М-15 є важливою міжнародною магістраллю. Значна її частина реконструйована, проте на деяких ділянках можуть зустрічатися нерівності або ремонтні роботи. На цій ділянці можливі затори, особливо біля пунктів пропуску або в літній період через тимчасові обмеження руху для великовагового транспорту. Рух вантажівки з небезпечним вантажем буде додатково обмежений до 90 км/год. Маршрут показаний на рис. 10.

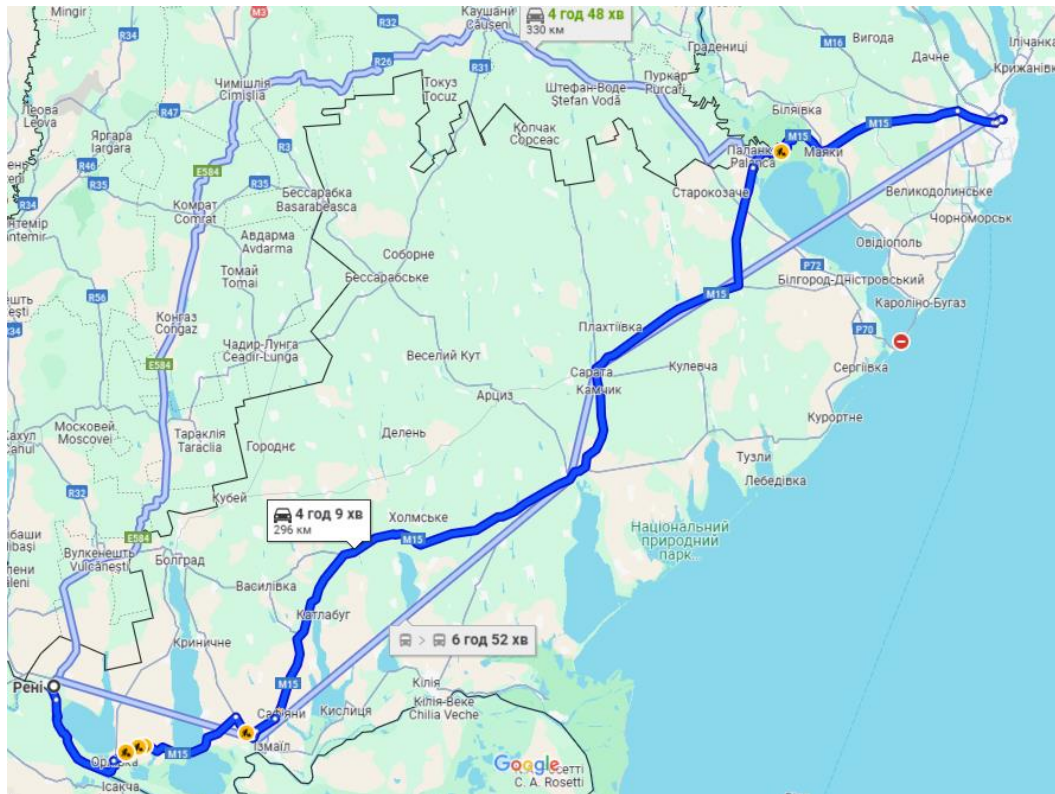


Рис. 10. - Рені – Одеса (траса М-15 / Е87)

2. Одеса – Київ (траса М-05 / Е95):

- Відстань: 476 км.
- Стан дороги: Траса М-05 є однією з головних магістралей України.

Більша її частина має 2-3 смуги руху в кожен бік та задовільне покриття, проте можуть бути ділянки з ремонтними роботами або певними нерівностями. Дорога розрахована на значні навантаження (11.5 тонн на вісь). Маршрут показаний на рис. 11.

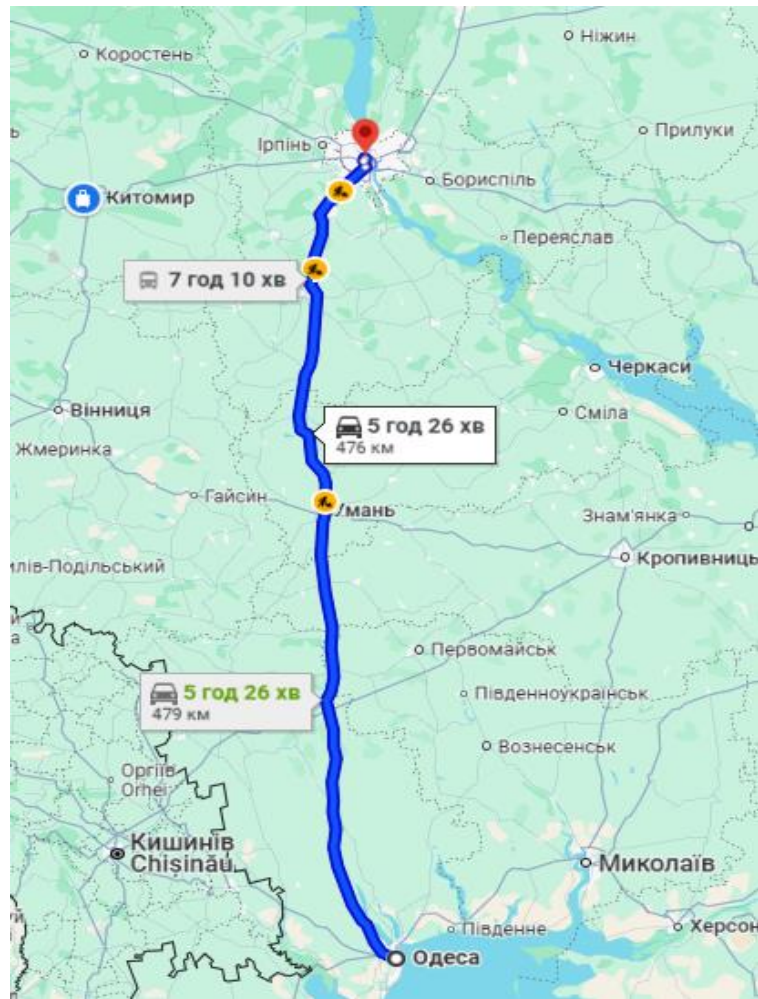


Рис. 11. - Одеса – Київ (траса М-05 / Е95)

3. Ділянка навколо Києва:

- Проїзд через Київ або його об'їзд (через кільцеву дорогу) вимагає особливої уваги через великі затори та можливі обмеження для вантажного транспорту з небезпечними вантажами.

4. Київ – Житомир (траса М-21 / Е583, раніше частина М-06 Київ – Чоп):

- Відстань: Приблизно 130-140 км.
- Стан дороги: Ця ділянка також є однією з ключових транспортних артерій, стан покриття переважно добрий. Можливі ділянки з ямковим ремонтом, особливо після зимового періоду. Маршрут показаний на рис. 12.

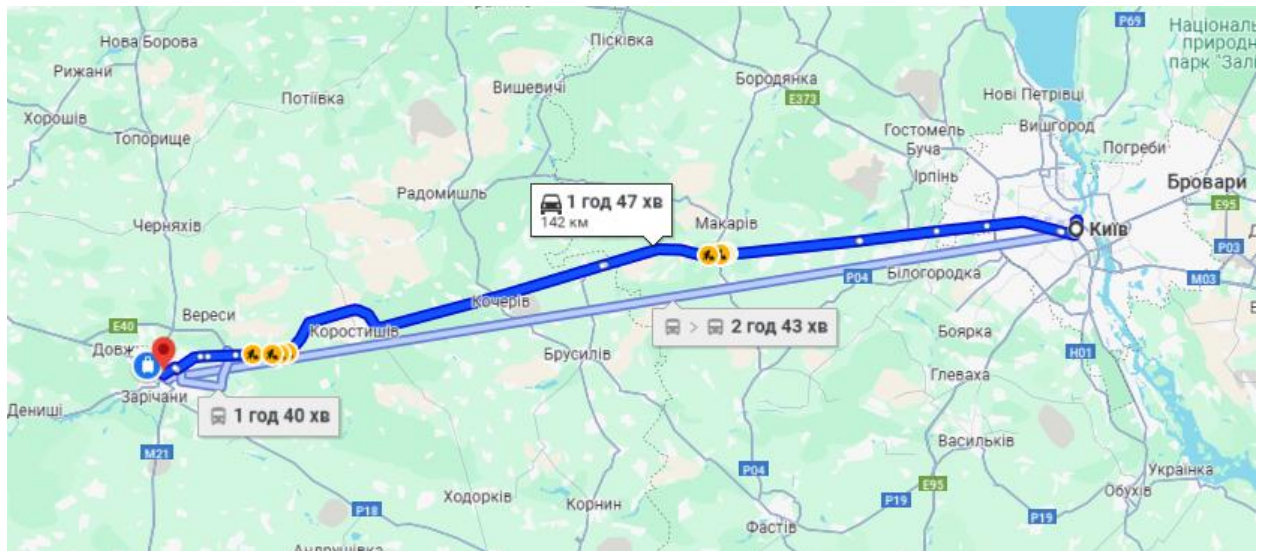


Рис. 12. - Київ – Житомир (траса М-21 / Е583)

Загальна відстань маршруту: Приблизно 900-920 км. Орієнтовний час у дорозі: З урахуванням швидкості 90 км/год для вантажівки, обов'язкових зупинок для відпочинку водія та можливих заторів/ремонтів, час у дорозі становитиме близько 11-13 годин, що може вимагати організації відпочинку водія або зміни екіпажу. Приблизне розташування МВЗС для заправки автомобілів може бути розгорнуте на околицях Житомира, поблизу великих транспортних розв'язок або промислових/логістичних зон. Наприклад, підходить територія біля об'їзної дороги Житомира (М-06/М-21) або на території великих логістичних комплексів/автопарків за межами щільної забудови міста.

Чому саме такий вибір? Таке розташування забезпечує легкий доступ для водневих транспортних засобів, які прямують транзитом або здійснюють перевезення в регіоні, не вимагаючи заїзду в центр міста. Воно також гарантує дотримання необхідних безпечних радіусів від житлових та громадських будівель, що є критично важливим при роботі з воднем. Крім того, на околицях зазвичай є достатньо відкритого простору та належне вентилявання, що відповідає вимогам безпеки [4, 9].

Обґрунтування вибору маршруту з точки зору безпеки:

Маршрут пролягає переважно по дорогах міжнародного та національного значення (М-15, М-05, М-21), які мають краще покриття та ширші смуги порівняно з регіональними шляхами. Це забезпечує оптимальні умови для

перевезення великогабаритної та важкої МВЗС, мінімізуючи ризики, пов'язані з якістю дорожнього полотна. Усі вибрані траси є частиною міжнародних транспортних коридорів, дозволених для перевезення небезпечних вантажів, та відповідність вимогам ADR [4]. Дотримання встановлених правил (маркування, документація, швидкісний режим, обмеження на паркування) є обов'язковим для забезпечення безпеки. Наявність розвиненої дорожньої інфраструктури вздовж цих трас сприяє ефективному моніторингу руху та, у разі необхідності, швидкому реагуванню дорожніх та екстрених служб.

Висновки до розділу 4

У даному розділі детально розглянуто критичні аспекти безпеки мобільної водневої заправної станції, що зумовлені унікальними фізико-хімічними властивостями водню. Визначено основні ризики, пов'язані з його вибухонебезпечністю та легкістю займання. Обґрунтовано необхідність дотримання широкого спектру міжнародних (ISO, SAE, NFPA, ATEX, ADR) та національних (ДБН, НПАОП, ДСТУ) стандартів та нормативів на всіх етапах життєвого циклу МВЗС. Визначено комплекс конструктивних заходів безпеки, включаючи вимоги до резервуарів, трубопроводів, систем моніторингу витоків, аварійних клапанів, вибухозахищеного електрообладнання, вентиляції та систем пожежогасіння. Детально описано протоколи безпечного транспортування водню згідно з правилами ADR, включаючи вибір типового маршруту від Рені до Житомира, та процедури безпечної заправки, що охоплюють вибір місця, послідовність дій та визначення зон небезпеки. Підкреслено важливість організаційних та операційних заходів безпеки, а також розглянуто безпеку комплексу при дорожньо-транспортних пригодах.

Розділ 5. Економічне обґрунтування та оцінка ефективності проекту

Для того, щоб оцінити фінансову ефективність проекту, потрібно розглянути всі витрати та потенційні доходи. Основними витратами будуть:

Інвестиційні витрати: Це вартість покупки та монтажу обладнання для мобільної заправної станції.

Операційні витрати: Це витрати, які виникають в процесі експлуатації станції, включаючи витрати на обслуговування, енергію, зарплату персоналу та інші ресурси.

Прогноз прибутку: Оцінка прибутку від надання послуг з заправки водневих автомобілів.

Час окупності: Період, через який інвестиції в проект повернуться через отримані доходи.

Прогнозований прибуток: Оцінка фінансового результату після врахування всіх витрат і доходів.

5.1. Інвестиційні витрати

Інвестиційні витрати включають в себе:

Вартість вантажівки (Scania P-Series) з напівпричепом. Вартість монтажу та налаштування водневої заправної системи (компресори, резервуари, пістолети, охолоджувальні системи тощо).

Вартість вантажівки та напівпричепу:

Вартість Scania P-Series: 1 800 000 грн.

Вартість напівпричепу: 500 000 грн.

Вартість обладнання:

Система компресії водню: 1 000 000 грн.

Резервуари для зберігання водню: 500 000 грн.

Охолоджувальні системи та додаткове обладнання: 200 000 грн.

Пістолети для заправки водневих автомобілів: 150 000 грн.

Загальні інвестиційні витрати:

$$1800000 + 500000 + 1000000 + 500000 + 200000 + 150000 = 4150000 \text{грн} \quad (5.1)$$

5.2. Операційні витрати

Операційні витрати включають:

Обслуговування та ремонт станції (які ми розраховували раніше). Витрати на енергію для компресорів та охолоджувачів. Зарплата персоналу. Інші витрати, пов'язані з експлуатацією станції.

Операційні витрати на рік:

Витрати на обслуговування: 96 360 грн.

Витрати на енергію: 1 095 000 кВт·год. Якщо вартість 1 кВт·год становить 2 грн:

$$E_{\text{energy}} = 1095000 * 2 = 2190000 \text{грн/рік} \quad (5.2)$$

Зарплата персоналу (2 оператора заправки, 1 механік, 1 адміністратор — загальна сума: 120 000 грн/рік).

Загальні операційні витрати на рік:

$$\text{Операційні витрати} = 96360 + 2190000 + 120000 = 2406360 \text{грн/рік} \quad (5.3)$$

5.3. Прогноз прибутку

Прогноз прибутку залежить від кількості заправок на день і вартості однієї заправки. Максимальна кількість заправлених автомобілів на день 120 автомобілів. А вартість одного 1 кг водню 100 грн. Кількість водню яка, необхідна для заправки одного автомобіля (приблизно 5 кг на одну заправку).

Прибуток на день:

$$\text{Прибуток на день} = 120 \text{заправок} \times 5 \text{кг} \times 100 \text{грн/кг} = 60000 \text{грн/день} \quad (5.4)$$

Прибуток на рік:

$$\text{Прибуток на рік} = 60000 \text{грн/день} \times 365 \text{днів} = 21900000 \text{грн/рік} \quad (5.5)$$

5.4. Час окупності

Час окупності визначається як період, за який інвестиційні витрати будуть покриті за рахунок доходів. Нижче показана формула для часу окупності.

$$\text{Час окупності} = \frac{\text{Інвестиційні витрати}}{\text{Річний дохід} - \text{Операційні витрати}} \quad (5.6)$$

$$\text{Час окупності} = \frac{4150000}{21900000 - 2406360} = \frac{4150000}{19493640} \approx 0,21 \text{ року} \approx 2,5 \text{ місяці} \quad (5.7)$$

5.5. Розрахунок витрат на обслуговування та експлуатацію

Обслуговування мобільної заправної станції є важливою складовою її експлуатаційних витрат. Воно включає в себе регулярні перевірки, ремонт, заміну зношених частин та оновлення обладнання. Також необхідно враховувати витрати на обслуговування компресорів, охолоджувачів, систем безпеки та резервуарів для водню.

Технічне обслуговування кожного елементу (компресор, резервуари, охолоджувачі) проводиться після 5000 заправок. Вартість обслуговування одного елемента станції (за обсягом робіт або витратами на матеріали) для компресора становить 5000 грн за кожну перевірку. Вартість обслуговування одного охолоджувача та резервуара: 3000 грн за перевірку. Для обчислення витрат на обслуговування використаємо формули які показані нижче. Також в таблиці 5.1. показано деталізацію річних витрат на технічне обслуговування МВЗС.

Частота обслуговування:

$$N_{\text{service}} = \frac{\text{Загальна кількість заправок на рік}}{\text{Кількість заправок, після яких необхідне обслуговування}} \quad (5.8)$$

де N_{service} - частота обслуговування елементів,

Витрати на обслуговування компресора за рік:

$$C_{\text{compressor}} = N_{\text{service_compressor}} * \text{Варт. обл. компр.} \quad (5.9)$$

Витрати на обслуговування охолоджувачів за рік:

$$C_{\text{coolers}} = N_{\text{service_reservoirs}} * \text{Варт. обл. охолод.} \quad (5.10)$$

Витрати на обслуговування резервуарів за рік:

$$C_{\text{reservoirs}} = N_{\text{service_reservoirs}} * \text{Варт. обл. резервуара} \quad (5.11)$$

Загальні витрати на обслуговування станції:

Загальні витрати на обслуговування всіх елементів (компресорів, охолоджувачів та резервуарів) на рік:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{compressor}} + C_{\text{coolers}} + C_{\text{reservoirs}} \quad (5.12)$$

Таблиця 5.1. – Деталізація річних витрат на технічне обслуговування МВЗС

Параметр розрахунку	Значення	Одиниця виміру	Примітка / Пояснення
Загальна кількість заправок на рік	43800	заправок/рік	(120 автомобілів/день × 365 днів)
Кількість заправок для одного обслуговування	5000	заправок	-
Частота обслуговування (Nservice)	8.76	разів на рік	$(N_{\text{service}} = \frac{43800}{5000})$
Вартість обслуговування компресора за перевірку	5000	грн	-
Вартість обслуговування охолоджувача за перевірку	3000	грн	-
Вартість обслуговування резервуара за перевірку	3000	грн	-
Витрати на обслуговування компресора за рік	43800	грн/рік	(8.76×5000)
Витрати на обслуговування охолоджувачів за рік	26280	грн/рік	(8.76×3000)
Витрати на обслуговування резервуарів за рік	26280	грн/рік	(8.76×3000)
Загальні витрати на обслуговування станції за рік	96360	грн/рік	Сума всіх річних витрат на обслуговування елементів

Отже, загальні витрати на обслуговування всіх основних елементів мобільної заправної станції становитимуть 96 360 грн на рік.

5.6. Прогнозований прибуток

Прогнозований прибуток за 1 рік:

$$\text{Прогнозований прибуток} = \text{Дохід на рік} - \text{Операційні витрати} - \text{Інвестиційні витрати} \quad (5.13)$$

$$\text{Прогнозований прибуток} = 21900000 - 2406360 - 4150000 = 15343640 \text{ грн/рік} \quad (5.14)$$

Таблиця 5.2. Економічні показники проекту MB3C

Показник	Значення	Одиниця виміру	Примітка
Інвестиційні витрати	4150000	грн	Вартість придбання та монтажу обладнання.
Річні операційні витрати	2406360	грн/рік	Включають енергію, обслуговування, зарплату тощо.
Прогнозований річний дохід	21900000	грн/рік	Від продажу водню (120 заправок/день 5 кг/заправка 100 грн/кг)
Термін окупності проекту	2.5	місяці	Швидке повернення інвестицій.
Прогнозований річний прибуток	15343640	грн/рік	Висока фінансова привабливість проекту.

Висновки до розділу 5

У даному розділі представлений аналіз фінансової ефективності проекту мобільної водневої заправної станції. Були розраховані інвестиційні витрати, що охоплюють придбання та монтаж усіх необхідних компонентів. Деталізовано річні операційні витрати, які включають обслуговування, енергію та заробітну плату персоналу. На основі прогнозованої кількості заправок та вартості водню спрогнозовано річний дохід. Визначено ключові економічні показники: швидкий час окупності проекту (приблизно 2.5 місяці) та значний прогнозований річний прибуток. Економічний аналіз підтвердив високу фінансову привабливість та рентабельність проекту MB3C.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході даної роботи успішно реалізована мета розробки концепції мобільного водневого заправного комплексу на базі вантажного автомобіля для ефективного транспортування та заправки воднем.

В ході виконання роботи було:

1. Проаналізовано сучасний стан водневої інфраструктури та існуючі моделі мобільних заправних станцій, що підтвердило актуальність та необхідність створення подібного комплексу.
2. Розроблено конструктивну концепцію мобільної водневої заправної станції на базі вантажівки Scania P250 з інтегрованим 40-футовим ISO контейнером, включаючи детальну компоновку обладнання та розрахунки міцності елементів кріплення.
3. Виконано всі необхідні технічні розрахунки для визначення оптимальних параметрів технологічного обладнання, таких як об'єм резервуарів, потужність компресорів та охолоджувачів. Проведено розрахунок центру мас та оцінку стійкості автомобіля.
4. Детально опрацьовано питання безпеки, розроблено систему конструктивних, організаційних та операційних заходів, що відповідають міжнародним стандартам та національним нормативам, забезпечуючи мінімізацію ризиків при експлуатації комплексу, включаючи транспортування водню за типовим маршрутом.
5. Проведено комплексне економічне обґрунтування проекту, яке продемонструвало його високу інвестиційну привабливість, короткий термін окупності та значний прогнозований прибуток.

Запропонована концепція мобільного водневого заправного комплексу є технічно обґрунтованою, економічно доцільною та відповідає високим вимогам безпеки. Її реалізація дозволить значно розширити можливості використання водневого транспорту, вирішуючи проблему відсутності стаціонарної інфраструктури, та сприятиме подальшому розвитку екологічно чистого транспортного сектора в Україні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Затверджено наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 26.11.2014 № 341. [Електронний ресурс]. Доступно:
2. ДСТУ ISO/IEC 80079-20-1:2021. Вибухонебезпечні середовища. Частина 20-1: Характеристики матеріалів для класифікації газів та парів, методи випробувань (ISO/IEC 80079-20-1:2021, IDT). Затверджено наказом ДП «УкрНДНЦ» від 26.08.2021 № 322. [Електронний ресурс]. Доступно: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90647
3. НПАОП 0.00-1.76-15. Правила охорони праці під час експлуатації систем водневого господарства. Затверджено наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 02.06.2015 № 339. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0435-15#Text>
4. ADR (Європейська угода про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів). Актуальна редакція. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://unece.org/transport/dangerous-goods/adr-2023-agreement-concerning-international-carriage-dangerous-goods-road>
5. ATEX Directive 1999/92/EC. (Minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/92/oj>
6. ATEX Directive 2014/34/EU. (Equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34/oj>
7. ISO 11119. Gas cylinders – Refillable composite gas cylinders – Design, construction and test. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.iso.org/standard/83533.html> (актуальна редакція)
ISO 19880-1:2020. Gaseous hydrogen – Fuelling stations – Part 1: General

- requirements. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.iso.org/standard/74768.html>
8. ISO 22734:2019. Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial and commercial applications. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.iso.org/standard/70911.html>
9. NFPA 2:2023. Hydrogen Technologies Code. National Fire Protection Association. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=2>
10. SAE J2601:2021. Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. SAE International. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.sae.org/standards/content/j2601_202102/
11. UN/ECE Regulation No. 134. Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen fuelled vehicles. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://unece.org/transport/documents/2020/07/regulations/r134r2e> (актуальна редакція)
12. Air Liquide. Офіційний сайт компанії. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.airliquide.com/>
13. Burckhardt Compression. Офіційний сайт компанії (розділ Компресори для водню). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.burckhardtcompression.com/>
14. Cryostar. Офіційний сайт компанії (розділ Cryocooler). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.cryostar.com/>
15. Honeywell. Офіційний сайт компанії (розділ Safety Sensors for Hydrogen). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.honeywell.com/>
16. Hyvia. Спільне підприємство Renault Group та Plug Power. Офіційний сайт. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.hyvia.com/>
17. Linde. Офіційний сайт компанії. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.linde.com/>

18. Linde Engineering. Офіційний сайт компанії (розділ Hydrogen Dispensing Units). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.linde-engineering.com/>
19. Luxfer Gas Cylinders. Офіційний сайт компанії (розділ Type 3 Composite Cylinders). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.luxfercylinders.com/>
20. Nikola Corporation. Офіційний сайт компанії. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://nikolamotor.com/>
21. Plug Power. Офіційний сайт компанії. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.plugpower.com/>
22. Renault Group. Офіційний сайт компанії. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.renaultgroup.com/>
23. Scania. Офіційний сайт компанії (інформація про Scania P-Series). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.scania.com/>
24. Shell. Офіційний сайт компанії. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.shell.com/>
25. Siemens. Офіційний сайт компанії (розділ Sinamics S120). [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.siemens.com/>
26. ДСТУ 3772-98 (ГОСТ 20042-96) Засоби транспортні дорожні. Правила визначення мас і габаритних розмірів
27. Батищев І. М., Ткаченко С. В., Запорожець В. І. Теорія автомобіля: Навчальний посібник. Київ: Каравела, 2007.
28. Директива 2010/35/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 16 червня 2010 року про перевезення небезпечних вантажів.
29. ISO 19880-1:2020 Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements.
30. ДСТУ EN 15048-1:2017. Болти, гайки та шайби для сталевих конструкцій. Частина 1: Загальні вимоги (EN 15048-1:2016, IDT).[Електронний ресурс]. Доступно: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=76625

31. Перша Воднева Школа. Офіційний сайт. [Електронний ресурс].
Доступно: <https://fhs.in.ua/ua>

32. Імошенко М. «Використання зеленого водню як палива для автомобільного транспорту». Магістерська робота. Житомир. 2024.