

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи бакалавра

бакалавр

(освітній рівень)

на тему: Підбір та розрахунок технічних засобів автомобільного
транспорту для перевезення зрідженого водню

Виконав: студент 4 курсу, групи МН-41
спеціальності 275 «Транспортні технології»
(шифр і назва спеціальності)

Студент Кульчицька Г.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Гевко Б.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Плекан У.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Комар Р.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Зав. каф. Цьонь О.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет *інженерії машин, споруд та технологій*

Кафедра *Автомобілів*

Освітній рівень *бакалавр*

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність *275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)*

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри *Цьонь О.П.*

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кульчицькій Галині Андріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Підбір та розрахунок технічних засобів автомобільного транспорту для перевезення зрідженого водню*

керівник проекту (роботи) *Гевко Богдан Романович, к.е.н., доц.*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «23» січня 2025 року № 4/7-41

2. Термін подання студентом проекту (роботи) *27 червня 2025 р.*

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Вид вантажу для перевезення; маса вантажу для перевезення.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ 1. Аналіз об'єкту дослідження; 2. Заходи із удосконалення транспортного процесу

3. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Загальні висновки. Перелік посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Матеріали графічної частини – 10 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності,</i>	<i>Окіпний І.Б., к.т.н., доц. зав. каф.</i>		
<i>основи охорони праці</i>			

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент _____
(підпис)

Кульчицька Г.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Гевко Б.Р.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	6
ВСТУП	67
1. АНАЛІЗ ОБ’ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ	
1.1 Використання зрідженого водню в галузях народного господарства	9
1.2 Загальна характеристика об’єкту перевезення	11
1.3 Технічні засоби для підготовки водню до транспортування	16
1.4 Технологічні особливості зберігання та транспортування зрідженого водню	18
1.5 Висновки та постановка задач до кваліфікаційної роботи бакалавра	21
2 ЗАХОДИ ІЗ УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ	
2.1 Аналіз завдання на проектування та розроблення маршруту перевезення	24
2.2 Підбір технічних засобів для транспортування вантажу	30
2.3. Заходи із підвищення ефективності перевезення зрідженого водню	34
2.4 Дозвільні документи при перевезенні зрідженого водню в Україні	40
3 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	
3.1 Техніка безпеки при перевезенні зрідженого водню	43
3.2 Забезпечення безпеки при перевантаженні зрідженого водню	47

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	52

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена дослідженню організації та удосконалення процесів транспортування зрідженого водню – перспективного енергоносія, який набуває все ширшого застосування в різних галузях народного господарства, зокрема в енергетиці, транспорті та промисловості. У першому розділі роботи здійснено комплексний аналіз об'єкта дослідження: розглянуто напрями використання зрідженого водню, наведено його загальну характеристику як небезпечного вантажу, охарактеризовано технічні засоби, що використовуються для підготовки водню до перевезення, а також технологічні особливості його зберігання і транспортування. Узагальнення результатів дозволило сформулювати задачі кваліфікаційної роботи.

У другому розділі представлено практичні заходи з удосконалення транспортного процесу. Проведено аналіз умов і обмежень при проектуванні маршруту перевезення, здійснено підбір відповідних транспортних засобів і спеціального обладнання. Запропоновано заходи з підвищення ефективності транспортування зрідженого водню, включно з оптимізацією логістики, забезпеченням економічної доцільності та підвищенням енергоефективності. Окрему увагу приділено питанням дозвільної документації, яка регламентує перевезення небезпечних вантажів на території України.

У третьому розділі розглянуто аспекти безпеки життєдіяльності та охорони праці. Описано основні вимоги техніки безпеки при транспортуванні зрідженого водню, а також заходи з попередження аварійних ситуацій під час перевантаження та обробки вантажу. Робота містить пропозиції щодо забезпечення безпечних умов праці водіїв, операторів та інших учасників транспортного процесу.

Отримані результати можуть бути використані у практичній діяльності підприємств, що займаються транспортуванням водню, а також у подальших наукових дослідженнях у сфері водневої енергетики та транспортної логістики.

ВСТУП

Перевезення зріджених газів, зокрема водню, є надзвичайно складним і технологічно відповідальним процесом. Це обумовлено як фізико-хімічними властивостями самого водню, так і суворими вимогами до безпеки, матеріалів, транспортувальних ємностей та інфраструктури. Водень має надзвичайно низьку температуру кипіння – близько мінус 253 градусів Цельсія, що вимагає застосування криогенних технологій і спеціальних резервуарів з високоефективною теплоізоляцією. Через надзвичайно малу молекулярну масу водень здатен проникати через мікроскопічні пори в матеріалах, що робить його важким для утримання без витоків. Крім того, водень має широку межу вибухонебезпечної концентрації в повітрі – від 4 до 75 відсотків, що робить будь-який витік потенційно катастрофічним.

Особливу небезпеку становить водневе крихке руйнування металів, коли атоми водню, проникаючи у структуру матеріалу, спричиняють мікротріщини і призводять до руйнування конструкцій. Це обмежує вибір матеріалів, придатних для зберігання і транспортування водню. Найчастіше використовуються спеціальні сплави нержавіючої сталі або композитні балони, які мають високу стійкість до таких впливів. Також важливим є постійний контроль тиску і температури усередині транспортних ємностей. Це вимагає складної автоматизованої системи моніторингу з датчиками і блоками аварійного відключення.

Технічно транспортування водню здійснюється або в зрідженому вигляді при наднизьких температурах, або в стисненому вигляді під тиском до 700 бар. В обох випадках потрібне спеціалізоване обладнання – або криоцистери, або балони високого тиску. Всі види транспорту, що використовуються для перевезення водню, повинні проходити сертифікацію на відповідність міжнародним стандартам, таким як ADR для автотранспорту, RID для залізничного транспорту, IMDG для морських перевезень. Також необхідна

спеціальна підготовка персоналу, який має здійснювати навантаження, розвантаження та супровід вантажу.

З огляду на високий рівень небезпеки, перевезення водню часто обмежується в межах населених пунктів, а маршрути узгоджуються з органами безпеки. Крім того, інфраструктура для перевезення водню ще недостатньо розвинена: є обмежена кількість терміналів, станцій для заправки і зберігання, бракує спеціалізованого транспорту, що стримує масштабне використання водню як енергоресурсу.

З економічної точки зору транспортування водню є дуже витратним. Це пов'язано з високою вартістю обладнання, необхідністю підтримки температурного і тискового режиму, втратами при випаровуванні, а також з вимогами до безпеки. Як альтернатива розглядається транспортування водню у вигляді хімічних сполук – аміаку чи метанолу – з подальшим вивільненням на місці споживання. Також розробляються нові види контейнерів з композитних матеріалів, які мають меншу вагу і вищу стійкість до дії водню.

Попри всі складнощі, водень залишається одним із найперспективніших енергоносіїв майбутнього, і подолання логістичних бар'єрів у його перевезенні є стратегічно важливим завданням для розвитку водневої економіки.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Використання зрідженого водню в галузях народного господарства

Зріджений водень сьогодні дедалі активніше інтегрується в ключові галузі народного господарства як стратегічне джерело чистої енергії, технологічна сировина та транспортне паливо. Його застосування є важливим компонентом у переході до низьковуглецевої економіки, особливо в умовах глобального потепління, зростаючих вимог до екологічності виробництв та пошуку альтернатив традиційним енергоресурсам. Завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям зріджений водень відкриває нові можливості у енергетиці, транспорті, хімічній промисловості, металургії, агропромисловому комплексі та сфері комунального обслуговування.

Насамперед, водень відіграє визначальну роль в енергетичному секторі як джерело енергії для паливних елементів. У зрідженому вигляді водень використовується для живлення стаціонарних електрогенераторів, здатних забезпечувати електроенергією промислові об'єкти, об'єкти критичної інфраструктури, а також окремі житлові квартали. Перевага таких систем — екологічність: викидами є лише водяна пара. Використання зрідженого водню як акумулятора енергії особливо актуальне в поєднанні з відновлюваними джерелами енергії — вітровими та сонячними електростанціями. Надлишок енергії в періоди пікового вироблення можна витрачати на електроліз води з подальшим зрідженням водню, а потім використовувати цей водень у періоди енергетичного спаду.

У транспортній галузі зріджений водень набуває популярності як паливо для водневих автомобілів, автобусів, поїздів, морських суден і навіть літаків. На відміну від стисненого водню, зріджений має більшу енергетичну щільність за об'ємом, що дозволяє збільшити запас ходу транспортного засобу та зменшити об'єм паливної системи. У країнах з розвиненою водневою інфраструктурою (наприклад, Японія, Німеччина, Південна Корея) активно впроваджуються

мережі водневих заправок, де зріджений водень зберігається у криогенних резервуарах і заправляється у паливні баки транспортних засобів.

Хімічна промисловість — одна з найстаріших сфер використання водню, де він є базовим сировинним компонентом для синтезу аміаку, метанолу, спиртів, вуглеводнів, добрив та полімерів. Зріджений водень у цьому випадку забезпечує централізоване постачання підприємств, де він після випаровування знову переводиться у газову форму для хімічного синтезу. Завдяки високій чистоті та стабільності параметрів зріджений водень широко застосовується в процесах гідрування, гідрокрекінгу та очищення нафтових фракцій.

У металургійній галузі водень розглядається як заміна вуглецю у відновлювальних процесах виробництва сталі. Технологія прямого відновлення заліза за допомогою водню дозволяє суттєво знизити викиди вуглекислого газу, що робить сталеве виробництво екологічнішим. Використання саме зрідженого водню у цьому контексті дозволяє забезпечити великомасштабне зберігання і стабільне живлення плавильних агрегатів.

У сільському господарстві водень у рідкому вигляді може застосовуватись як джерело енергії для автономних систем на фермах, теплицях або сільських електростанціях. Паливні елементи на водні використовуються для живлення сільськогосподарської техніки, поливних систем та холодильного обладнання. Окрім того, зріджений водень забезпечує централізоване постачання сировини для виробництва азотних добрив, що є критично важливим фактором підвищення врожайності.

В комунальному секторі зріджений водень використовується як джерело тепла та електроенергії у водневих котельнях і генераторах, особливо в районах, віддалених від централізованого енергопостачання. Паливні елементи, що працюють на водні, використовуються у житлових комплексах, лікарнях, освітніх закладах як резервні або основні джерела енергії.

Варто також відзначити застосування зрідженого водню в космічній та авіаційній галузях. У багатьох моделях ракетно-космічної техніки (наприклад, у ракетноносіях Falcon, Delta, Ariane) рідкий водень використовується як головний

компонент пального у зв'язці з рідким киснем. Висока питома енергія водню забезпечує велику ефективність згоряння і виведення корисного навантаження на орбіту. Крім того, ведуться активні дослідження водневого авіаційного палива для цивільної авіації, де основною задачею є поєднання високої енергоефективності з екологічністю.

Таким чином, зріджений водень є багатоцільовим ресурсом, здатним задовольнити потреби численних галузей народного господарства. Його використання відкриває шлях до зниження залежності від викопного палива, зменшення рівня викидів парникових газів, підвищення енергетичної безпеки та ефективності виробництв. Водночас повноцінне розгортання водневої економіки потребує розвитку інфраструктури, стандартизації технологій зберігання і транспортування, а також міжгалузевої координації. У перспективі зріджений водень здатен стати основою нової енергетичної парадигми — чистої, мобільної та відновлюваної.

1.2 Загальна характеристика об'єкту перевезення.

Водень — це найпростіший, найлегший і водночас один із найперспективніших хімічних елементів, який займає центральне місце у сучасних дослідженнях в галузі альтернативної енергетики. Його унікальні властивості роблять його привабливим джерелом енергії, однак ці ж властивості створюють значні труднощі при зберіганні, обробці та транспортуванні. У процесі транспортування водню потрібно враховувати низку фізико-хімічних, термодинамічних та безпекових характеристик, які прямо впливають на вибір технологій і обладнання.

Водень — це перший елемент періодичної системи, атом якого складається лише з одного протона та одного електрона. Це найпоширеніший елемент у Всесвіті, хоча в природі на Землі вільний водень зустрічається рідко. У промисловості він зазвичай добувається шляхом реформінгу природного газу, електролізу води, термохімічного розщеплення або біологічними методами.

Водень має унікальні фізичні характеристики: його молекула має найменший розмір, а густина — одна з найнижчих серед усіх газів. У стандартних умовах водень є безбарвним, без запаху та смаку газом, у 14 разів легшим за повітря. Температура його кипіння становить $-252,87\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура плавлення — $259,14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це означає, що переведення водню в рідкий стан вимагає екстремально низьких температур, що створює великі труднощі при транспортуванні.

Однією з ключових властивостей водню є його надзвичайна летючість та здатність до дифузії. Через дуже малий розмір молекул водень здатен проникати через мікротріщини в матеріалах, що робить його складним для ізоляції. Це явище вимагає використання спеціальних сплавів, ущільнювальних матеріалів і складних багатошарових оболонок при створенні резервуарів для зберігання і транспортування. Навіть мінімальні витіки водню небезпечні, оскільки водень легко змішується з повітрям і утворює вибухонебезпечні суміші. Межі займистості водню в повітрі становлять від 4% до 75% за об'ємом, а температура самозаймання — приблизно $585\text{ }^{\circ}\text{C}$. Окрім цього, полум'я водню майже невидиме для людського ока, що суттєво ускладнює виявлення пожежі.

Ще одним аспектом, який впливає на умови транспортування водню, є так зване «водневе крихке руйнування» — процес, при якому атоми водню проникають у металеві структури і призводять до утворення мікротріщин, зниження міцності і навіть раптового руйнування конструкцій. Найбільш вразливими до такого ефекту є високоміцні сталеві сплави. Це означає, що традиційні матеріали, які використовуються для транспортування інших газів, не завжди придатні для водню. Тому необхідно застосовувати нержавіючу сталь певних марок, алюмінієві сплави, титан, а також композитні матеріали, стійкі до дифузії водню та його агресивної дії.

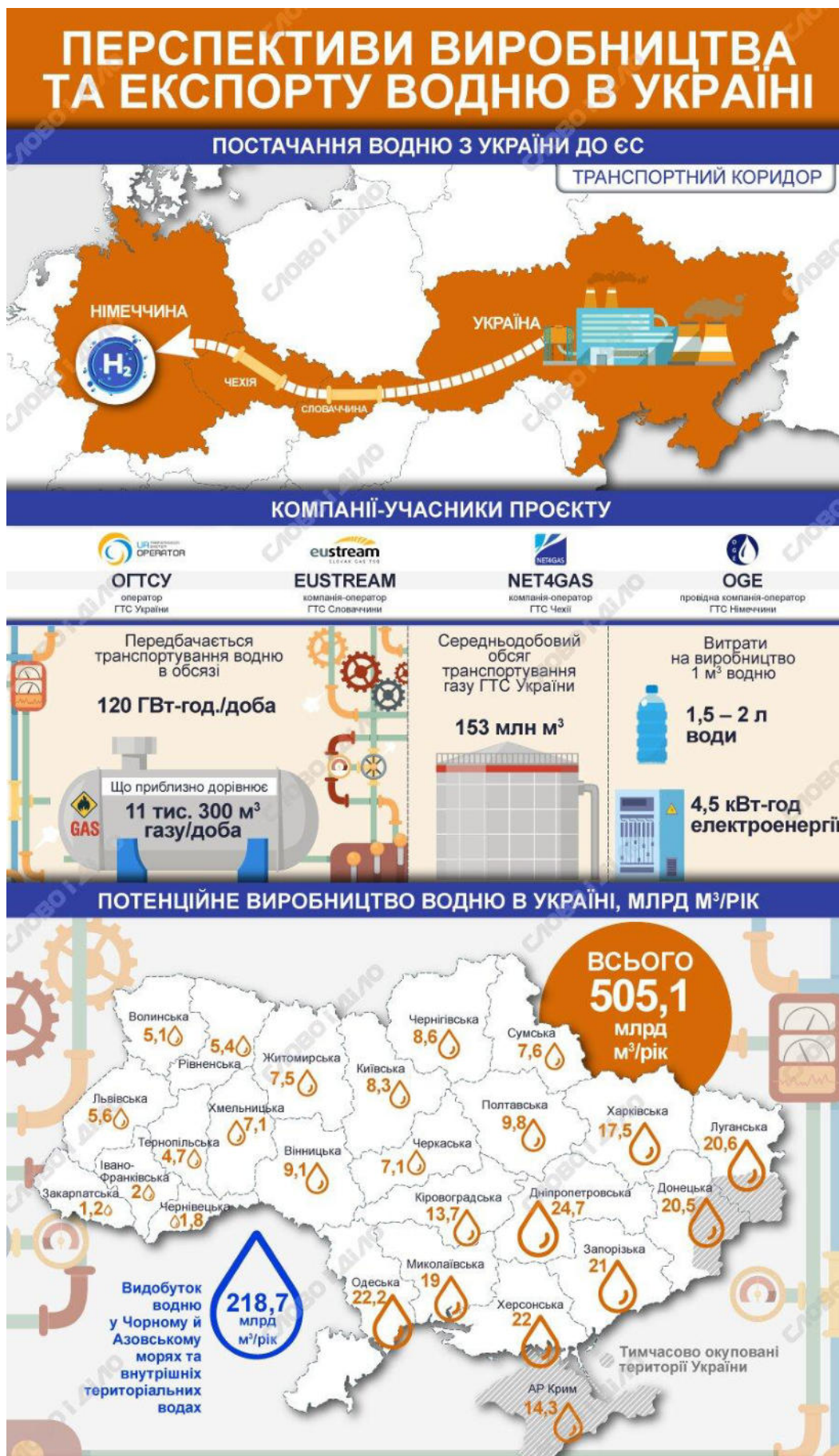


Рисунок 1.1. Перспективи виробництва та експорту водню в Україні

Залежно від обраного методу транспортування водню – в рідкому або стисненому стані – виникають різні вимоги до обладнання. У рідкому вигляді водень займає значно менший об'єм, але потребує наднизьких температур і відповідних кріогенних установок. У стисненому вигляді водень транспортують під тиском до 700 бар, що вимагає балонів високого тиску, оснащених системами контролю герметичності, температури та тиску. При будь-якому з цих способів потрібно враховувати коефіцієнти теплового розширення, випаровування і можливі втрати через «кипіння» (boil-off), особливо при тривалому транспортуванні.

Варто також звернути увагу на теплотворну здатність водню. За масою вона вища, ніж у будь-якого іншого палива — близько 120 МДж/кг, але через низьку густину водень має дуже малу енергетичну щільність за об'ємом, що знижує ефективність його транспортування у великих масштабах без спеціального ущільнення або зрідження. Це ще один аргумент на користь використання дорогих і високотехнологічних засобів доставки.

Крім безпосередньо фізичних властивостей, важливе значення мають термодинамічні та реакційні характеристики водню. Наприклад, водень активно реагує з киснем, галогенами, азотом (за високих температур) і навіть з деякими металами. Тому будь-яке обладнання, яке контактує з воднем, повинно бути не тільки механічно міцним, але й хімічно стійким. Водень має дуже високу швидкість полум'яного розповсюдження і низьку енергію займання, що посилює ризик вибухів при неправильному поводженні з ним.

Інфраструктура транспортування водню перебуває на стадії активного розвитку. Серед сучасних методів транспортування використовуються автомобільні цистерни, залізничні вагони, морські судна-газовози, а також водневі трубопроводи. Кожен із цих способів має свої особливості, зумовлені властивостями водню. Наприклад, трубопроводи потребують спеціальних внутрішніх покриттів, а морські перевезення — кріогенних контейнерів зі складною системою регулювання температури. У випадку використання

автомобільного транспорту головним викликом є забезпечення надійного захисту від механічного пошкодження цистерн і ефективного теплового захисту.

Таким чином, фізико-хімічні властивості водню – зокрема його летючість, здатність до проникнення крізь матеріали, вибухонебезпечність, низька температура кипіння та вплив на метали – є вирішальними факторами, які визначають вимоги до технологій транспортування. Ефективне і безпечне транспортування водню можливе лише за умови комплексного врахування цих характеристик, ретельного підбору матеріалів, використання спеціального обладнання та дотримання міжнародних стандартів. Незважаючи на складність, водень продовжує залишатися ключовим елементом у переході до відновлюваної енергетики, і подолання технічних перешкод у його транспортуванні є важливим етапом на цьому шляху.

За міжнародною класифікацією водень відноситься до небезпечних вантажів, Клас 2 (ADR-2) газу.

До цього класу належать чисті газу, суміші газів, суміші одного або декількох газів з одним або декількома іншими речовинами та вироби, що містять такі речовини.

Газом є речовина, яка:

- а) при температурі 50°C має тиск пари більше 300 кПа (3 бар);
- б) є повністю газоподібним при температурі 20°C і нормальному тиску 101,3 кПа.

Небезпека газів: задушливі газу - розчиняють або заміщають в атмосфері кисень; легкозаймисті - які при температурі 20°C і нормальному тиску 101,3 кПа є займистими в суміші з повітрям; окислюють - можуть, звичайно за допомогою виділення кисню, викликати спалах або підтримувати горіння інших матеріалів у більшій мірі, ніж повітря; токсичні - надають настільки сильний токсичний або корозійний вплив на людей, що становлять небезпеку для їх здоров'я; корозійні - створюють руйнівний вплив на шкіру, очі або слизові оболонки.

Приклади: газові запальнички, стислі і зріджені гази в балонах, або в судинах Дьюара: водень, пропан, бутан, лаки і дезодоранти в аерозольній упаковці, стислі і понижені охолоджені гази в балонах, або в судинах Дьюара: повітря, вуглекислий газ, азот, кисень, хлор, іприт.

1.3 Технічні засоби для підготовки водню до транспортування

Підготовка водню до транспортування є складним технологічним процесом, що передбачає використання спеціалізованих технічних засобів для його зрідження, зберігання та завантаження у транспортні ємності. Оскільки водень є найменш густим, високореактивним і вибухонебезпечним газом, усі операції з ним потребують надзвичайно точного контролю, надійного обладнання та дотримання суворих норм безпеки. Особливої уваги потребує процес зрідження водню, який є енергомістким і вимагає складного кріогенного обладнання.

Зрідження водню відбувається за температури приблизно -253°C (20 K). Для досягнення таких температур використовуються багатоступеневі системи охолодження, які включають попереднє стиснення водню, охолодження в теплообмінниках, а потім поступове зниження температури з використанням ефекту Джоуля-Томсона. На кожному етапі температурний режим контролюється точними сенсорами. Найпоширенішим промисловим обладнанням для цього є водневі скраплювачі (hydrogen liquefiers), які працюють за допомогою холодильних машин на основі зрідженого гелію. Такі установки, як правило, складаються з компресорного блоку, кріогенного теплообмінника, системи попереднього охолодження та секції відбору пара.

Значну роль у процесі зрідження відіграють турбодетандери – пристрої, які розширюють газ, знижуючи його температуру без істотної втрати тиску. Вони забезпечують високий коефіцієнт корисної дії, стабільність процесу охолодження та безперервну роботу кріогенної системи. Також для ефективного зрідження водню застосовують магнітні або надпровідникові охолоджувачі, які

дозволяють знизити споживання енергії в умовах великомасштабного виробництва.

Після зрідження водень накопичується у спеціальних криогенних резервуарах з подвійною стінкою та вакуумною теплоізоляцією. Такі резервуари виготовляють із нержавіючої сталі або алюмінієвих сплавів, стійких до дії водню. Для зменшення теплових втрат між стінками застосовується перліт або багатошарова вакуумна ізоляція (MLI). Конструкція резервуару передбачає систему відведення надлишкового тиску, датчики температури, тиску, рівня рідини, а також запобіжні клапани.

Завантаження зрідженого водню у транспортні ємності – автоцистерни, залізничні вагони або спеціальні контейнери – здійснюється через герметизовані з'єднання. Ці системи повинні гарантувати абсолютну герметичність, швидке з'єднання та роз'єднання, а також контроль за тиском у реальному часі. Найчастіше застосовуються так звані сухі з'єднання (dry-break couplings), що унеможливають витік навіть при аварійному роз'єднанні.

Контроль за параметрами під час завантаження здійснюється автоматизованими системами, до складу яких входять блоки керування, датчики, регулятори потоку та аварійна сигналізація. Для безпечної роботи операторів передбачено дистанційне керування процесами, а всі операції фіксуються в електронному журналі для подальшого аналізу. Відповідне програмне забезпечення дозволяє здійснювати діагностику системи в режимі реального часу, оцінювати параметри потоку, температуру, залишковий газ тощо.

З метою зниження енергоспоживання сучасні установки для зрідження водню часто оснащуються системами рекуперації тепла та утилізації надлишкової енергії. Це дозволяє не лише зменшити витрати, але й підвищити екологічність виробництва. У ряді випадків використовується інтеграція таких установок із джерелами відновлюваної енергії – сонячними або вітровими електростанціями.

Технічні засоби для зрідження та завантаження водню є складними інженерними комплексами, які потребують високого рівня точності, стійкості

матеріалів, глибоких знань у галузі термодинаміки, кріогеніки та автоматизації. Подальший розвиток водневої енергетики напрому залежить від вдосконалення таких систем, їх енергоефективності, надійності та безпечності.



Рисунок 1.2 – Промислова установка для виробництва водню із природного газу

1.4 Технологічні особливості зберігання та транспортування зрідженого водню

Ось повністю переформульований текст із дотриманням наукового стилю:

Зберігання та транспортування зрідженого водню відіграють ключову роль у забезпеченні його безпечного, ефективного, масового та економічного використання. Саме ці процеси становлять основу технічної реалізації водневої енергетики й визначають успішність впровадження технологій на його основі.

Системи зберігання та транспортування зрідженого водню поділяються на два основні напрями: контейнерне зберігання і транспортування трубопроводами. У контейнерному варіанті зазвичай використовують сферичні або циліндричні кріогенні резервуари. Для переміщення рідкого водню

застосовують спеціалізовані транспортні засоби, зокрема автоцистерни, залізничні вагони-кріоцистерни та морські судна з відповідним обладнанням.

У процесі транспортування необхідно враховувати не лише стандартні механічні навантаження — вібрації, удари, інерційні сили — але й специфічні характеристики самого водню. Зокрема, надзвичайно низька температура його кипіння (приблизно 20,3 К), незначна теплота випаровування та висока схильність до випаровування ускладнюють завдання зберігання. Через ці чинники резервуари потребують ефективної теплоізоляції та застосування передових технологій охолодження. За відсутності належної термоізоляції або систем охолодження всередині резервуару зростає тиск, що може спричинити аварійну ситуацію, зокрема розгерметизацію або вибух.

Технічні засоби зберігання зрідженого водню переважно базуються на комбінації пасивної теплоізоляції — зазвичай із багатошаровою вакуумною структурою — та активного охолодження. Це дозволяє мінімізувати тепловтрати і стабілізувати умови зберігання. Такий підхід знижує ризик закипання рідини, підвищення тиску та витоків, забезпечуючи тривале безпечне зберігання водню.

Завдяки своїм фізико-хімічним властивостям зріджений водень має низку переваг порівняно з газоподібним воднем високого тиску. Його щільність становить приблизно 70,8 кг/м³, що у кілька разів більше, ніж щільність водню, збереженого за тиску 20, 35 або 70 МПа. Це робить рідкий водень надзвичайно ефективним варіантом для великомасштабного транспортування та зберігання, що особливо важливо для індустріального та енергетичного використання.

Ще однією суттєвою перевагою є низький робочий тиск у резервуарах для зберігання зрідженого водню. У більшості випадків він не перевищує 1 МПа, що істотно знижує потенційні ризики вибуху або розгерметизації в порівнянні з системами зберігання стисненого газу. Низький тиск також спрощує конструкцію резервуарів, зменшує навантаження на матеріали і полегшує умови експлуатації, особливо в густонаселених міських районах із високими вимогами до безпеки та обмеженою площею для розміщення інфраструктури.

Важливою характеристикою зрідженого водню є висока чистота, яку можна досягти під час випаровування. Це має особливе значення для галузей, що потребують ультрачистого водню, зокрема виробництва напівпровідників, оптичного волокна, кремнієвих пластин, а також у сфері паливних елементів. Випарений водень зі збережених рідких резервуарів часто має чистоту, яка відповідає або навіть перевищує найсуворіші технічні стандарти.

Попри переваги, зрідження водню вимагає значних енергетичних та фінансових затрат. Станом на 2021 рік більшість ключових компонентів обладнання для зрідження водню, таких як кріобокси, залишались у сфері монополії закордонних виробників. Через обмеження експорту та залежність від імпорту технологій будівництво вітчизняних заводів зі зрідження водню вимагало великих інвестицій. До того ж, через обмежений попит на внутрішньому ринку, виробничі потужності поки що розвиваються повільно, що підвищує питомі витрати енергії на виробництво одиниці зрідженого водню в порівнянні з альтернативними формами зберігання.

Ще одним недоліком є випаровування водню в процесі зберігання та транспортування, зумовлене неминучими тепловими втратами. Сьогодні для зниження надлишкового тиску в резервуарах застосовується вентиляція з виведенням газу в атмосферу, що призводить до втрат. У перспективі необхідно впроваджувати технології рекуперації випареного газу, які дозволять повторно використовувати частину втраченої енергії та зменшити загальні збитки.

Серед виробників технічних рішень у сфері зрідженого водню варто виділити компанію *HL Cryogenic Equipment*, засновану у 1992 році. Вона спеціалізується на виробництві високоякісних вакуумноізольованих трубопроводів, шлангів та кріогенного обладнання для транспортування зріджених газів, включно з рідким воднем. Їхня продукція використовує багатошарову термоізоляцію, високий вакуум та сучасні технології герметизації, що забезпечують ефективну роботу навіть в умовах наднизьких температур.

У підсумку, зберігання та транспортування рідкого водню — це високотехнологічний процес, який вимагає ретельного технічного супроводу,

спеціалізованого обладнання та дотримання суворих стандартів безпеки. Попри високу вартість виробництва та енергозатратність, зріджений водень є перспективною формою зберігання водневої енергії, яка дозволяє вирішити ключові виклики масштабного впровадження водневих технологій у промисловість, енергетику й транспорт.

1.5 Висновки та постановка задач до кваліфікаційної роботи бакалавра

Ключові проблеми при транспортуванні зрідженого водню включають вимогу до критично низьких температур, втрати через випаровування, тріщини та знос матеріалів, проникнення та витікання, накопичення тиску, небезпеки безпеки, такі як займисті або невидимі полум'я, обмежену інфраструктуру, високі витрати та енергоспоживання для охолодження. Додатково важливими є регулювання виведення і забруднення навколишнього середовища, механічні напруження і складність регуляцій. Можливо, буде корисно переглянути актуальну інформацію щодо нових інцидентів чи інновацій.

Основні проблеми при транспортуванні зрідженого водню включають наднизькі температури, втрати через випаровування, тріщини матеріалів, проникнення і витікання, накопичення тиску. Також важливі питання безпеки, такі як займання і невидимі полум'я, обмежена інфраструктура, високі витрати та енергоспоживання на охолодження. Крім того, є регуляторні складнощі і екологічні наслідки, наприклад від виведення газів. Можливо, варто перевірити актуальну інформацію щодо інцидентів або розробок у перевезенні водню.

Транспортування зрідженого водню є складним через ряд факторів. Однією з основних проблем є втрати через випаровування, що зумовлюють необхідність управління тиском і вентиляцією, як це було випадку з інцидентом із Suiso Frontier. Більш того, витіки і проникнення водню можуть привести до небезпеки займання, оскільки водень має широкий вибуховий діапазон. Проблеми з матеріалами та їх зношуванням також займають важливе місце.

Високі витрати на інфраструктуру та споживану енергію ставлять додаткові складнощі у транспортуванні.

Перевезення зрідженого водню супроводжується низкою складних технічних і безпекових проблем. Насамперед ідеться про кріогенні умови: рідкий водень існує лише за температур близько $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, має дуже малу теплоту пароутворення й легко закипає. Навіть при найкращій ізоляції під дією зовнішнього тепла утворюється boil-off-gas; у великих суднових танках щоденні втрати оцінюють приблизно в 0,5 % маси, а для автоцистерн і при переливанні вони можуть сягати 2–5 %. Щоб обмежити ці втрати, застосовують пасивну вакуумно-багатошарову ізоляцію й активне охолодження або реліквіфікацію, проте це ускладнює конструкцію й підвищує енергоспоживання; сучасні дослідження пропонують «zero-boil-off» схеми з додатковими холодильними ступенями.

Уся пара, що утворюється в дорозі, підвищує тиск у резервуарах. Якщо арматура або система спалювання пари відмовляють, наслідки можуть бути миттєвими: інцидент на першому у світі водневому танкері «Suiso Frontier» спричинив вихід полум'я через дефектний клапан і продемонстрував, наскільки критичною є надійність систем відведення та спостереження.

Ризик витоків підсилюється надзвичайною проникністю молекул водню. Газ легко проходить крізь мікропори й ущільнення, а ледь помітні струмені можуть утворювати вибухонебезпечні хмари; при цьому полум'я майже невидиме й потребує спеціальних ультрафіолетових або ІЧ-детекторів. Широка межа займистості (4–75 % у повітрі) та дуже мала енергія запалювання додають складності під час навантаження й розвантаження.

Окрема проблема — воднева крихкість металів. Дифузія атомів водню в стінки резервуарів або трубопроводів знижує їхню ударну в'язкість і викликає мікротріщини, що можуть призвести до раптового руйнування. Саме тому для кріогенних цистерн, вентилів і труб використовують спеціальні аустенітні сталі, алюмінієві або композитні матеріали, стійкі до водневого впливу. Перевірка

зварних швів і контроль мікроструктури є обов'язковими під час кожного технічного огляду.

Енергетична й економічна сторона не менш критична. Ліквіфікація сама по собі «з'їдає» до третини енергетичного вмісту водню, а високі вимоги до ізоляції, датчиків і систем рекуперації піднімають вартість обладнання та логістики. Інфраструктура (кріоцистерни, заправні станції, судна-газовози) залишається обмеженою й дорогою, а нормативні процедури щодо небезпечних вантажів подовжують час та маршрут доставки.

Отже, при транспортуванні зрідженого водню стикаються з п'ятьма ключовими викликами: кріогенними втратами та підвищенням тиску, відмовами арматури і систем спалювання пари, витоками з «невидимим» полум'ям, водневою крихкістю матеріалів і значними енергетичними та капітальними витратами. Подальший розвиток водневої логістики залежить від удосконалення ізоляційних технологій, переходу до нульових boil-off схем, ширшого застосування корозійностійких сплавів і створення стандартизованої глобальної інфраструктури. В межах цієї кваліфікаційної роботи необхідно розробити маршрут перевезення зрідженого водню або розглянути варіант перевезення стисненого водню автомобільним транспортом за маршрутом Київ-Львів.

2 ЗАХОДИ З УДОСКОНАЛЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ

2.1 Аналіз завдання на проектування та розроблення маршруту перевезення

Перевезення водню здійснюється різними засобами для рідкого водню (LH2) та стисненого газу (GH2). Сюди входять транспортні засоби (рис. 2.1), контейнери, засоби для заправки та безпеки, як-от валви, труби, компресори та кріогенне обладнання. Для рідкого водню використовують спеціальні судна, наприклад Suiso Frontier та Kawasaki. Компресорні станції для стисненого водню, цистерни типу IV, трубопроводи з полімерними покриттями та заправки з високим тиском — усі ці технології використовуються для забезпечення ефективного і безпечного транспортування водню.

При транспортуванні водню використовують різноманітні технічні засоби: детектори водню, палаючі датчики, запобіжні клапани, вакуумні ізольовані труби, гнучкі шланги, швидкороз'ємні сухі сполучення та якісні з'єднувачі, наприклад, для заправки водневих автомобілів ISO 17268. Додатково, використовуються кріогенні поршневі насоси, насосні підводні системи. Важливо зазначити новітні технології, як-от трюкачами для рідкого водню (наприклад, Suiso Frontier). Потрібні додаткові джерела для цитування цих засобів.

Для перевезення водню залучають цілий комплекс технічних засобів, які відрізняються залежно від його фізичного стану й маршруту доставки. Стиснений газ транспортують у трейлерах-«трубовозах», складених із легких композитних балонів типу IV, що витримують робочий тиск 520–700 бар, а нові моделі здатні зберігати водень при 931 бар і одразу заправляти автомобільні баки без проміжного компресування. Балони виконують із вуглецевого волокна з полімерною підкладкою, щоб уникнути водневої крихкості, і обладнують запірно-регулювальними вентилями, манометрами, запобіжними мембранами та швидкорознімними сухими з'єднаннями, сертифікованими за ISO 11548/17268.



Рисунок 2.1. Автомобіль з причіпом для перевезення стисненого водню

Для стаціонарного накопичення у нафтопереробці й на водневих заправках застосовують модульні банки таких самих балонів або товстостінні сталеві резервуари типів I-II, зібрані в касети.

Стиснений водень потрібно довести до тиску 350 або 700 бар перед заправкою транспорту; для цього на станціях встановлюють безмастильні діафрагмові й поршневі компресори. Типова схема складається з двоступеневого діафрагмового агрегата, що піднімає тиск із 20 до 350 бар, і сухого поршневого дожимача до 700 бар; така комбінація дає високий ККД і знижує ризик контамінації мастилом. Підготовлений газ акумулюють у буферних ємностях, а перед видачею охолоджують у теплообмінниках-прекулерах, щоб запобігти перегріву штуцера автомобільного бака.

Для рідкого водню використовують двостінні кріоцистерни із вакуумно-багатошаровою ізоляцією, виготовлені зі сталі 304/316L або алюмінієвих сплавів. Дорожні цистерни типу MC-338 або їхні сучасні аналоги від Polar та Heil мають об'єм 40–60 м³, утримують температуру –253 °C і обмежують щоденні втрати кипіння до 0,3–0,5 % завдяки додатковим «getter»-системам, що поглинають залишкові гази у міжстінному просторі. Ті самі принципи реалізовано у залізничних вагонах-термосах. У морських перевезеннях застосовують вакуумно-ізольовані сферичні або циліндричні танки: перший демонстраційний танкер «Suiso Frontier» має 1250 м³ LН₂ і активну систему реліквіфікації, яка повертає boil-off-gas у вантаж, підтримуючи нульові втрати під час 9000-км рейсів). Крупніші судна Kawasaki розробляє на базі власного «Cargo Containment System» з багатошаровою вакуумною ізоляцією й здвоєними бар'єрами безпеки.

Операції навантаження й розвантаження здійснюють кріогенні поршневі або турбопомпи з магнітними приводами, здатні подавати до 60 т LН₂ за годину без контакту ущільнень із рідиною. Жидкий водень перекачують через жорсткі вакуумно-ізольовані трубопроводи або гнучкі шланги з багатошаровою теплоізоляцією; подібні VIP-лінії випускають Demaco, HQHP й HL Cryogenic Equipment, гарантуючи теплоприплив менше 1 Вт/м. Арматура резервуарів

включає подвійні запобіжні клапани, вибухові мембрани, клапани відведення boil-off-gas і сенсори рівня, тиску й температури, а швидкорознімні фланці «dry-break» з азотним продуванням запобігають утворенню вибухонебезпечних сумішей біля стику.

Для трубопровідного транспорту застосовують вуглеце-марганцеві або нікель-леговані сталі з внутрішнім полімерним покриттям, щоб зменшити дифузію водню й водневу крихкість. Глибоке катодне захисне заземлення, безконтрольне падіння тиску й дистанційний моніторинг акустичними волоконними сенсорами забезпечують довгострокову герметичність і раннє виявлення витоків. Компресорні станції оснащують безмасляними турбокомпресорами чи електрохімічними «ionic-compressors», здатними перекачувати водень до 10 МПа при ККД понад 80 %.

Допоміжне обладнання охоплює воднево-чутливі інфрачервоні й УФ-детектори полум'я, електрохімічні й напівпровідникові датчики H_2 у повітрі, а також цифрові системи SCADA, що ведуть безперервний облік тиску, температури та витрат. Таким чином, комплекс технічних засобів — від композитних трубовозів і кріогенного рухомого складу до вакуумно-ізольованих трубопроводів, компресорів та високоточних систем контролю — формує безпечний і ефективний ланцюг транспортування водню у стисненому й рідкому станах.

Щоб оцінити масу стисненого водню (а не зрідженого) під тиском 200 бар, яку можна перевезти на одній вантажівці з балонами, потрібно врахувати:

- Фізичні параметри стисненого водню: При 200 бар і 15 °C густина водню $\approx 16,4 \text{ кг/м}^3$ Для порівняння, щільність зрідженого водню $\approx 70,8 \text{ кг/м}^3$.

- Типовий об'єм балонного трейлера: Більшість стандартних «трубовозів» для водню мають загальний об'єм балонів біля 1000–1200 м^3 (усі балони разом). Це повітряний об'єм при атмосферному тиску; фактичний газ стискається у цьому об'ємі до робочого тиску.



Рисунок 2.2. Система транспортного засобу-батареї для перевезення зрідженого водню при транспортуванні в дискретних балонах

– Реальна маса при 200 бар: Масу водню в газовому стані можна розрахувати як:

$$m=\rho \cdot V=16,4 \text{ кг/м}^3 \cdot 1000 \text{ м}^3 \approx 16400 \text{ кг} \quad (2.1)$$

Але це маса газу в 1000 м³ при 1 бар, а ми стискаємо до 200 бар, тому об'єм балонів у трейлері зазвичай становить не 1000 м³, а приблизно 8–12 м³ реального фізичного об'єму, тобто об'єм усіх балонів, в який закачується водень під тиском.

Якщо взяти 10 м³ корисного об'єму при 200 бар:

Отже, вантажівка з балонами при 200 бар (типовий трейлер або контейнер типу Type I–IV) може перевозити приблизно 150–200 кг стисненого водню.

Це значно менше, ніж 3–4 тони у рідкому стані, саме тому для великих відстаней і об'ємів вигідніше використовувати зріджений водень або підвищений тиск (350–700 бар).

Цікавим є той факт, що тара сцепки для перевезення зрідженого водню складає приблизно 39,6 т та перевозить максимум 300 кг водню. Таким чином корисна вага яку транспортують досить невелика.

Для прийняття рішення використаємо порівняльну таблицю щодо умов транспортування водню у стисненому та зрідженому стані.

Ця таблиця дозволяє порівняти ефективність, масу й обмеження для кожного типу транспорту. Якщо планується масштабне перевезення водню на великі відстані, то зріджений водень – найбільш економічно доцільний варіант. Якщо важлива гнучкість і мобільність – використовують стиснений водень, особливо у сфері транспорту та локального зберігання.

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця основних способів транспортування водню

Параметр	Стиснений водень (200 бар)	Стиснений водень (350–700 бар)	Зріджений водень (LH ₂)
Стан	Газоподібний	Газоподібний	Рідкий
Тип транспорту	Балонні трейлери (трубовози)	Контейнери високого тиску (Type IV)	Кріостерни, напівпричепа, танкери
Робочий тиск	~200 бар	350–700 бар	Атмосферний (але температура –253 °C)
Щільність водню	≈ 16,4 кг/м ³	≈ 24–42 кг/м ³	≈ 70,8 кг/м ³
Типовий об'єм (фізичний)	~10–12 м ³	~10–12 м ³	~50 м ³
Маса водню на одну вантажівку	150–200 кг	300–600 кг	3,5–4,0 т
Переваги	Простота, дешевші матеріали	Більша щільність, універсальність	Висока енергощільність, менше місця
Недоліки	Низька щільність, мала маса	Дорогі матеріали, компресори	Висока вартість зрідження, теплові втрати
Втрати при транспортуванні	Мінімальні	Мінімальні	До 0,5 % на добу через випаровування
Область застосування	Невеликі об'єми, короткі маршрути	Автомобілі, заправки, індустрія	Масові перевезення, експорт, енергетика

2.2 Підбір технічних засобів для транспортування вантажу

Для перевезення 300 кг зрідженого водню з Києва до Львова необхідно врахувати специфіку вантажу, який є небезпечним (клас ADR 2.1 — легкозаймисті гази). Це вимагає спеціалізованого транспорту та дотримання суворих правил безпеки.

Вибір транспортного засобу та причепа.

Для перевезення такого вантажу рекомендується використовувати:

Тягач: DAF XF або Volvo FH, які мають відповідні сертифікати для перевезення небезпечних вантажів.



Рисунок 2.3. Запропоновані варіанти тягачів для перевезення зрідженого водню

Причіп: спеціалізований газовий напівпричіп-цистерна з кріогенною ізоляцією, призначений для транспортування зрідженого водню.



Рисунок 2.4. Кріогенна цистерна для перевезення зрідженого водню

Ці транспортні засоби повинні відповідати вимогам ADR та мати відповідні дозволи.

Відстань та маршрут

Відстань: приблизно 540 км.

Маршрут: Київ → Житомир → Рівне → Львів (траса М06).

Розрахунок витрат на паливо

Середня витрата пального: 32 л/100 км.

Загальна витрата на маршрут: $540 \text{ км} \times 32 \text{ л/100 км} = 172,8 \text{ л}$.

Середня ціна дизельного пального: близько 52,75 грн/л.

Загальні витрати на паливо: $172,8 \text{ л} \times 52,75 \text{ грн/л} \approx 9\,120 \text{ грн}$.

Заробітна плата водія

Заробітна плата водія залежить від багатьох факторів, включаючи досвід, тип вантажу та компанію-роботодавця. Для перевезення небезпечних вантажів, таких як зріджений водень, водії зазвичай отримують вищу оплату. Середня заробітна плата водія вантажівки в Україні становить близько 44 149 грн на місяць.

Для такого перевезення можна припустити оплату за рейс у межах 10 000–15 000 грн, враховуючи складність та відповідальність.

Ліцензії та дозволи: Необхідно мати відповідні ліцензії на перевезення небезпечних вантажів та дотримуватись вимог ADR.

Страхування: Обов'язкове страхування вантажу та відповідальності перевізника.

Безпека: Дотримання всіх заходів безпеки при завантаженні, транспортуванні та розвантаженні зрідженого водню.

Таблиця 2.1 – зведений кошторис витрат на перевезення 300 кг зрідженого водню за маршрутом Київ-Львів

Стаття витрат	Сума (грн)	Коментар
1. Оренда кріогенної цистерни	35 000	Оренда на 1 день, включаючи обслуговування та амортизацію.
2. Оренда тягача з ADR-сертифікатом	15 000	Оренда на 1 день, включаючи обслуговування та амортизацію.

Стаття витрат	Сума (грн)	Коментар
3. Паливо (540 км, 32 л/100 км)	9 120	172,8 л × 52,75 грн/л.
4. Заробітна плата водія за рейс	12 500	Враховуючи складність перевезення небезпечного вантажу.
5. Страхування вантажу	6 000	Повне страхування вантажу та відповідальності перевізника.
6. Дозволи та ліцензії (ADR)	1 500	Включає сертифікати на водія та транспортний засіб.
7. Організаційні витрати	2 000	Включає медичні огляди, технічний огляд, паркування тощо.
8. Резерв на непередбачені витрати	3 000	Наприклад, затримки, додаткові перевірки тощо.
Загальна сума	84 120	

На рис. 2.5 наведено схему маршруту Київ-Львів.

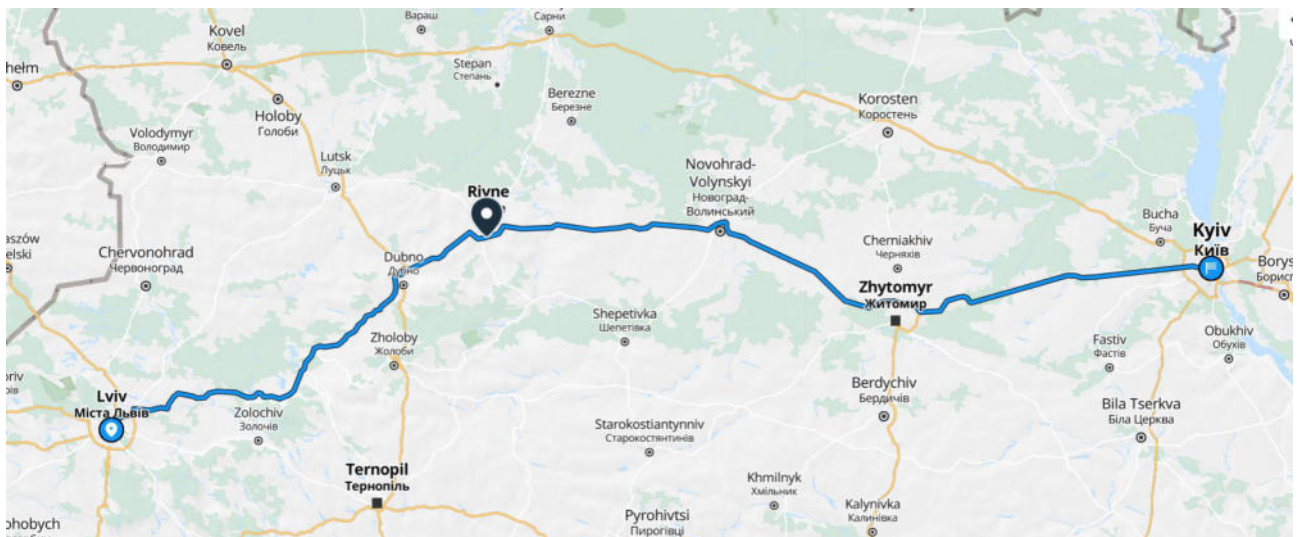


Рисунок 2.5. Схема маршруту Київ-Львів для перевезення зрідженого водню

Загальна відстань: приблизно 541 км.

Основна траса: М06 / Е40 — міжнародна автомагістраль, що з'єднує Київ із Львовом через Житомир, Рівне та Броди.

Рекомендовані зупинки для технічного контролю та відпочинку

Житомир (≈ 130 км від Києва)

Мета: перевірка стану обладнання та систем безпеки

Місце: автозаправні станції з великими майданчиками для вантажного транспорту trans-atlas.com.ua

Рівне (≈ 320 км від Києва)

Мета: додатковий технічний огляд та відпочинок водія

Місце: спеціалізовані зони відпочинку для вантажівок

Броди (≈ 440 км від Києва)

Мета: фінальна перевірка перед в'їздом до Львова

Місце: контрольні пункти або стоянки для великогабаритного транспорту.

2.3 Заходи із підвищення ефективності перевезення зрідженого водню

У сучасних умовах енергетичного переходу водень, зокрема у зрідженому стані, набуває все більшої стратегічної ваги як універсальний енергоносіє. Його використання охоплює транспортну галузь, металургію, хімічну промисловість, виробництво електроенергії та зберігання енергії. Але для того, щоб зріджений водень (LH_2) став повноцінною складовою глобального паливно-логістичного балансу, необхідне вирішення низки логістичних і технічних проблем, пов'язаних із його транспортуванням.

Основні обмеження зумовлені специфікою речовини: наднизькою температурою зберігання (близько -253°C), низькою щільністю ($0,071$ кг/л), схильністю до випаровування (ефект boil-off), високими вимогами до герметичності, пожежонебезпекою та потребою в кріогенному обладнанні. Все це суттєво ускладнює перевезення LH_2 і робить необхідним комплекс заходів, які сприятимуть підвищенню його ефективності, безпеки та економічної доцільності.

Значну роль у підвищенні ефективності відіграє вдосконалення кріогенної техніки. Найперспективнішими на сьогодні є напівпричеви на базі циліндричних

резервуарів ISO Tank із дво- або тришаровими оболонками: внутрішня — із нержавіючої сталі або алюмінієвого сплаву; проміжний шар заповнений вакуумом, а між ним — теплоізоляційний матеріал (наприклад, перліт, піногель, аерогель). Теплова проникність таких конструкцій може бути в межах 0,05–0,1 Вт/(м·К), що дозволяє обмежити втрати LN_2 до 0,2–0,3% на добу.

Сучасні моделі (наприклад, Cryostar Euro-Cryo, Chart Industries або Linde LN_2 tanks) оснащуються системами активного охолодження, інтегрованими мікрокомпресорами для підтримки тиску, автоматизованими клапанами, сенсорами температури і тиску, GPS- і телеметричними модулями, що з'єднуються з центральними логістичними платформами в режимі реального часу. Це забезпечує не лише контроль, а й адаптивне керування умовами перевезення, включно з корекцією режимів тиску при зміні погодних або топографічних умов.

Логістичне моделювання і вибір оптимальних маршрутів. Важливим чинником є формування маршрутної мережі перевезень із урахуванням специфіки кріогенного вантажу. Вибір маршруту повинен передбачати уникнення зон із підвищеними температурними коливаннями, довготривалих зупинок, складного рельєфу, а також перевірку наявності аварійно-рятувальних служб і спеціалізованих станцій дозаправлення або охолодження. Позитивний досвід уже мають країни ЄС, які впроваджують мережі Hydrogen Refueling Infrastructure Nodes — точки для обслуговування транспорту із LN_2 .

Оптимізація маршруту може здійснюватися за допомогою цифрових рішень на базі GIS-платформ, штучного інтелекту (AI) та машинного навчання, що дозволяє враховувати погодні умови, трафік, зміни кліматичних зон, графіки заправок та логістичні вузли в реальному часі. В умовах України створення національної цифрової платформи водневої логістики є перспективною пропозицією, яка могла би поєднати облік усіх перевезень LN_2 , маршрути, точки обслуговування, контроль безпеки та інтеграцію з екологічними і фінансовими службами.

Зменшення втрат через впровадження технологій boil-off management. З метою мінімізації випаровування LN_2 впроваджуються технології повторної конденсації парів у системі зворотного циклу або їх використання в якості палива для приводу допоміжного обладнання. У перспективі — створення замкнутих паливних систем, де boil-off-пари не викидаються в атмосферу, а спалюються в паливних елементах для живлення тягача, охолодження або електропостачання допоміжних систем. Це підвищує енергоефективність на 10–12 % і зменшує втрати водню на 0,5–1% за рейс.

Інновації в енергозберігаючих системах тягачів. Особливої уваги заслуговує тенденція впровадження гібридних або повністю водневих тягачів, здатних працювати як на дизелі, так і на водневих паливних елементах. Наприклад, системи Toyota Fuel Cell, Hyzon Motors або Nikola Tre FCEV здатні забезпечити до 500–800 км пробігу на одній заправці воднем. Це дозволяє використовувати частину boil-off газу із цистерни як паливо без втрат, що особливо актуально на далеких маршрутах.

Інтеграція логістичних процесів із цифровими хмарними платформами. Ведення документації, облік параметрів, контроль перевезень, аналіз ефективності й планування маршрутів можуть здійснюватися через спеціалізовані платформи класу Hydrogen Transportation Management System (HTMS). У поєднанні з технологією блокчейн можливо забезпечити юридичну прозорість перевезення, доказовість даних, уникнення фальсифікацій і контроль за кожною тонною LN_2 . Це також дозволяє простежити життєвий цикл водню — від виробництва до кінцевого споживача.

Професійна підготовка персоналу і симуляція аварійних ситуацій. Транспортування LN_2 вимагає високої кваліфікації водіїв і технічного персоналу. Доцільно впровадити систему сертифікації ADR-зразка з доповненням щодо кріогенного транспорту, обов'язкові тренінги з використанням симуляторів (VR/AR), моделювання критичних ситуацій (витік, займання, перевертання цистерни), а також повторну атестацію кожні 12 місяців.

Розбудова водневої інфраструктури. Одним із фундаментальних заходів для підвищення ефективності є створення водневої інфраструктури — мережі стаціонарних і мобільних пунктів заправлення, охолодження, обслуговування, регенерації ізоляції, пунктів відкачки boil-off. Україна має потенціал інтегрувати такі об'єкти в логістичні коридори TEN-T та у мережу європейської водневої інфраструктури, що дозволить суттєво підвищити конкурентоспроможність транспортної системи держави.

Економічні стимули і законодавча підтримка. Для масового впровадження ефективного перевезення LH_2 необхідна стимулююча політика: державне співфінансування закупівлі кріотехніки, компенсація частини витрат на страхування вантажів, звільнення від ПДВ на імпортовані технології, розробка спеціального законодавства щодо обігу зрідженого водню в транспортній галузі.

Очікуваний ефект. Комплекс заходів дозволяє зменшити втрати водню в логістичних ланцюгах до 0,2–0,3 % на добу, скоротити загальні витрати на транспортування на 20–25 %, підвищити безпеку перевезень на 40–50 % за рахунок цифрового моніторингу, забезпечити відповідність стандартам ISO 14687, ADR, RID, а також створити умови для широкого використання LH_2 як комерційного енергоносія на національному і міжнародному рівнях.

Я додав дві таблиці, які можуть бути включені до розділу дисертації:

Порівняння типів цистерн для транспортування зрідженого водню — містить аналіз теплових втрат, обсягів, ефективності та придатності для мобільного транспорту.

Таблиця 2.1 – Порівняння типів цистерн для транспортування зрідженого водню

	Тип цистерни	Теплові втрати (Вт/м²)	Втрати LН ₂ за 24 год (%)	Місткість (л)	Придатність для мобільного транспорту
1	ISO Tank (звичайна)	1.0–1.5	1–1.5%	20000–24000	Середня
2	ISO Tank з вакуумною ізоляцією	0.1–0.3	0.2–0.4%	18000–22000	Висока
3	Стационарна криоцистерна	0.08–0.2	0.1–0.3%	50000–100000	Низька
4	Контейнер з активним охолодженням	0.05–0.1	0.05–0.2%	15000–18000	Висока

Очікуваний ефект від впровадження заходів — демонструє, як різні напрями вдосконалення впливають на економіку перевезень, безпеку та втрати LН₂.

Таблиця 2.2 – Очікуваний ефект від впровадження заходів

	Категорія заходу	Зниження витрат (%)	Зменшення втрат LН ₂ (%)	Підвищення безпеки (%)
1	Модернізація цистерн	10–15%	0.5–1%	15–20%
2	Впровадження цифрових систем	5–10%	0.2–0.3%	20–30%
3	Гібридні тягачі	5–7%	0.1–0.2%	10–15%
4	Навчання персоналу	3–5%	—	20–25%
5	Інфраструктурне розширення	7–10%	0.3–0.4%	15–20%

ISO Tank (звичайна) Це базовий тип цистерни, який найчастіше застосовується у перевезеннях інертних або зріджених газів. Має найвищі теплові втрати (1.0–1.5 Вт/м²) та суттєві добові втрати LН₂ (1–1.5%). Підходить для короткотривалих перевезень або при низьких температурних навантаженнях. Енергоефективність і безпека — середнього рівня.

ISO Tank з вакуумною ізоляцією Це вдосконалений варіант, який забезпечує суттєве зниження теплових втрат до 0.1–0.3 Вт/м². Добові втрати водню знижуються до 0.2–0.4%, що дозволяє ефективно використовувати ці

цистерни на довших маршрутах. Це одна з найефективніших технологій для мобільного транспорту, що також відповідає міжнародним стандартам.

Стаціонарна кріоциерна Призначена здебільшого для зберігання на промислових об'єктах або водневих хабах. Хоча рівень теплоізоляції дуже високий, така цистерна практично не придатна для мобільного використання. Втрати LN_2 є мінімальними (0.1–0.3%), проте обмежена мобільність знижує її логістичну універсальність. Контейнер з активним охолодженням. Інноваційний тип з найменшими тепловими втратами (0.05–0.1 Вт/м²) та мінімальними випаровуваннями LN_2 (0.05–0.2% на добу). Цистерни цього типу використовують інтелектуальне керування температурою та автономні енергосистеми. Незважаючи на високу вартість, вони є оптимальним варіантом для тривалих міжміських та міжнародних перевезень, особливо у складних кліматичних умовах.

Висновок по таблиці 1: Найкращими з точки зору балансу мобільності, втрат і ефективності є цистерни з вакуумною ізоляцією та контейнери з активним охолодженням. Вони забезпечують зниження втрат LN_2 у 4–5 разів порівняно зі звичайними моделями, що критично важливо для вартості перевезень і безпеки.

Модернізація цистерн Демонструє найбільший ефект у трьох категоріях: зниження витрат (до 15%), зменшення втрат LN_2 (до 1%) та зростання безпеки (до 20%). Це вказує, що інвестиції в нові типи контейнерів дають найшвидше економічне повернення.

Впровадження цифрових систем Цифровізація логістичних процесів забезпечує найбільше зростання безпеки (20–30%) завдяки телеметрії, попередженню аварій і відстеженню параметрів в реальному часі. Водночас економічний ефект трохи менший (5–10%), але він довготривалий і стабільний.

Гібридні тягачі Хоча вплив на витрати і втрати LN_2 менший, використання гібридів або водневих тягачів створює синергію з перевезенням самого водню – частину вантажу можна використовувати як енергію. Це перспективний напрям, який ще потребує розвитку інфраструктури.

Навчання персоналу Безпосередньо не впливає на втрати LN_2 , але має суттєве значення для безпеки (до 25%). Людський фактор лишається критичним у поводженні з вибухонебезпечними речовинами.

Інфраструктурне розширення Забезпечує середній ефект у всіх категоріях. Це фундаментальний захід, без якого неможливе масштабне впровадження інших технологій. Додаткові заправні пункти, пункти охолодження і техобслуговування знижують витрати і втрати водню в транспортному ланцюзі.

Висновок по таблиці 2: Максимальна ефективність досягається за умови комплексного підходу – комбінації технічної модернізації, цифровізації, розвитку інфраструктури та кваліфікації персоналу. Кожен захід має власну «зону ефективності», тому важливо інтегрувати їх у загальну транспортну систему.

Якщо потрібно – можу також підготувати діаграми на основі цих даних або створити шаблон для оформлення розділу в дисертації (у Word або LaTeX).

2.4 Дозвільні документи при перевезенні зрідженого водню в Україні

Перевезення зрідженого водню як особливо небезпечного вантажу вимагає суворого дотримання правових, технічних і безпекових норм. В Україні така діяльність регулюється національним законодавством, що узгоджене з міжнародними вимогами, зокрема з Європейською угодою ADR. Основною метою дозвільної системи є забезпечення безпеки учасників транспортного процесу, захист довкілля та попередження надзвичайних ситуацій.

Правова основа включає Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів», який встановлює загальні вимоги до суб'єктів господарювання, транспортних засобів і водіїв, а також визначає, що перевезення водню дозволено виключно за наявності відповідних ліцензій та підтвердження технічної відповідності. Крім того, міжнародна угода ADR, ратифікована Україною, є чинною для регулювання транспортних операцій з воднем, що класифікується як газ 2.1 класу небезпеки (легкозаймистий).

Щоб здійснювати перевезення зрідженого водню, суб'єкти господарювання повинні отримати ліцензію на здійснення діяльності з перевезення небезпечних вантажів. Для цього підприємство має надати підтвердження щодо наявності відповідної матеріально-технічної бази, кваліфікованого персоналу та розроблених заходів безпеки. Транспортні засоби мають бути оснащені згідно з нормами ADR: спеціальними кріоцистернами, герметизованими арматурами, протипожежним обладнанням та ізоляцією, що зменшує ризик вибуху чи витоку.

Одним з ключових документів є свідоцтво про допуск транспортного засобу до перевезення небезпечних вантажів, яке видається уповноваженим органом після технічного огляду. Цей документ підтверджує відповідність автомобіля вимогам безпеки, температурного режиму і термоізоляції. Аналогічно, водій повинен мати дійсний ADR-сертифікат, що підтверджує проходження навчання з перевезення небезпечних вантажів. У програмі підготовки розглядаються хімічні властивості водню, технічне обслуговування кріогенних ємностей, дії у випадку витоку чи пожежі, а також правила користування індивідуальними засобами захисту.

Також обов'язковим є паспорт безпеки речовини, в якому зазначається міжнародний ідентифікатор водню (UN 1966), властивості вантажу, заходи безпеки при транспортуванні, а також інструкції у разі аварії. Документ має бути складений у відповідності до стандарту GHS та супроводжувати вантаж протягом усього маршруту. Окрім того, вантажовідправник формує декларацію, в якій засвідчує відповідність упаковки, температури та способу завантаження чинним вимогам.

Для кожного рейсу оформлюється дорожній лист та міжнародна транспортна накладна (CMR), які повинні містити інформацію про вантаж, його клас небезпеки, маршрут, відправника, отримувача та дані про водія. Також вимагається обов'язкове страхування ризиків, пов'язаних із транспортуванням водню — як у вигляді поліса відповідальності перед третіми особами, так і страхування самого вантажу.

Маршрут перевезення повинен бути погоджений з Державною службою з надзвичайних ситуацій, службами автодоріг та, у певних випадках, поліцією. Він має враховувати наявність аварійних зупинок, можливість доступу до логістичних хабів, об'їзд густонаселених районів, тунелів і потенційно небезпечних об'єктів. У випадку перевезення великих партій LН₂ або здійснення транскордонних перевезень, маршрут супроводжується обмеженнями швидкості, визначенням точок перевірки та, за потреби, поліцейським супроводом.

Слід також враховувати особливості, пов'язані з воєнним станом чи надзвичайними ситуаціями. У таких умовах передбачена можливість спрощеного погодження маршрутів та оперативного коригування дозволів. Однак усі ключові вимоги щодо технічної справності, підготовки водіїв і супровідної документації залишаються чинними.

Сучасні цифрові інструменти поступово впроваджуються і в систему дозволів. Електронна сертифікація ADR, онлайн-перевірка документів за QR-кодом, автоматичне погодження маршрутів через електронні кабінети підприємств — усе це дозволяє прискорити процес оформлення, зменшити людський фактор і підвищити прозорість операцій.

У перспективі доцільно створити єдину інтегровану платформу для управління перевезеннями небезпечних речовин, де інформація про всі дозволи, маршрути, технічний стан транспорту та кваліфікацію персоналу буде зберігатися у централізованій електронній системі. Це сприятиме підвищенню ефективності контролю, зниженню корупційних ризиків та підготовці України до повноцінної інтеграції в європейський водневий ринок.

3 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

3.1 Техніка безпеки при перевезенні зрідженого водню

Перевезення зрідженого водню є складним та високоризиковим технологічним процесом. Водень у зрідженому стані має надзвичайно низьку температуру кипіння (-253°C) і високу займистість, що створює загрозу виникнення надзвичайних ситуацій у разі порушення правил безпеки. У зв'язку з цим безпека на транспорті під час перевезення водню потребує особливої уваги та ретельного нормативного, технічного і організаційного регламентування.

Зріджений водень є небезпечним вантажем категорії А (газ, легкозаймистий, криогенна рідина). Основні загрози:

- вибухонебезпека: водень утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям при концентраціях 4–75%.
- висока проникність: водень може проходити крізь мікротріщини в металі або ущільненнях.
- криогенна небезпека: температура рідкого водню може спричинити обмороження або руйнування матеріалів.
- дифузія та витік: навіть при мінімальних витіках водень може швидко накопичуватися у важкодоступних місцях.

В Україні та на міжнародному рівні перевезення водню регламентується наступними документами:

- правила перевезення небезпечних вантажів (ППНВ) автомобільним транспортом.
- європейська угода про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR).
- технічний регламент з безпеки інфраструктури перевезень небезпечних вантажів.
- національні стандарти ДСТУ EN ISO щодо водневої інфраструктури.

Вимоги до транспортних засобів і обладнання. Для перевезення зрідженого водню використовуються спеціалізовані кріогенні автоцистерни. Основні вимоги:

- використання транспортних засобів класу EX/II або EX/III згідно з ADR.
- Наявність аварійних клапанів скидання тиску.
- Захисні кожухи на вентилях та фітингах.
- Система виявлення витоків газу.
- Температурний моніторинг під час руху.

Організаційні заходи безпеки

- водій має мати допуск до перевезення небезпечних вантажів (ADR-сертифікат).

- перед рейсом здійснюється технічний огляд обладнання.
- повинна бути розроблена інструкція з дій у разі витoku або пожежі.
- водій має бути забезпечений ЗІЗ.
- транспортний засіб повинен бути оснащений GPS-моніторингом.
- розробляється маршрут перевезення з об'їздом зон підвищеного ризику.

Дії у разі надзвичайної ситуації

- припинення руху та виклик рятувальних служб.
- сповіщення відповідальних осіб.
- відключення двигуна, заземлення цистерни.
- використання вогнегасників та ЗІЗ.
- попередження інших учасників руху.
- створення захисної зони радіусом щонайменше 100 м.

Підготовка персоналу та навчання

- навчання ADR (теорія + практика).
- курси з дій у разі пожежі або витoku водню.
- інструктаж з використання ЗІЗ.
- проведення навчальних тривог.
- вивчення властивостей водню.

Специфіка перевезення в умовах міста та міжміських маршрутів. У міських умовах перевезення повинно здійснюватися вночі або в години найменшого трафіку. На міжміських маршрутах заборонено зупинятись на АЗС, у тунелях, під мостами та в зонах масового скупчення людей.

9. Інформаційне забезпечення та маркування.

- Табличка '30/1049' (код небезпеки/номер ООН).
- Помаранчеві панелі спереду і ззаду.
- Знак 'Газ, що підтримує горіння'.
- Маркування 'Кріогенна рідина'.
- Наявність усіх документів на вантаж у водія.

Перевезення зрідженого водню потребує використання спеціалізованих транспортних засобів, високої підготовки персоналу та готовності до реагування на надзвичайні ситуації. Необхідне постійне вдосконалення нормативної бази та впровадження цифрових систем моніторингу.



Рисунок 3.1. Маркування транспортного засобу при перевезенні водню

Для перевезення водню транспортні засоби позначаються стандартними попереджувальними знаками небезпечних вантажів, які встановлюють міжнародні правила ADR/RID, IMDG-кодекс і Правила дорожнього перевезення небезпечних вантажів в Україні. Основна емблема – ромб червоного кольору із символом полум'я та цифрою «2» у нижньому куті, що позначає клас 2.1 «Легкозаймисті гази». Вона використовується на всі види водню, оскільки газ є надзвичайно горючим. Для зручності ідентифікації на білому прямокутному полі всередині ромба часто друкують номер ООН (UN) конкретного продукту: «1049» для стисненого водню або «1966» для рідкого (криогенного) водню.

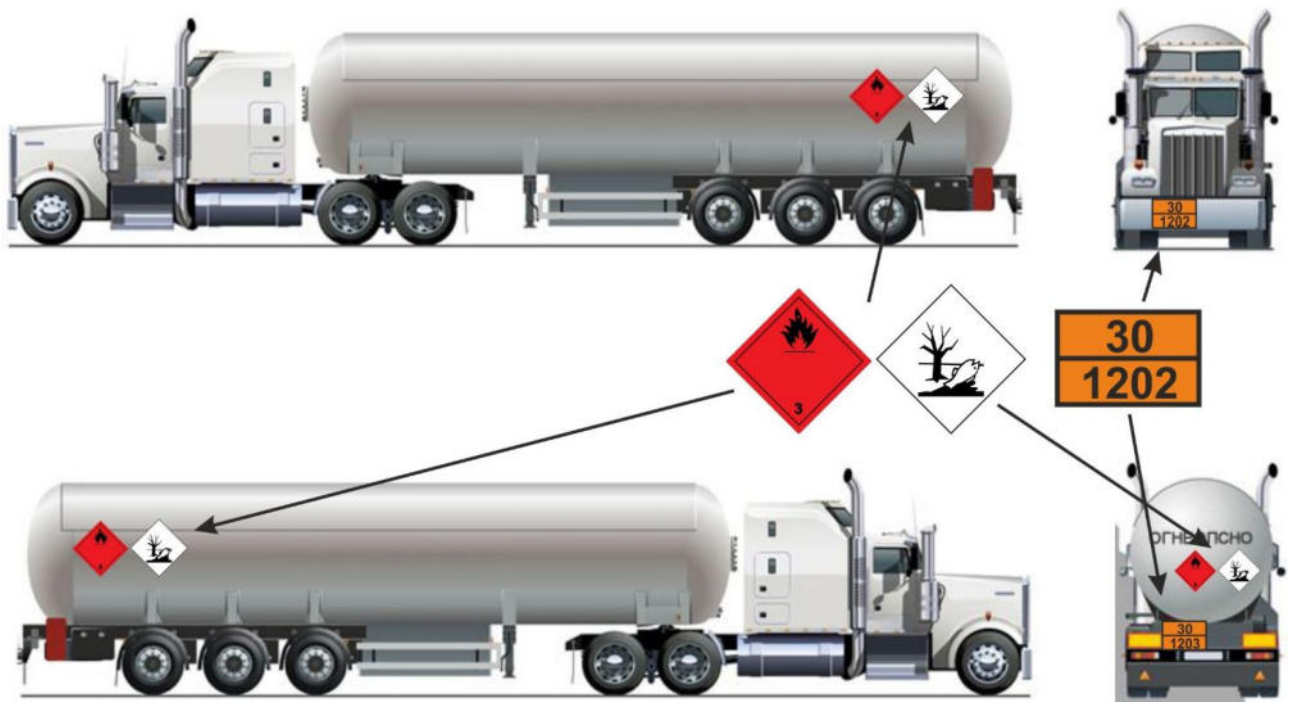


Рисунок 3.2 Розміщення попереджувально-розпізнавальних знаків на транспорті при перевезенні водню

На автоцистернах, контейнерах-цистернах і вагонах-цистернах додатково встановлюють помаранчеві прямокутні таблички. Якщо резервуар стаціонарний (понад 1 000 л), табличка обов'язково містить дворядковий код: у верхньому рядку – «23» для стисненого або «22» для рідкого водню (перша цифра 2 вказує на газ, друга – на горючі властивості; нуль відсутній, бо речовина не має додаткових основних небезпек), у нижньому – відповідний номер ООН 1049 чи 1966. На тягачі й у хвостовій частині транспортного засобу можуть

використовуватися пусті помаранчеві таблички, коли перевезена кількість водню не потребує кодованого номера, але все одно перевищує порогові значення ADR.

Балонні пакування обладнують етикеткою «Flammable gas» того ж ромбічного формату та циліндричною плечовою наклейкою з написом «Hydrogen, compressed – UN 1049» або «Hydrogen, refrigerated liquid – UN 1966». Для дрібнішої тари діє маркування системи GHS: піктограма «полум'я» (GHS02) і фраза небезпеки H220 «Газ надзвичайно займистий». Разом ці знаки забезпечують миттєве розпізнавання вантажу аварійними службами та водіями, а також виконання вимог протипожежної безпеки й охорони довкілля під час перевезення водню різними видами транспорту.

3.2 Забезпечення безпеки при перевантаженні зрідженого водню

Зріджений водень (LH_2) є перспективним енергетичним ресурсом завдяки високій питомій енергії та нульовим викидам під час споживання. Однак надзвичайно низька температура кипіння (-253°C) та висока летючість речовини створюють серйозні виклики для забезпечення безпечного перевантаження цього палива під час транспортування, зберігання і доставки.

Процес перевантаження зрідженого водню включає перекачування рідини з одного контейнера до іншого — наприклад, з транспортувальної цистерни до стаціонарного резервуара або з виробничого сховища до мобільного засобу. Усі етапи цього процесу супроводжуються ризиками, що пов'язані з викидом, займанням або вибухом водню, а також з ушкодженнями через екстремально низькі температури.

Для зменшення небезпек існує кілька ключових принципів безпеки, що регламентують операції з перевантаження LH_2 . Передусім — герметичність усіх стиків, трубопроводів, з'єднувальних елементів та запірної арматури. Важливо використовувати спеціальні ущільнювальні матеріали, які не втрачають своїх властивостей при наднизьких температурах.

Крім того, надзвичайно важливим аспектом є організація безпечного середовища. Зона перевантаження повинна мати ефективну вентиляцію для недопущення накопичення воднево-повітряних сумішей, що можуть бути вибухонебезпечними вже при концентрації 4–75%. Усі електричні прилади в зоні робіт мають бути виконані у вибухозахищеному виконанні. Забороняється наявність відкритого полум'я або іскрових джерел у межах периметра.

Особливу увагу слід приділяти температурному контролю: всі елементи перевантажувальної системи повинні бути попередньо охолоджені до температур зрідженого водню, щоб уникнути інтенсивного кипіння палива та перевищення допустимого тиску в системі. Порушення цього правила може призвести до розгерметизації ємностей або розриву трубопроводів.

Також передбачено використання численних засобів пасивного і активного захисту. Пасивні — це теплоізоляція, подвійні стінки резервуарів, аварійні уловлювачі парів. Активні — це датчики тиску, температури, витоків, системи автоматичного відключення подачі, спринклерні системи та водяні завіси для ізоляції хмари водню у разі викиду.

Не менш важливим елементом безпеки є людський фактор. Обслуговуючий персонал повинен мати відповідну кваліфікацію, пройти навчання та інструктаж, включаючи моделювання дій у разі аварійних ситуацій. Всі роботи виконуються згідно з затвердженою процедурою, із застосуванням засобів індивідуального захисту: термостійких костюмів, захисних окулярів, рукавиць, систем контролю кисневого середовища.

Згідно з міжнародними нормами (ISO 21013, EN 13648, EIGA Doc. 75/07) і українськими стандартами, кожна операція перевантаження зрідженого водню має супроводжуватись процедурою оцінки ризиків, а також документальним забезпеченням — актами технічної готовності обладнання, журналами перевірок, дозволами на проведення небезпечних робіт.

Таким чином, безпечне перевантаження зрідженого водню — це складний техніко-організаційний процес, що базується на чітких регламентах, сучасному обладнанні, підготовленому персоналі та постійному моніторингу параметрів

середовища. Дотримання цих вимог дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити безпечне впровадження водневої енергетики у транспортну та промислову інфраструктуру.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У результаті проведеного дослідження було здійснено всебічний аналіз процесу транспортування зрідженого водню як складної логістичної та інженерної задачі, що вимагає високого рівня технічної підготовки, безпеки та нормативного супроводу.

На першому етапі роботи охарактеризовано зріджений водень як об'єкт перевезення з урахуванням його широкого застосування в енергетичному, промисловому та транспортному секторах. Було встановлено, що водень є ефективним, екологічно чистим, але водночас небезпечним вантажем, що потребує спеціальних технічних засобів для підготовки до транспортування. Детально проаналізовано технології зберігання та транспортування, включаючи криогенні установки, ізотермічні резервуари, матеріали для теплоізоляції та вимоги до підтримання температурно-технічного режиму.

У другому розділі розроблено комплексні заходи для підвищення ефективності транспортного процесу. Проведено проектування маршруту з урахуванням особливостей інфраструктури, типу вантажу та нормативних обмежень. Визначено критерії вибору транспортних засобів та обладнання для забезпечення безпечного й надійного перевезення. Запропоновано низку техніко-економічних рішень, що сприяють зниженню витрат, підвищенню енергоефективності та зменшенню ризиків у логістичному ланцюгу. Окремо було розглянуто перелік дозвільних документів та вимоги українського законодавства, що регламентують перевезення небезпечних вантажів, зокрема зрідженого водню.

У третьому розділі увагу зосереджено на аспектах безпеки життєдіяльності. Проаналізовано основні загрози, що виникають при роботі з воднем, і розроблено систему заходів із попередження надзвичайних ситуацій під час перевезення та перевантаження. Встановлено необхідність ретельного дотримання техніки безпеки, забезпечення спеціальної підготовки персоналу та застосування сучасних засобів контролю та захисту.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що ефективно та безпечно транспортування зрідженого водню можливе лише за умови інтеграції сучасних технічних рішень, дотримання чинних нормативно-правових актів та впровадження комплексних логістичних стратегій. Запропоновані в дипломній роботі заходи мають практичне значення і можуть бути застосовані в діяльності підприємств, які займаються перевезенням небезпечних вантажів, зокрема водню.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Україна. Закони. Про перевезення небезпечних вантажів : Закон України від 06.04.2000 № 1644-III // Відомості Верховної Ради України. – 2000. – № 29. – Ст. 238.
2. Україна. Закони. Про приєднання України до Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ) : Закон України від 02.03.2000 № 1511-III // Відомості Верховної Ради України. – 2000. – № 22. – Ст. 172.
3. Україна. Міністерство внутрішніх справ. Про затвердження деяких нормативно-правових актів з питань дорожнього перевезення небезпечних вантажів : Наказ МВС України від 04.08.2018 № 656 // Офіційний вісник України. – 2018. – № 73. – Ст. 2487.
4. Україна. Кабінет Міністрів. Про затвердження Порядку проведення спеціального навчання працівників суб'єктів перевезення небезпечних вантажів : Постанова КМУ від 31.10.2007 № 1285 // Офіційний вісник України. – 2007. – № 84. – Ст. 3103.
5. Україна. Кабінет Міністрів. Про затвердження Порядку і правил проведення обов'язкового страхування відповідальності суб'єктів перевезення небезпечних вантажів : Постанова КМУ від 01.06.2002 № 733 // Офіційний вісник України. – 2002. – № 23. – Ст. 1073.
6. Україна. Кабінет Міністрів. Про Правила дорожнього руху : Постанова КМУ від 10.10.2001 № 1306 // Офіційний вісник України. – 2001. – № 41. – Ст. 1842.
7. Україна. Міністерство внутрішніх справ. Про затвердження Положення про порядок спеціального навчання водіїв транспортних засобів, що перевозять небезпечні вантажі : Наказ МВС України від 21.03.2008 № 130 // Офіційний вісник України. – 2008. – № 27. – Ст. 910.
8. Україна. Міністерство транспорту та зв'язку. Про затвердження Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних

засобів : Наказ Мінтрансу України від 07.06.2010 № 340 // Офіційний вісник України. – 2010. – № 53. – Ст. 1857.

9. Україна. Міністерство внутрішніх справ. Про затвердження Інструкції про порядок обігу вогнепальної зброї, боєприпасів до неї, холодної зброї та пневматичної зброї : Наказ МВС України від 21.08.1998 № 622 // Офіційний вісник України. – 1998. – № 35. – Ст. 1312.

10. Україна. Міністерство внутрішніх справ. Про затвердження Тимчасових правил обігу в Україні з побутовими піротехнічними виробами : Наказ МВС України від 23.12.2003 № 1649 // Офіційний вісник України. – 2004. – № 1. – Ст. 34.

11. Зеленько Ю. В., Журавель І. Л., Огороков А. М., Патласов О. М., Бойченко А. М., Нестеренко Г. І. Посібник для курсу спеціального навчання з питань перевезень небезпечних вантажів на залізничному транспорті. Частина 1. Базовий курс : навч. посіб. / Ю. В. Зеленько [та ін.] ; Дніпропетров. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2015. – 140 с.

12. Габрієлова Т. Ю. Організація і технологія перевезень особливих вантажів : навч. посіб. / Т. Ю. Габрієлова. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 416 с.

13. Габа В. В., Кацман М. Д., Юрченко О. Г. Перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом : навч. посіб. / В. В. Габа, М. Д. Кацман, О. Г. Юрченко ; Держ. ун-т інфраструктури та технологій. – Київ, 2019. – 224 с.

14. Юрченко О. Г. Організація перевезень небезпечних та наливних вантажів : навч. прогр. / О. Г. Юрченко ; Держ. ун-т інфраструктури та технологій. – Київ, 2023. – 45 с.

15. Пахно О., Шок В. Перевезення небезпечних вантажів автомобільним транспортом. Посібник для консультантів : навч. посіб. / О. Пахно, В. Шок. – Київ : АртЕк, 2019. – 457 с. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://labadr.com.ua/ua/5-perevezennya-nebezpechnix-vantazhiv-avtomobilnim-transportom-posibnik-dlya-konsultantiv/>

16. Пахно О., Шок В. Перевезення небезпечних вантажів у цистернах. Посібник для водіїв : навч. посіб. / О. Пахно, В. Шок. – Київ : АртЕк, 2013. – 197

с. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://labadr.com.ua/ua/132-audiokniga-perevezennya-nebezpechnix-vantazhiv-avtomobilnim-transportom/>