

7. 7075 T651 Aluminum Sheet. URL: <https://www.hcaluminum.com/prod/7075-aluminum-sheet/>

8. V. Ruban, V., Derbaba, O., Bohdanov, & Y. Shcherbyna. (2023). OPTIMIZATION OF PRODUCT PROCESSING MODES IN MODELING AND PROGRAMMING OF MACHINING ON MACHINE TOOLS WITH PROGRAM CONTROL. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, (72), 222-238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>

9. Дербаба, В.А., Григоренко, В.У. & Рубан, В.М. (2023). Розвиток елементів комп'ютерного програмування у складових наскрізних технологіях виготовлення механічного обладнання в машинобудуванні. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка»*, (72), 212-221. URL: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.212>

УДК 004.92; 711

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА МАТЕРІАЛУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦИСТЕРНИ ТРАНСПОРТУВАННЯ І ЗБЕРІГАННЯ ЗРІДЖЕНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ

Н.О. Ротт¹, Д.І. Гузенко²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, e-mail: rott.n.o@nmu.one

²магістр кафедри конструювання, технічної естетики і дизайну, e-mail: guzen-kodima288@gmail.com

^{1,2}Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

Анотація. У роботі обґрунтовано конструкцію та обрано матеріал для виготовлення цистерни для транспортування та зберігання зріджених вуглеводневих газів. Проведено розрахунок міцності елементів конструкції за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) у середовищі Autodesk Inventor. Проаналізовано властивості сталі 16Г2АФ і обґрунтовано її застосування для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик та відповідності вимогам нормативних документів.

Ключові слова: зріджені вуглеводневі гази, цистерна, вибір матеріалу, міцність конструкції, метод скінченних елементів, Autodesk Inventor, сталь 16Г2АФ.

SUBSTANTIATION OF THE CONSTRUCTION AND MATERIAL OF THE TANK FOR THE TRANSPORTATION AND STORAGE OF LIQUEFIED HYDROCARBON GASES

Nataliia Rott¹, Dmytro Huzenko²

¹Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: rott.n.o@nmu.one

²Master of the Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: guzenkodima288@gmail.com

Abstract. This work substantiates the design and selection of material for the manufacture of a tank for the transportation and storage of liquefied hydrocarbon gases. The strength

calculation of the structural elements is carried out using the Finite Element Method (FEM) in Autodesk Inventor. The properties of steel 16G2AF are analyzed, and its application is justified to ensure the required operational characteristics and compliance with the requirements of regulatory documents.

Keywords: liquefied hydrocarbon gases, tank, material selection, structural strength, finite element method, Autodesk Inventor, 16G2AF steel.

Вступ. Транспортування та зберігання зріджених вуглеводневих газів (ЗВГ) є важливою складовою сучасної нафтогазової та хімічної промисловості, де безпека й ефективність перевезення мають критичне значення для енергетичної стабільності України. Перевезення ЗВГ вимагає спеціалізованих цистерн, здатних витримувати високий тиск і низькі температури, що обумовлює особливі вимоги до вибору матеріалів та проектування. Сучасні методи, зокрема комп'ютерне моделювання методом скінченних елементів, дозволяють на етапі розроблення виявити слабкі місця конструкції та підвищити її надійність.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні конструкції та матеріалу виготовлення цистерни з урахуванням сучасних вимог до безпеки, економічності та надійності.

Матеріал і результат досліджень. Забезпечення безпеки транспортування та зберігання зріджених вуглеводневих газів (ЗВГ) потребує створення конструкцій, що поєднують високу міцність, стійкість до зовнішніх впливів та відповідність нормативним вимогам. Основними чинниками для розроблення цистерн є правильний вибір матеріалів та проведення точних розрахунків конструкції.

Для більшого розуміння поведінки суміші зріджених вуглеводневих газів розглянемо діаграму залежності тиску випаровування пропан-бутанової суміші від температури (рис. 1). На діаграмі видно, як тиск пари для всіх сумішей зростає з температурою, причому суміші з більшим вмістом пропану мають вищий тиск пари за таких самих температурних умов, ніж суміші з більшим вмістом бутану [1].

Для дослідження обрано цистерну-напівпричіп об'ємом 46м^3 (рис. 2) завдяки її високій мобільності, великій вантажопідйомності та стійкості під час руху. Конструкція включає шасі з багатовісною пневматичною підвіскою та циліндричну ємність із високоміцної сталі, що витримує високий тиск і перепади температур. Для підвищення безпеки передбачено хвилерізи, перегородки, запобіжні й аварійні клапани, а також автоматизовані системи контролю процесів. Такий тип цистерн оптимально поєднує безпеку, надійність і зручність транспортування зріджених вуглеводневих газів у промислових умовах [2].

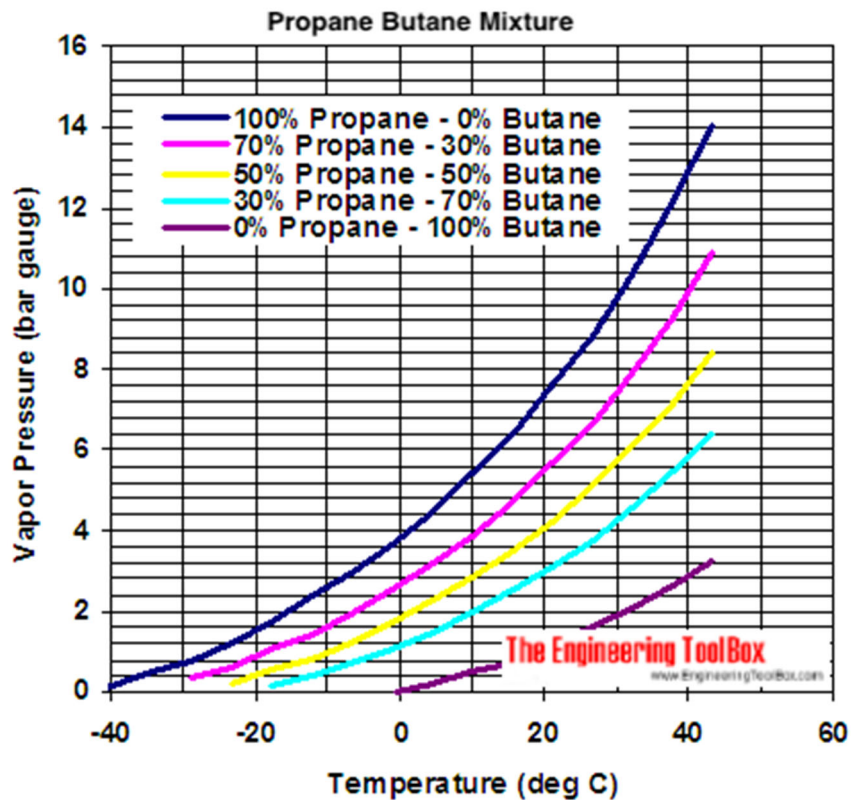


Рис. 1. – Діаграма парів суміші пропан-бутану



Рис. 2. – Цистерна-напівпричіп для транспортування та тимчасового зберігання зріджених вуглеводневих газів

В розрахунках використаємо марку сталі 16Г2АФ [3] вона схожа за властивостями зі сталю Р460NL2 [4]. 16Г2АФ – це низьколегована конструкційна сталь, яка має підвищену міцність та випускається у вигляді прокату а також у вигляді гнутих профілів. Сталь використовують для виготовлення корпусів і деталей посудин, що працюють під тиском. 16Г2АФ розрахована на роботу

в інтервалі температур $-60...+450$ °С. Прокат зі сталі виготовляється гарячекатаним, термічно обробленим та із застосуванням різних режимів контрольованої прокатки. Обов'язковим для такої конструкції має бути випробування на ударну в'язкість, це можна зробити за стандартом ISO 148-1 [5], в цьому стандарті описано випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі. Сталь характеризується покращеними властивостями міцності, твердості та зносостійкості, має доволі не погану пластичність та гарно чинить опір ударним навантаженням. В таблиці 1 наведено механічні властивості сталі 16Г2АФ.

Таблиця 1. – Механічні властивості сталі 16Г2АФ

Марка сталі	Товщина проката, мм	Мінімальна межа плинності, МПа	Тимчасовий спротив, МПа	Мінімальне відносне подовження, %
16Г2АФ	≤ 32	≥ 440	≥ 590	19

Згідно з ДОПНВ [6] робочий тиск цистерни становить 1,6 МПа, тиск випробування 2,1 МПа – це означає, що механічні властивості сталі мають відповідати умовам безпечної експлуатації при високих тисках. Щоб витримати такі значні навантаження встановимо вимоги до сталі: 460 МПа - мінімальна межа плинності, 630 МПа – тимчасовий супротив. Такі механічні властивості можна отримати під час контрольованого гарячекатаного прокату з подальшою нормалізацією. Після нормалізації на знімку мікроструктури можна побачити суміш фериту та перліту (рис. 3).

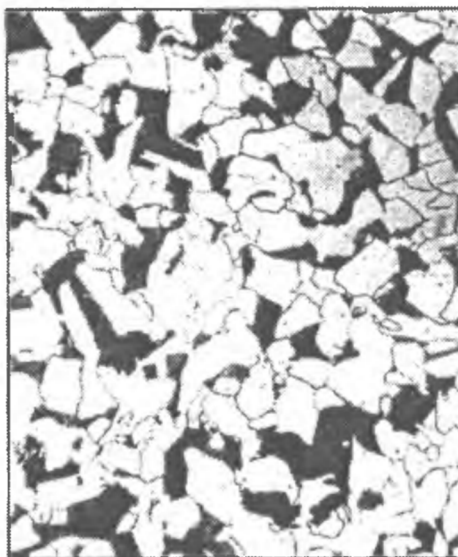


Рис. 3. – Мікроструктура сталі 16Г2АФ після нормалізації, x 100

16Г2АФ – це марганцево-ванадієва сталь, мікролегована азотом. Додавання ванадію подрібнює зерно аустеніту сталі. Наявність азоту сприяє

збільшенню міцності за рахунок утворення в структурі нітридів. Сталь виготовляють повністю розкисленою. Порівняння хімічного складу сталей 16Г2АФ та Р460NL2 наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. – Хімічний склад сталей 16Г2АФ по ДСТУ 8541 [7] та Р460NL2 по ДСТУ EN 10028-3:2018

Марка сталі	C	Si	Mn	Ni	S	P	V	Cr	Cu	N
16Г2АФ	0,14 -0,20	0,30-0,60	1,30-1,70	≤0,30	≤0,035	≤0,03	0,08-0,14	≤0,40	≤0,30	0,015-0,025
Р460NL2	≤0,20	≤0,60	1,10-1,70	≤0,80	≤0,005	≤0,02	≤0,20	≤0,30	≤0,70	≤0,025

На рисунку 4 показано розрахункову схему, для розрахунку було обрано $TL = 11,30$ м, $D = 2,350$ м.

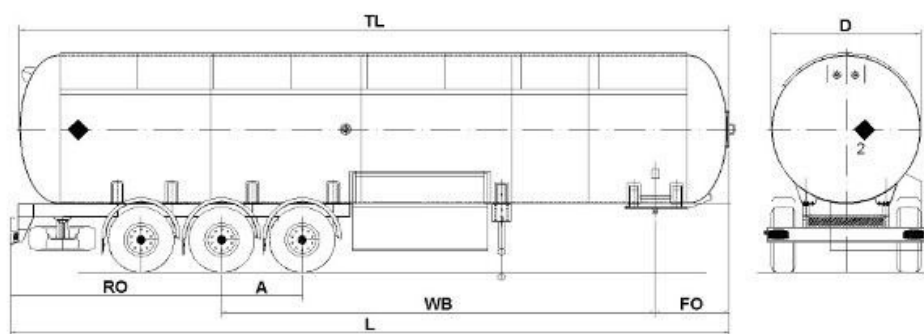


Рис. 4. – Розрахункова схема цистерни

Отже, для розрахунку було обрано наступні параметри, які показані в таблиці 3.

Таблиця 3. – Розрахункові параметри цистерни

№	Параметр	Значення	Одиниця вимірювання
1.	Номінальний об'єм	46,0	м ³
2.	Робочий внутрішній тиск	1,6	МПа
3.	Робоча температура середовища	-20 / +50 °	°С
4.	Тиск гідравлічного випробування	2,1	МПа
5.	Розрахунковий тиск	2,1	МПа
6.	Теплоізоляція	Сонцезахисний кожух	-
7.	Матеріал корпусу	16Г2АФ	-
8.	Матеріал зміцнювальних кілець	10Г2С1	-
9.	Зовнішній діаметр цистерни	2350,0	мм
10.	Довжина цистерни	11300,0	мм

Допустимі напруження згідно ДСТУ EN 12493:2019 [8] для обичайки корпусу цистерни зі сталі 16Г2АФ визначаються по формулі:

$$f = \min\left(\frac{R_m}{2,4}; \frac{R_{eH}}{1,5}\right) = \min\left(\frac{630}{2,4}; \frac{460}{1,5}\right) = 262,5 \text{ МПа}, \quad (1)$$

де $R_{eH} = 460$ МПа – межа текучості ;

$R_m = 630$ МПа – межа міцності на розрив (гарантоване мінімальне значення);

Мінімальна товщина стінки циліндричного елемента не повинна бути меншою за величину, визначену з наступних формул:

$$e_{min1} = \frac{0,833 \cdot p \cdot D_0}{2 \cdot f \cdot z + 0,833 \cdot p} = \frac{0,833 \cdot 2,1 \cdot 2350}{2 \cdot 262,5 \cdot 1 + 0,833 \cdot 2,1} \text{ мм}, \quad (2)$$

$$= 7,8$$

де $D_0 = 2350$ мм - зовнішній діаметр циліндричної обичайки корпусу.

z – коефіцієнт зварних швів (дорівнює 1, так як проводиться 100% контроль зварних швів).

$$e_{min2} = \frac{D_0}{500} + 1,5 = \frac{2350}{500} + 1,5 = 6,2 \text{ мм}. \quad (3)$$

Мінімальна допустима товщина для циліндричної обичайки складає:

$$e_{min} = \max(e_{min1}; e_{min2}) + c = \max(7,8; 6,2) + 0,0 = 7,8 \text{ мм}, \quad (4)$$

c – сума прибавок до розрахункової товщини елементів корпусу:

$$c = c_1 + c_2 = 0,0 + 0,0 = 0,0 \text{ мм}, \quad (5)$$

c_1 – прибавка для компенсації корозії,

c_2 – мінусовий допуск для листового прокату для листа класу "С" згідно з вимогами ДСТУ EN 10029:2022 [9].

Мінімальна розрахункова товщина днища із умови стійкості в межах пружності e_b :

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot D_i) \cdot \left[\frac{0,833}{111 \cdot f_b} \cdot \left(\frac{D_i}{r}\right)^{0,825} \right]^{\frac{2}{3}} \text{ мм}, \quad (6)$$

де D_i – 2330 мм, розрахунковий внутрішній діаметр днища,

R – 1880 мм, радіус в центральній зоні.

r – 362 мм, радіус в крайовій зоні.

Допустиме напруження f_b :

$$f_b = \frac{ReH}{1,5} = 306,7 \text{ МПа}, \quad (7)$$

$$e_b = (0,75 \cdot 1880 + 0,2 \cdot 2330) \cdot \left[\frac{0,833}{111 \cdot 306,7} \cdot \left(\frac{2330}{362} \right)^{0,825} \right]^{\frac{2}{3}} = 7,2 \text{ мм}, \quad (8)$$

Мінімальна розрахункова товщина днища із умови обмеження мембранних напружень в центральній частині e_s :

$$e_s = \frac{0,833 \cdot p \cdot R}{2 \cdot f \cdot z - 0,417 \cdot p} = \frac{0,833 \cdot 2,1 \cdot 1880}{2 \cdot 262,5 \cdot 1 - 0,417 \cdot 2,1} = 6,27 \text{ мм}, \quad (9)$$

Мінімальна розрахункова товщина із умов міцності в крайовій зоні e_y виконується методом ітерацій згідно ДСТУ EN 12493:2019 і становить $e_y = 8,964$ мм.

Порівнявши отримані розрахункові дані з вимогами ДОПНВ було обрано мінімальну товщину 8 мм – для корпусу і 10 мм – для днищ цистерни.

В програмному застосунку Autodesk Inventor 2024 було створено обичайки корпусу та хвилерізи, які кріпляться до корпусу за допомогою приварних пластин (рис. 5.)

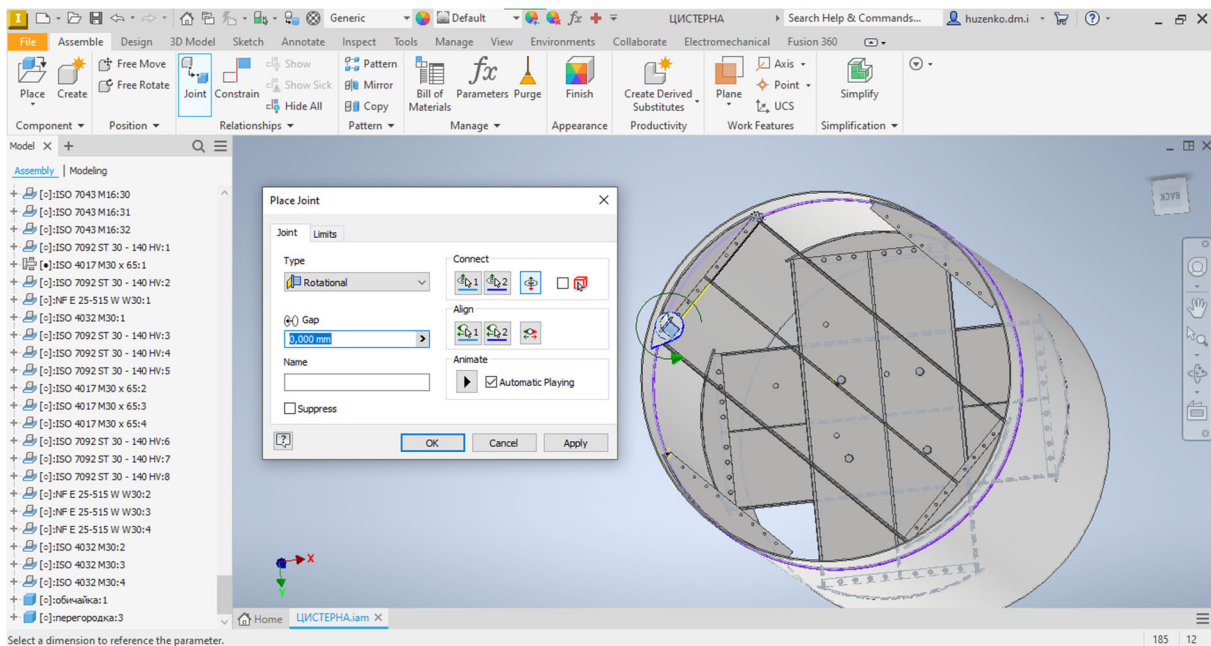


Рис. 5. – Створення взаємозв'язків конструкції

Болтові з'єднання було створено за допомогою генератора компонентів болтового з'єднання (рис. 6.)

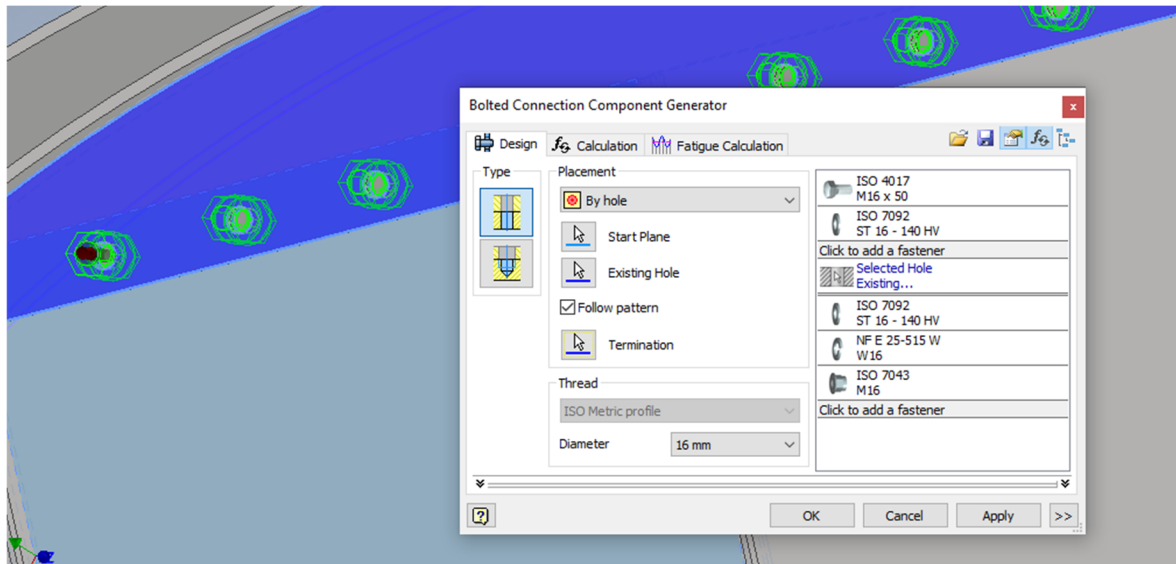


Рис. 6. – Генератор компонентів болтового з'єднання

Для розрахунку використовувався тиск гідравлічного випробування, який дорівнює 2,1 МПа (робочий тиск 1.6 МПа). Після проведення розрахунку програмою, ми проаналізували напруження, які виникли на елементах корпусу цистерни (Рис. 7). Максимальне напруження в корпусі складо 375,3 МПа.

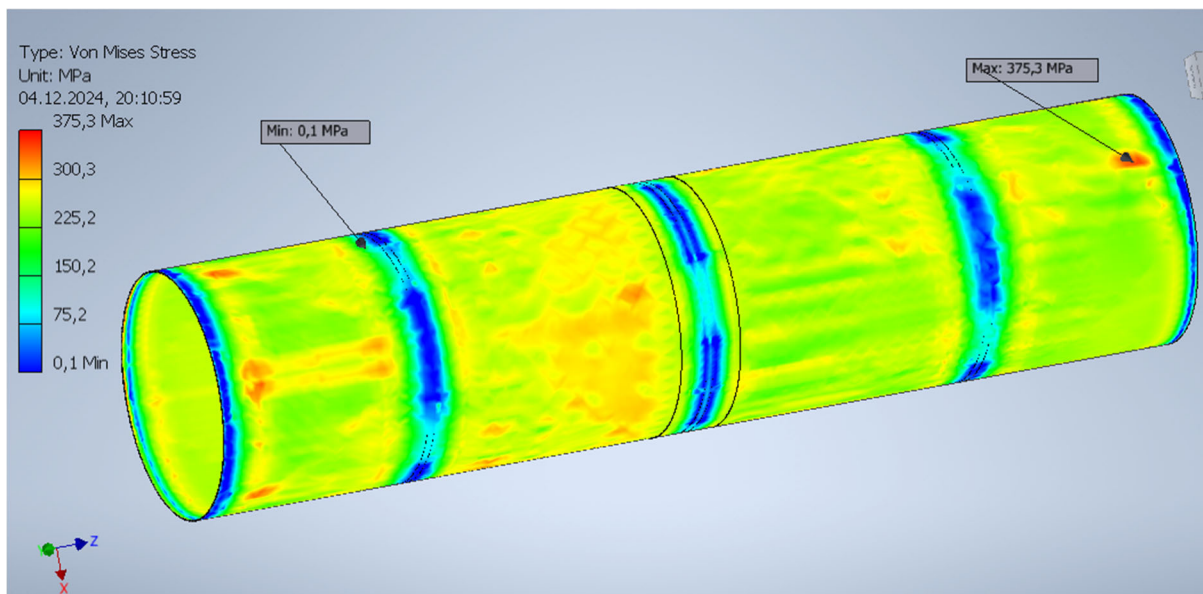


Рис. 7. – Напруження Von Mises Stress

Мінімальний фактор безпеки склав 1,23 (рис 8).

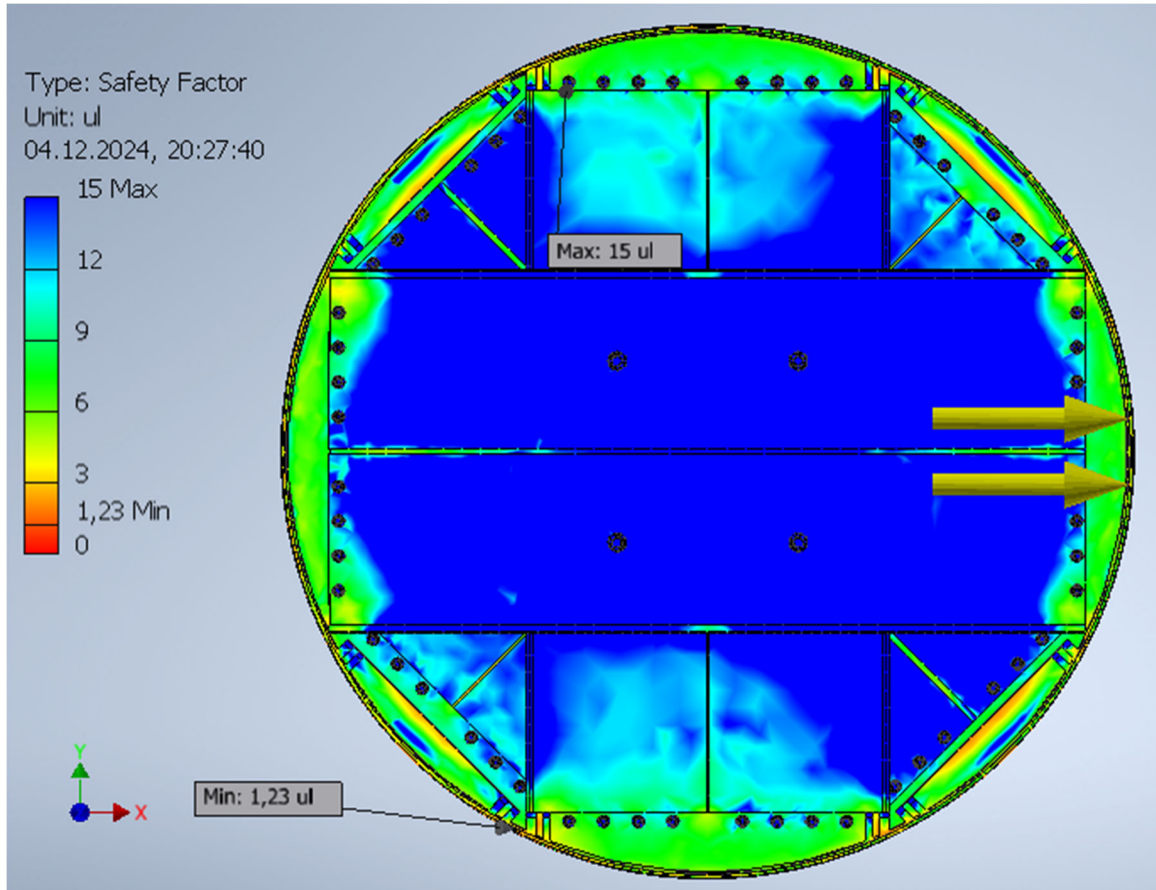


Рис. 8. – Показники фактору безпеки (поперечний розріз)

Далі була створена модель днища з зміцнювальним кільцем на отворі для люка-лазу (На міцність перевіряється саме днище з отвором так як отвір послаблює конструкції і потребує зміцнення). Результати розрахунку наведені на рисунку 2.18, фактор безпеки склав 1,14 (рис. 9).

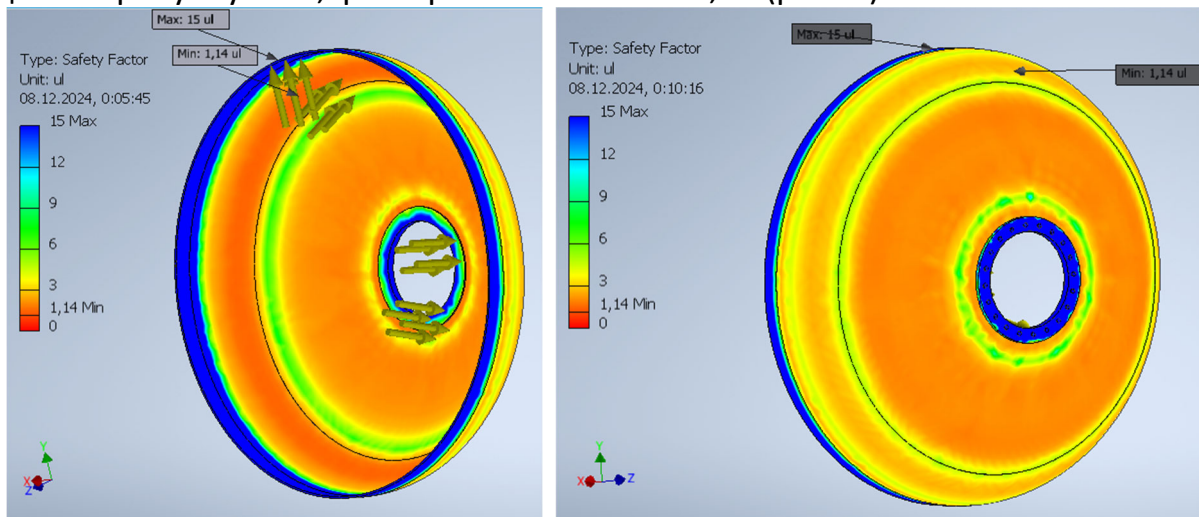


Рис. 9. – Фактор безпеки для днища з люком лазом

Висновки. У ході дослідження було обґрунтовано конструкцію цистерни для транспортування та тимчасового зберігання зріджених вуглеводневих газів. Проведено розрахунки міцності елементів конструкції із застосуванням методу скінченних елементів, що дозволило визначити критичні ділянки та забезпечити необхідний рівень безпеки. Аналіз механічних властивостей сталі 16Г2АФ показав її придатність для виготовлення корпусу цистерни, враховуючи умови експлуатації при високому тиску та перепадах температур. Використання сучасних інженерних методів розрахунку дозволяє оптимізувати конструкцію та підвищити її експлуатаційну надійність.

ЛІТЕРАТУРА

1. The Engineering ToolBox. Propane Butane Mixture - Evaporation Pressure. Evaporation pressure of propane butane mixture vs. temperature. Режим доступу: https://www.engineeringtoolbox.com/propane-butane-mix-d_1043.html#butane_vapor_pressure_absolute (Дата звернення 10.04.2025)
2. KADATEC. LPG TANKWAGEN UND ISO TANKCONTAINER. FÜR SICHERE TRANSPORT UND DISTRIBUTION VON FLÜSSIGGAS. Режим доступу: https://www.kadatec.cz/wp-content/uploads/2017/11/LPG_Tankwagen.pdf (Дата звернення 10.04.2025)
3. Metinvest-smc. Характеристика сталі 16Г2АФ. Режим доступу: https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-16g2af/?srsId=AfmBOov400Dk8DIDn9_VNr7AFzpxPID6acEzf0vTPVGoxFXIqgs0di (Дата звернення 10.04.2025)
4. ДСТУ EN 10028-3:2018 (EN 10028-3:2017, IDT). Вироби пласкі сталеві для використання під тиском. Частина 3. Нормалізовані зварювані дрібнозернисті сталі.
5. ДСТУ ISO 148-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на ударний вигин за Шарпі на маятниковому копрі. Частина 1. Метод випробування (ISO 148-1:2016, IDT)
6. Європейська Угода "Про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПНВ) 2025 р.
7. ДСТУ 8541:2015 Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови
8. ДСТУ EN 12493:2019 Устаткування та комплектування для зрідженого нафтового газу. Зварні сталеві баки для автоцистерн. Проектування та виготовлення (EN 12493:2013, IDT)
9. ДСТУ EN 10029:2022 Гарячекатаний сталевий лист завтовшки 3 мм і більше. Допуски на розміри та форму (EN 10029:2010, IDT)