Міністерство освіти і науки України

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інженерної механіки

Кафедра нафтогазових машин та обладнання

Григорців Арсен Васильович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

УДК 622

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Дослідження та вдосконалення конструкції адсорбера

(назва роботи)

Обладнання нафтових і газових промислів

(назва освітньої програми)

185 – «Нафтогазова інженерія та технології»

(шифр і назва спеціальності)

_____

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього рівня)

Науковий керівник

Михайлюк В.В. канд. техн. наук, доцент

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

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент Я. Т. Федорович

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

професор Лях М.М.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025 рік

З М І С Т

Вступ 6
1 Очищення газових та парогазових сумішей 10
2 Аналіз літературних джерел стосовно застосування та особливостей конструкцій адсорберів 20
2.1 Аналіз застосування адсорберів у нафтогазовій галузі 20
2.1.1 Загальна характеристика адсорбційних процесів у нафтогазовій галузі 20
2.1.2. Осушування природного та попутного газу 21
2.1.3. Підготовка газу до магістрального транспортування 22
2.1.4. Очищення газу перед кріогенними процесами (LNG, NGL) 22
2.1.5. Підготовка та стабілізація попутного нафтового газу 23
2.1.6. PSA-адсорбери у виробництві водню на НПЗ 23
2.1.7. Очищення та утилізація парів нафтопродуктів 24
2.1.8. Порівняння адсорбції з альтернативними методами 25
2.1.9. Узагальнені висновки 25
2.2 Аналіз конструкцій адсорберів на основі патентного пошуку 26
3 Особливості проектування виробів у програмі SolidWorks 37
4 Розроблення конструкції адсорбера та досліження його роботи 41
4.1 Аналіз роботи адсорбера 41
4.2 Вдосконалення конструкції адсорбера 44
4.3 Дослідження конструкції адсорбера 44
5 Інженерні розрахунки 50
5.1 Розрахунок товщини циліндричної обичайки 50
5.2 Розрахунок товщини еліптичного днища 52
5.3 Розрахунок опорних стійок 56
6 Транспортування, заберігання та монтаж адсорбера 60
6.1. Транспортування адсорбера 60
6.1.1. Підготовка апарата до транспортування 60
6.1.2. Умови кріплення та безпечного перевезення 60
6.1.3. Види транспорту 61

6.2. Зберігання адсорбера 61
6.2.1. Вимоги до місця та умов зберігання 61
6.2.2. Захист внутрішньої порожнини 61
6.2.3. Періодичний контроль стану 62
6.3. Монтаж адсорбера 62
6.3.1. Підготовчі роботи 62
6.3.2. Установлення адсорбера 62
6.3.3. Монтаж комунікацій 63
6.3.4. Пусконалагоджувальні роботи 63
Висновки 64
Перелік посилань на джерела 65

РЕФЕРАТ

Магістерська робота Григорціва А.В. на тему " Дослідження та вдосконалення конструкції адсорбера" складається з пояснювальної записки, викладеної на 63 аркушах формату А4, яка вміщує 6 розділів, 1 таблицю, 30 рисунків, 21 найменування використаних джерел, і графічного матеріалу загальним обсягом 6 аркушів формату А1.

Об’єкт дослідження. Рух газу через шар адсорбенту в кільцесому адсорбері.

Мета роботи: дослідження роботи та вдосконалення кільцевого адсорбера з метою підвищення ефективності його роботи.

У роботі розглянуто процеси очищення газових і парогазових сумішей із застосуванням адсорбційних технологій, що широко використовуються в нафтогазовій галузі України. Проведено аналіз літературних і патентних джерел щодо конструкцій адсорберів, їхніх типів, особливостей роботи та сфер застосування — від осушування природного газу і підготовки його до магістрального транспортування до очищення газових потоків перед кріогенними процесами та використання PSA-адсорберів для виробництва водню. Здійснено порівняння адсорбційних методів з альтернативними технологіями очищення. У практичній частині роботи розроблено конструкцію адсорбера із використанням програмного комплексу SolidWorks, проаналізовано його роботу, виконано вдосконалення та досліджено конструктивні параметри. Проведено інженерні розрахунки елементів апарата: циліндричної обичайки, еліптичного днища та опорних стійок. Окрему увагу приділено питанням транспортування, зберігання та монтажу адсорбера відповідно до вимог безпеки та технологічних стандартів. Робота завершується узагальненими висновками щодо ефективності запропонованих конструктивних рішень і практичного застосування адсорберів у газопереробних процесах.

Ключові слова: адсорбція, адсорбер, кільцевий адсорбер, ефективність роботи, імітаційне моделювання, швидкість, газ.

ABSTRACT

Master's thesis by A.V. Grygorets on the topic “Research and improvement of the adsorber design” consists of an explanatory note, presented on 63 sheets of A4 format, which contains 6 sections, 1 table, 30 figures, 21 references, and graphic material with a total volume of 6 sheets of A1 format. Object of research. Gas flow through the adsorbent bed in a ring adsorber. Purpose of the work: to study the operation and improve the ring adsorber in order to increase its efficiency. The work considers the processes of purification of gas and steam-gas mixtures using adsorption technologies widely used in the oil and gas industry of Ukraine. An analysis of literature and patent sources on adsorber designs, their types, operating features, and areas of application was conducted, ranging from natural gas drying and preparation for mainline transportation to gas stream purification prior to cryogenic processes and the use of PSA adsorbers for hydrogen production. A comparison of adsorption methods with alternative purification technologies was carried out. In the practical part of the work, an adsorber design was developed using the SolidWorks software package, its operation was analyzed, improvements were made, and design parameters were investigated. Engineering calculations of the apparatus elements were performed: cylindrical shell, elliptical bottom, and support columns. Special attention was paid to the issues of transportation, storage, and installation of the adsorber in accordance with safety requirements and technological standards. The work concludes with general conclusions on the effectiveness of the proposed design solutions and the practical application of adsorbers in gas processing.

Keywords: adsorption, adsorber, ring adsorber, efficiency, simulation modeling, speed, gas.

Вступ

Актуальність роботи. Очищення газових і парогазових сумішей є одним із ключових етапів у нафтогазовій промисловості, від якого залежить надійність обладнання, якість кінцевого продукту та безпечність технологічних процесів. Для України, де значна частина інфраструктури з транспортування та переробки газу потребує модернізації, впровадження ефективних та енергоощадних методів очищення є особливо важливим. Адсорбційні технології відіграють у цьому провідну роль завдяки своїй універсальності, високій продуктивності та здатності забезпечувати глибоке очищення газових потоків навіть у складних умовах експлуатації. Сучасний розвиток нафтогазової галузі передбачає підвищення екологічних вимог, розширення використання кріогенних технологій (LNG, NGL), а також збільшення потреби у виробництві водню, зокрема на нафтопереробних заводах. Це потребує широкого застосування адсорберів різних конструкцій, здатних забезпечити стабільну роботу під високими навантаженнями та відповідати міжнародним стандартам чистоти газу. Тому аналіз існуючих рішень, порівняння їх із альтернативними методами та оптимізація конструкції адсорбційного обладнання є важливими як з наукової, так і з практичної точки зору. Актуальним також є завдання створення сучасних моделей обладнання з використанням CAD-систем, зокрема SolidWorks, що дозволяє підвищити якість проектування, прискорити виробництво та забезпечити точність інженерних розрахунків. Питання транспортування, монтажу та експлуатації адсорберів мають не менше значення, оскільки впливають на їхню надійність протягом усього життєвого циклу.

Отже, робота є актуальною завдяки зростаючим вимогам до ефективності та екологічності газопереробних процесів, потребі в оновленні технічної бази нафтогазової галузі України та необхідності впровадження сучасних інженерних рішень у проектуванні адсорбційного обладнання

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження роботи та вдосконалення кільцевого адсорбера з метою підвищення ефективності його роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати роботу та характеристики кільцевого адсорбера;

- розробити параметричну модель адсорбера, встановити керовані параметри;

- провести параметричну оптимізацію адсорбера, встановити отримані його характеристики та порівняти їх із харакетристиками базової конструкції.

Об’єкт досліджень. Рух газу через шар адсорбенту в кільцесому адсорбері.

Предмет дослідження. Розподіл швидкості газу в шарах адсорбента за різних параметрів конструкції адсорбера.

Методи дослідження. Аналітичний методи для збору і обробки інформації, метод імітаційного моделювання, параметрична оптимізація.

1 Очищення газових та парогазових сумішей

Основним типом адсорбційних процесів залишаються процеси періодичної дії, в яких адсорбер з нерухомим шаром адсорбенту після закінчення стадії очищення або розділення, що визначається вичерпуванням ємності адсорбенту, переключається на стадію десорбції [1]. У робочий цикл періодичного процесу зазвичай включають ряд додаткових стадій: сушку та охолодження адсорбенту, підвищення та скидання тиску тощо. Широке застосування автоматизації на адсорбційних установках дозволило виключити ручну працю при керуванні процесом.

Іншим перспективним методом, що має ряд значних переваг, є очищення та поділ газів у рухомому шарі адсорбенту. На жаль, досі не вирішена проблема отримання міцних, в умовах рухомого шару, адсорбентів, у зв'язку з чим широка промислова реаліція цього методу затримується.

У деяких випадках застосовується очищення та поділ газів у псевдозрідженому шарі адсорбенту. Слід зазаначити, що вже при швидкостях потоку 0,25 м/с, звичайних для періодичних адсорберів, адсорбційний процес лімітується швидкістю масопереносу адсорбтиву всередині гранул сорбенту (внутрішньодифузійною кінетикою), у зв'язку з чим переведення адсорбенту до псевдозрідженого стану не супроводжується інтенсифікацією самого процесу поглинання домішок відпрацювання адсорбційної ємності гранул. У цьому полгає основна відмінність наявність адсорбційних установок з псевдозрідженим шаром від каталітичних.

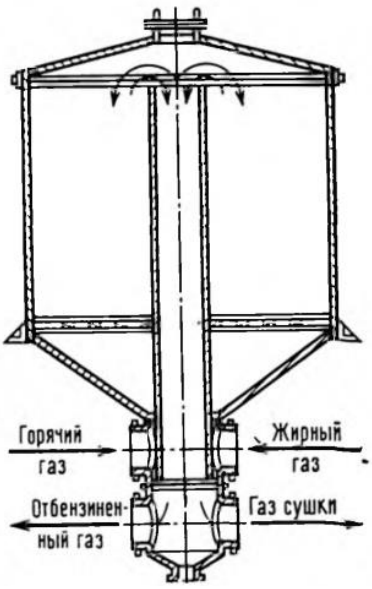
Перевагою процесу в псевдозрідженому шарі є можливість його проведення при високих швидкостях потоку, які на порядок вищі, ніж на установках із періодичними адсорберами. Тому зроблено спроби застосувати цей метод там, де потрібно очистити дуже великі обсяги газу, а компресія газу з економічної точки зору є невигідною.

Вимоги до механічної міцності адсорбенту на установках із псевдозрідженим шаром ще вище, ніж на установках з рухомим шаром.

Конструкція адсорберів в установках періодичної дії [1]

Вертикальний адсорбер. В адсорбційних установках періодичної дії найбільше поширення знайшли адсорбери, у яких відношення висоти шару до діаметру апарату більші за одиницю. Вони визначили назву вертикальних адсорберів. Конструкції апаратів цього типу дуже різноманітні.

Вертикальний адсорбер цього процесу (рис. 10,3) є металевий циліндричний апарат діаметром 2,1 та висотою 2,9 м. Висота шару вугілля в адсорберах - 2,5 м, завантаження вугілля в кожен адсорбер - 4 т.



Рисуно 10,3 – Вертикальний адсорбер

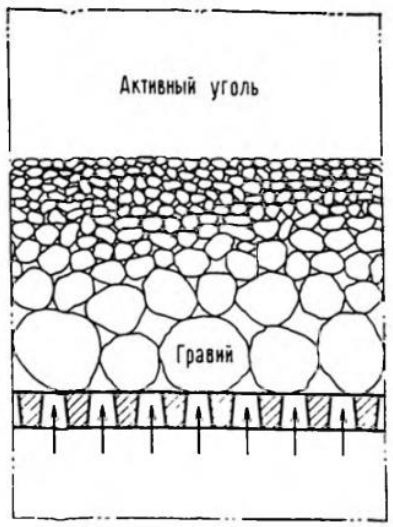


Рисунок 10,4 – Укладання підкладки в адсорбері.

Зверху адсорбери закриті кришками, прикріпленими до циліндричної частини болтами. Шар вугілля лежить на керамічній плиті; остання має велику кількість дрібних отворів, за допомогою яких вхідний газ рівномірно розподіляється за перерізом адсорбера. Керамічна плита спирається на литу чавунну решітку. На керамічну плиту насипають шар гравію висотою 100 - 200 мм. Зерна гравію по висоті підкладки нерівномірні (рис. 10,4): внизу розташовують великі шматки розміром 25-30 мм, потім послідовно фракції 15-25, 10-15 і 5-10 мм. Гравій оберігає

адсорбент від забруднення конденсатом, що міститься в жирному газі, а також перешкоджає прокиданню дрібниці та забиванню отворів у плиті.

Зверху шар вугілля щоб уникнути винесення покривають сіткою, виконаною з дроту завтовшки 0,8 мм з отворами розміром 2,5 мм [1].

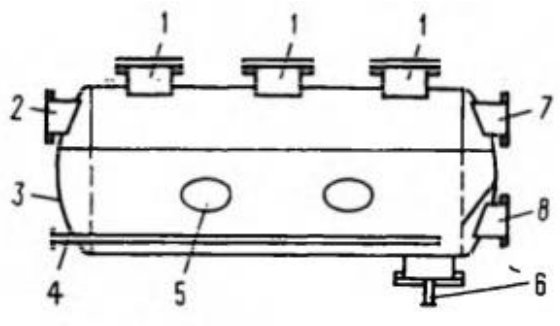
У нижній частині адсорбера знаходяться нижня і верхня головки з восьма штуцерами для введення та виведення газів і пар на різних стадіях процесу. Усередині адсорбера розташована труба, що відводить газ під час охолодження, сушіння та насичення. При десорбції водяну пару подають через труби у верхню частину адсорбера. Така конструкція дозволяє всі огради керування адсорберами зосередити внизу.

Адсорбери, що працюють при атмосферному тиску, звичай виконують зварними з листової сталі завтовшки 10 мм. Якщо в газі присутні агресивні домішки, як матеріал використовують леговану або нержавіючу сталь.

Горизонтальний адсорбер [1]

Загальний вигляд горизонтального адсорбера подано на рисунку 10,5.

Довжина горизонтальних адсорберів досягає 6 м, діаметр 2 м, висота шару адсорбенту при цьому дорівнює 0,8-1,0 м. переріз горизонтальних адсорберів при малій висоті шару та наявність сфероїдальних ділянок поставили під сумнів рівномірність розподілу парогазових потоків за перерізом такого апарату.



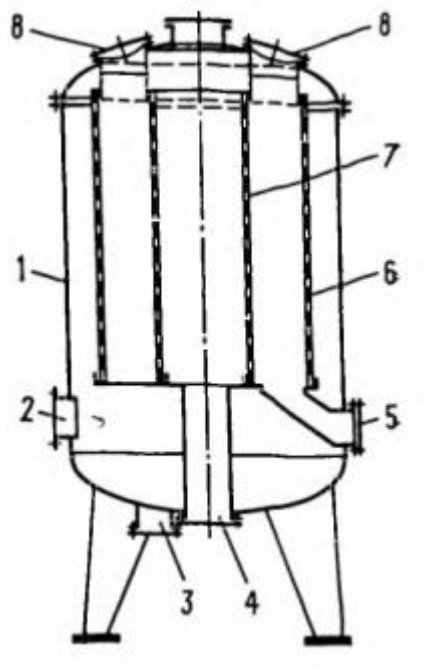
1 - люки для завантаження адсорбенту; 2 - штуцер для подачі газу на стадіях адсорбції, сушіння та охолодження; 3 - кожух; 4 –роздільник водяної пари на стадії десорбції; 5 - люк для вивантаження адсорбенту; 6 – штуцер для відведення конденсату; 7 – штуцер для відводу пари при десорбції; 8 - штуцер для відводу газу

Рисунок 10,5 – Горизонтальний адсорбер

Адсорбери горизонтальної конструкції слід рекомендувати тільки при очищенні великих кількостей газу в умовах, коли до ступеня очищення не пред'являються надто жорсткі вимоги.

Кільцевий адсорбер [1]

У разі очищення газу від домішок, присутніх у невеликих концентраціях концентраціях, іноді застосовують кільцеві адсорбери. Розріз такого адсорбера подано на рисунку 10,6.



1 - корпус; 2 - штуцер для подачі газу; 3 – штуцер для відведення пари при десорбції; 4 - штуцер для відведення газу та подачі пари; 5 - люк для вивантаження адсорбенгу; 6. 7 - решітки; 8 - люки для завантаження адсорбенту

Рисунок 10 – Кільцевий адсорбер

Вся конструкція змонтована в металевому корпусі 1. Газ для очищення через штуцер 2 надходить у зовнішню частину адсорбера, проходить у горизонтальному напрямку через кільцевий шар вугілля, знаходячися між внутрішньою 7 і зовнішньої 6 циліндричними гратами, і відводиться диться через штуцер 4. У стадіях сушіння та охолодження вказаний напрямок руху потоків зберігається. У стадії десорбції десорбент подають через штуцер 4, а парогазову суміш відводять

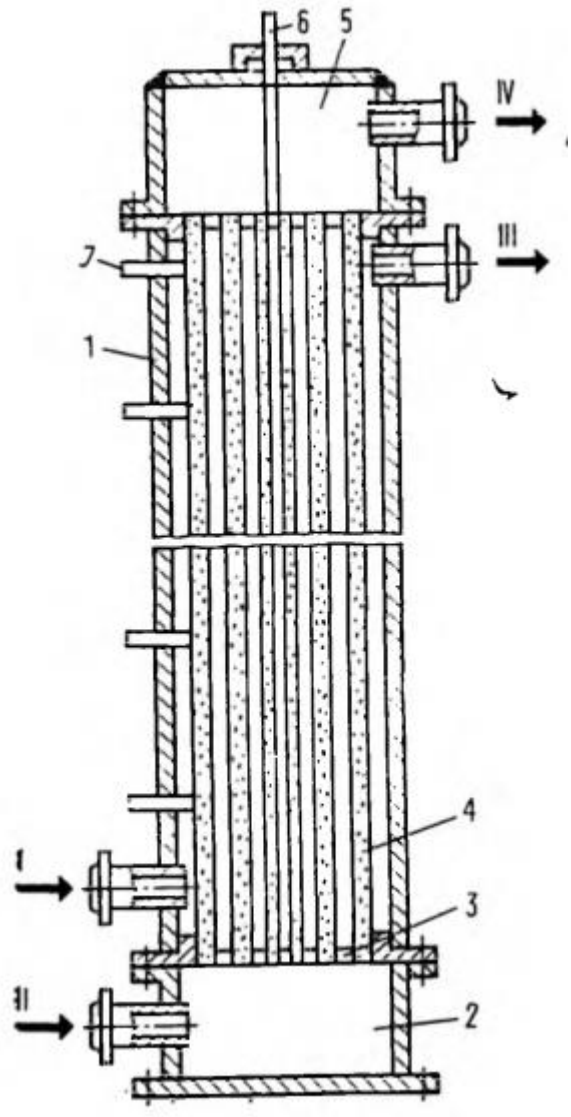
через штуцер 3. Завантажують адсорбент через люки 8, а вивантажують через люк 5.

Адсорбер із вертикальними теплообмінними елементами [1]

У тих випадках, коли потрібно прискорити процес теплообміну в стадіях нагрівання та охолодження або отримати десорбат у концентрованому вигляді, використовують адсорбери із вбудованими теплообмінними елементами. Найчастіше застосовують адсорбери, виконані у вигляді трубчастого теплообмінника (рис. 10,7); сорбент засипаний у трубки, а гріюче або охолоджувальне середовище знаходиться у міжтрубному просторі.

Прикладом ефективного використання адсорберів з вертикальними теплообмінними елементами є очищення аргону, гелію, неону від домішок кисню та азоту, здійснюється при низькій температурі (-180 ° С) і тиску 0,14 МПа [7]. Конструкція адсорбера показана на рис. 10,8.

Адсорбент (цеоліт) розташований у трубках висотою 2 м. При загальному числі трубок 51 загальне завантаження цеоліту в адсорбер становить 260 кг. Швидкість газового потоку в стадії очищення становить 0,016 м/с. Охолодження цеоліту здійснюю рідким киснем, що протікає в міжтрубному простірі адсорбера. Залишковий вміст кисню в очищеному аргоні становить 1…10%. Після відпрацювання адсорбційної ємності цеоліту його швидко нагрівають до l50°С, подаючи в міжтрубний простір азот, нагрітий до 420 °С.



I, III - теплоносій: II. IV - газ; 1 - корпус; 2, 5 - камери; 3 - газорозподільна решітка; 4 - трубчатка; 6 - кишеня для термопари; 7 – штуцер для відбору проб газу та вимірювання температури адсорбенту

Рисунок 10,7 – Адсорбер, виконаний у вигляді трубчатого теплообмінника

Адсорбер з притискним пристроєм [1]

У деяких випадках адсорбери постачають спеціальним притисканим пристроєм для забезпечення щільного прилягання верхньої решітки із сіткою до шару адсорбенту та зменшення його стирання.

При проектуванні адсорбційних установок з періодичними адсорберами слід уникати подачі гарячого та холодного газа одними комунікаціями. Наприклад, після перемикання адсорбера, зі стадії сушіння на стадію охолодження у разі

однопоточної системи подачі газу в апарат протягом перших 5-10 хв продовжує надходити нагрітий у комунікаціях газ, що знижує ефективність охолодження. Аналогічний недолік відмічено і при перемиканні адсорбера на стадію сушіння.

Чітке розмежування комунікацій гарячого та холодного газу дозволяє знизити інерційність процесів теплообміну.

З метою зменшення втрат тепла у зовнішнє середовище у стадіях десорбції та сушіння адсорбери зазвичай покривають шаром ізоляції.

Адсорбенти [1]

Адсорбційну здатність можуть мати будь-які пористі тверді тіла, однак у промисловості використовують лише тверді адсорбенти з сильно розвиненою внутрішньою поверхнею, що включає пори (капілярні канали) різних розмірів. Залежно від розмірів пори в адсорбентах умовно поділяють на три типи: мікропори, перехідні пори та макропори.

Мікропори мають розміри, порівняні з розміром молекул поглинається компонента. Ефективні радіуси мікропор перебувають у інтервалі від $5 \cdot 10^{-10}$ до $1,5\ 10^{-9}$ м.

Перехідні пори мають ефективні радіуси, набагато перевищують розміри адсорбованих молекул. Вони вагаються в межах від $1,5 \cdot 10^{-9}$ до $1,5 \cdot 10^{-7}$ м.

Макропори - найбільші пори адсорбентів, їх ефективні радіуси більше $2 \cdot 10^{-7}$м. Вони є транспортними каналами в зернах адсорбенту.

Залежно від переважаючого розміру пор адсорбенти поділяються на три структурні типи: макропористі, перехідно-пористі та мікропористі.

Макропористі адсорбенти в хімічній промисловості не використовують, основною сферою їх застосування є хроматографія.

У хімічній промисловості використовують перехіднопористі та мікропористі адсорбенти. До перехіднопористих адсорбентів відносять більшість марок силікогелів, алюмогелів та алюмосилікатних каталізаторів. Сюди ж відносяться багато видів природних глин, використовуваних для очищення олій. До мікропористих адсорбентів відносять цеоліти (молекулярні сита) та деякі типи активованого вугілля.

Більшість же промислових адсорбентів відносяться до змішаних структурних типів, що мають пори різного розміру.

Найбільш поширеними промисловими адсорбентами є активовані вугілля, силікагелі, алюмогелі та цеоліти.

Зазначені адсорбенти виготовляються зернистими, у вигляді частинок неправильної або майже правильної сферичної форми розміром 2 - 8 мм, та пилоподібними, що складаються з частинок розміром 50 - 200 мкм.

Активоване вугілля отримують з різних видів вугіллемісної сировини (деревина, торф, буре і кам'яне вугілля, кістки тварин, шкаралупа горіхів та ін.) шляхом їх термічної обробки без доступу повітря. Отримане при цьому вугілля є крупнопористим, тому він піддається активації з метою звільнення частини пор та утворення нових. Активація здійснюється окисленням газом або парою при температурах 850 - 900 ° С або обробкою хімічними реагентами при температурі до 650 °С.

Активоване вугілля має питому поверхню порядку 1000 – 1200 $м^2/г$. Вони гідрофобні, тому можуть успішно застосовуватися для адсорбції парів органічних речовин із газових сумішей [1].

Недоліком активованого вугілля є їхнє горючість (в повітрі вони спалахують при температурі близько 300 °С). Вугільна пил спалахує при температурі близько 200 °С, а при її концентрації 17 - 24 $г/см^3$ утворюється з киснем повітря вибухова суміш.

Силікагель являє собою гідратований гель кремнієвої кислоти. Останній отримують дією сірчаної чи соляної кислот на розчин силікату натрію Виділяється гель після промиття водою сушать до вологості 5 - 7 %, при якій досягається максимальна адсорбційна здатність. Силікагель відрізняється однорідністю та рівномірним розподілом пор, середній діаметр яких знаходиться в межах $(1\text{-}5)\cdot 10^{-9}$ м, має корпускулярну структуру - його пори утворені проміжками між частинками сферичної форми. Отже, розміри пор та їх обсяг залежать від розміру та щільності упаковки елементарних частинок. Питома поверхня силікагелю 400 – 500 $м^2/г$. Він є гідрофільним адсорбентом, причому поглинається ним волога зменшує здатність

його поглинати пари інших речовин. Силікагель широко застосовується для поглинання вологи, осушення газів, для поділу парів органічних речовин, а також як поглинач речовин, що погано сорбуються активованим вугіллям (наприклад, аміаку). У порівнянні з активованим вугіллям силікагель відрізняється значно більшою механічною міцністю, він негорючий і регенерується при порівняно низької температури (100 - 200 °С).

За сорбційними властивостями до силікагелю дуже близькі алюмогелі. Алюмогелі являють собою суміші нормального гідрату окису алюмінію А1(ОН)з та її напівгідратів, одержувані термічної обробкою гідрату окису алюмінію при температурі 600 - 1000 °С. сорбент, що утворюється, має пори із середнім діаметром $1\text{-}3\cdot10^{-9}$ м та середню питому поверхню 200 - 400 $м^2/г$. Алюмогель є гідрофільним адсорбентом. У промисловості застосовується для осушування різних газів та органічних рідин, а також для уловлювання вуглеводневих домішок з повітря та фтору з різних середовищ.

Цеоліти є природними або синтетичними адсорбентами, які є водними алюмосилікатами катіонів елементів першої та другої груп періодичної системи Д.І. Менделєєва. Як промислові адсорбенти застосовують головним чином синтетичні цеоліти. Синтетичні цеоліти мають практично ідеальну однорідну мікропористу структурою. Вони виявляють молекулярно-ситову дію, яка полягає в їх здатності не поглинати молекули, розмір яких більший розміру пор. Тому цеоліти є адсорбентами з дуже високою селективністю. Молекулярно-ситова дія цеолітів викокистовують у промисловості для поділу сумішей газів і рідин по розмірів молекул. Цеоліти відрізняються також високою поглинальною здатністю по відношенню до води та є високоефективними адсорбентами для глибокої осушеки газів, що містять невелику кількість вологи. З підвищенням температури поглинальна здатність цеолітів знижується менше, ніж у інших розглянутих адсорбентів, тому цеолітами можна осушувати рециркуляційними газовими потоками, що мають температуру до 300 °С.

Значне застосування як адсорбенти (переважно для очищення рідин від домішок та пігментів) отримали глинисті природні породи, до складу яких входять

мінерали з регулярною структурою. Глини піддають активації шляхом обробки сірчаної чи соляної кислоти. Більшість глин, хоч і має в своєму складі дрібнопористі мінерали, відноситься до перехіднопористим і крупнопористим адсорбентам. Питома поверхня таких адсорбентів вбирається у 150 $м^2/г$ [1].

2 Аналіз літературних джерел стосовно застосування та особливостей конструкцій адсорберів

2.1 Аналіз застосування адсорберів у нафтогазовій галузі

Адсорбційні технології відіграють ключову роль у нафтогазовій галузі, забезпечуючи високу якість підготовки газових і рідких вуглеводневих потоків до транспортування, зберігання та подальшої переробки. Завдяки високій селективності адсорбентів та можливості досягнення глибокого рівня очищення адсорбери стали невід'ємним елементом сучасних технологічних схем на газових промислах, газопереробних заводах (ГПЗ), нафтопереробних заводах (НПЗ), компресорних станціях, а також у кріогенній промисловості. Метою цього підрозділу є комплексний аналіз застосування адсорберів у нафтогазовій промисловості, включно з їх функціями, технологічною доцільністю, перевагами та галузевими вимогами [2-7].

2.1.1 Загальна характеристика адсорбційних процесів у нафтогазовій галузі

Адсорбція — це процес вибіркового поглинання певних компонентів із газових або рідких сумішей твердими адсорбентами. Основними матеріалами, що застосовуються у нафтогазовому комплексі, є:

- активований алюмооксид (активований алюміній);
- силікагель;
- активоване вугілля;
- молекулярні сита (цеоліти);
- спеціалізовані композитні адсорбенти.

Ключові вимоги, що висуваються до адсорбентів у нафтогазовій сфері:

- термостійкість у циклах регенерації;

- стійкість до агресивних компонентів (H_2S, CO_2, меркаптани);
- стабільність фізико-механічних властивостей;
- низьке пиловиділення;
- висока адсорбційна ємність.
-

Самі адсорбери працюють у таких режимах:

- TSA (Thermal Swing Adsorption) **–** регенерація нагрівом**;**
- PSA (Pressure Swing Adsorption) – регенерація зниженням тиску;
- VSA/VPSA – вакуумні процеси десорбції;
- RTSA, CTR, BTEX recovery – спеціалізовані режими.

Завдяки таким технологіям адсорбційні установки є максимально гнучкими, дозволяючи досягати саме тих параметрів очищення, які потрібні у конкретних сценаріях експлуатації [4-7].

2.1.2. Осушування природного та попутного газу

Осушування є одним з найважливіших процесів, оскільки більшість експлуатаційних проблем у газових системах пов'язана з наявністю водяної пари:

- утворення газових гідратів;
- обмерзання регулюючої арматури;
- прискорена корозія трубопроводів;
- зниження пропускної здатності.

Згідно з міжнародним стандартом ISO 13703 та галузевими нормами транспортування газу, вміст водяної пари повинен забезпечувати точку роси нижче –20…–70 °C**,** залежно від вимог системи.

Адсорбери дозволяють досягти наднизької точки роси, що недоступно для гліколевих абсорберів.

Переваги адсорбційних осушувачів:

- ефективність при високих тисках (до 25–100 бар);
- незначна залежність від коливань продуктивності;
- тривалий адсорбційний цикл (8–24 год);

• можливість регенерації адсорбенту.

Молекулярні сита типу 4A, 5A, 13X забезпечують точку роси до –100 °C, що відповідає найстрогішим вимогам LNG-процесів [3-6].

2.1.3. Підготовка газу до магістрального транспортування

Перед подачею газу у магістральні трубопроводи (згідно з вимогами AGA Report No. 5, ГОСТ 5542 та ДСТУ EN 16723) необхідно забезпечити:

• мінімальний вміст вологи;

• низьку концентрацію CO_2 і H_2S;

• відсутність механічних домішок.

Найбільш ефективним методом досягнення необхідних параметрів є застосування TSA-адсорберів на базі цеолітів. Їх використання дозволяє:

• підвищити ресурс лінійних ділянок трубопроводу;

• зменшити витрати на корозійний захист;

• уникнути аварійних ситуацій, пов'язаних із закупоркою льодом або гідратами.

На компресорних станціях адсорбери є стандартним обладнанням при підготовці газу до стискання, оскільки висока вологість викликає ерозію компресорних лопаток та обмерзання інжекторів [3-6].

2.1.4. Очищення газу перед кріогенними процесами (LNG, NGL)

Кріогенні процеси (скраплення газу, глибока переробка, вилучення етану, пропану, бутану) пред’являють найжорсткіші вимоги до чистоти газу:

• вода < 0,1 ppm;

• CO_2 < 50 ppm (для LNG — <1 ppm);

• відсутність H_2S та меркаптанів;

• мінімізація важких вуглеводнів (C_5^+).

Адсорбція є найефективнішим методом досягнення таких параметрів.

Переваги адсорбції у кріогенних блоках:

- висока селективність цеолітів до CO_2 і H_2S;
- глибоке видалення води;
- стійкість до перепадів тиску;
- довговічність адсорбенту при правильній регенерації (до 7–10 років).

Документи API 12J, API 14C та GPSA Engineering Data Book прямо рекомендують використовувати адсорбери для підготовки газу перед низькотемпературною обробкою [4-6].

2.1.5. Підготовка та стабілізація попутного нафтового газу

Попутний газ містить:

- важкі вуглеводні (C_5^+);
- вологу;
- сірководень і меркаптани;
- механічні домішки.

Завдання адсорбера:

- стабілізувати склад ПНГ перед компримуванням;
- видалити важкі фракції, що можуть конденсуватися;
- підготувати газ для подачі у факел, генератор або систему збору.

Найчастіше застосовуються адсорбери з активованим вугіллям та цеолітами. Переваги:

- невисока енергомісткість;
- компактність;
- можливість роботи у складних польових умовах.

2.1.6. PSA-адсорбери у виробництві водню на НПЗ

На НПЗ водень потрібен для процесів:

- гідрокрекінгу;
- гідроочищення нафтопродуктів;
- ізомеризації.

Після парового риформінгу газ містить домішки CO, CO_2, CH_4, N_2. Технологія PSA (Pressure Swing Adsorption) забезпечує отримання водню чистотою 99,999 %.

Переваги PSA для НПЗ:

- повна автоматизація;
- висока селективність;
- відсутність реагентів;
- низька вартість експлуатації;
- стабільність параметрів газу.

Згідно з UOP, Linde Engineering, Air Products, PSA — це промисловий стандарт для очищення водню.

2.1.7. Очищення та утилізація парів нафтопродуктів

На резервуарних парках та нафтобазах утворюються викиди VOC (летких органічних сполук).

Адсорбери з активованим вугіллям:

- уловлюють бензинові та нафтові пари;
- повертають вуглеводні у виробничий цикл;
- знижують викиди до рівнів, встановлених Directive 94/63/EC, ДСТУ ISO 16000.

Економічний ефект може становити до 3–8 % від об’єму втраченого бензину, що підтверджується галузевими дослідженнями.

2.1.8. Порівняння адсорбції з альтернативними методами

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз технологій очищення газів у нафтогазовій галузі

Метод	Переваги	Недоліки	Типові сфери використання
Адсорбція	Висока селективність, можливість досягнення наднизької точки роси, регенерація адсорбентів, довговічність	Висока ціна цеолітів, складність циклічного процесу	Осушування, кріогенні установки, PSA
Абсорбція (гліколь)	Низька вартість, проста експлуатація	Обмежена глибина осушення, залежність від коливань навантаження	Підготовка газу на промислах
Мембрани	Компактність, неперервна робота	Низька селективність, швидке забруднення	Часткове осушення, видалення CO_2
Каталітичні процеси	Можливість перетворення H_2S, CO	Висока температура, чутливість каталізаторів	Риформінг, десульфурація

2.1.9. Узагальнені висновки

1. Адсорбери є критично важливим обладнанням у більшості технологічних процесів нафтогазової промисловості.

2. Вони забезпечують досягнення необхідних параметрів газу для транспортування, кріогенних процесів, переробки та екологічних вимог.

3. У виробництві водню PSA-адсорбери є стандартом світової практики.

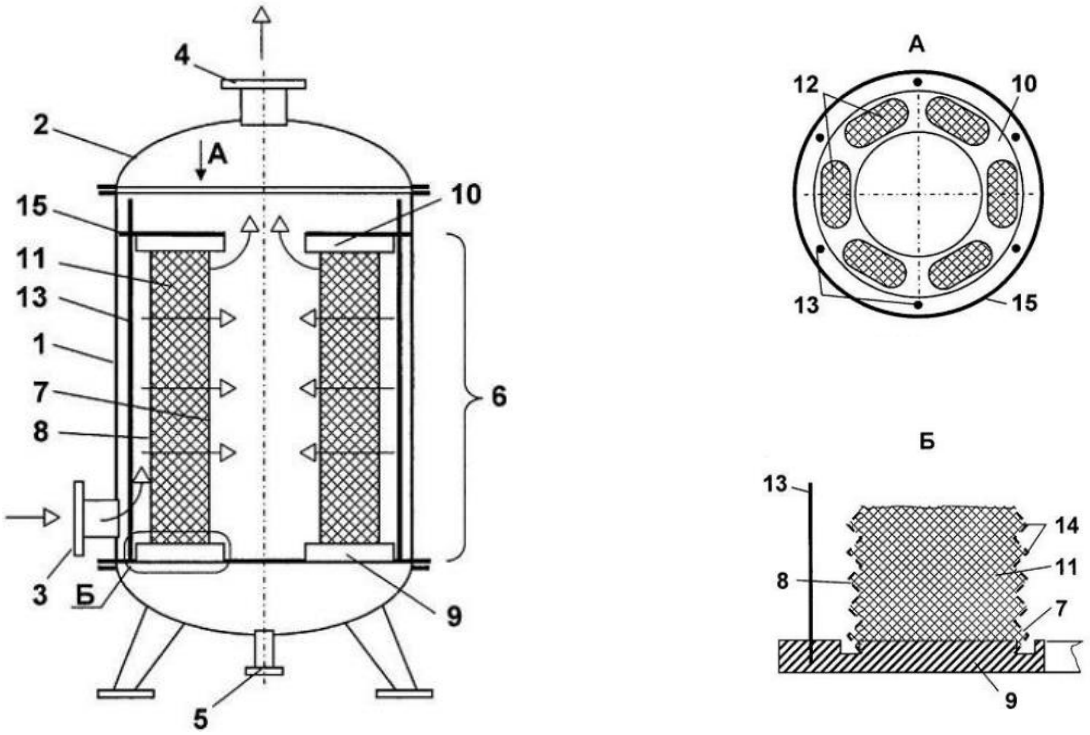
4. Завдяки високій селективності адсорбція залишається найефективнішою технологією глибокого осушення та очищення.

5. Використання адсорберів суттєво підвищує енергоефективність, надійність і екологічність нафтогазових підприємств.

2.2 Аналіз конструкцій адсорберів на основі патентного пошуку

2.2.2 Адсорбер [7]

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, на яких зображено на рисунку 2.1. Адсорбер містить вертикальний корпус 1 з накривкою 2, штуцери 3-5, а також кільцеву контактну частину 6, що складається з двох співвісних гофрованих оболонок 7 і 8 з перфораціями, простір між якими закрито з торців кільцевими накривками 9 і 10 та заповнено адсорбентом 11, при цьому нижню кільцеву накривку 9 виконано суцільною, а верхню накривку 10 - з отворами 12 для завантаження й розвантаження адсорбенту, а накривки 9 і 10 з'єднані між собою стрижневими дистанційними елементами 13.



1 – корпус; 2 – накривка; 3, 4, 5 – штуцери; 6 – кільцева контактна частина; 7, 8 – гофрована оболонка з перфорацією; 9, 10 – кільцеві накривки; 11 – адсорбент; 12 – отвори у накривці 10; 13 – стрижневі дистанційні елементи

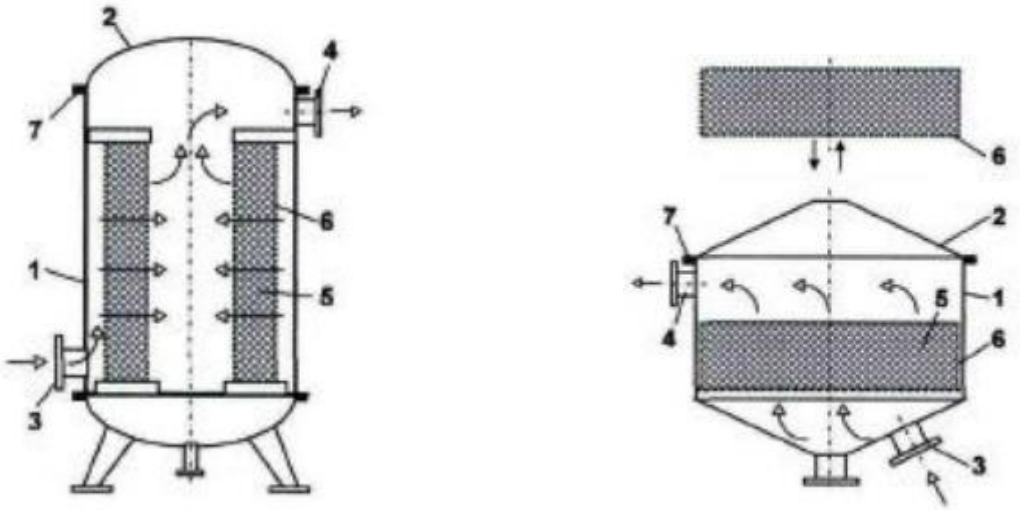
Рисунок 2.1 – Адсорбер

Гофровані оболонки 6 і 7 виконано з кільцевими гофрами 14, верхню кільцеву накривку 10 виконано з можливістю регулювання її положення по висоті вертикального корпуса 1 і споряджено ущільненням 15, при цьому кільцеву контактну частину 6 виконано у вигляді знімного блока з можливістю його вилучення з вертикального корпуса 1 (Фіг. 1-3). Адсорбер працює у такий спосіб. Перед заповненням кільцевої контактної частини 6 адсорбентом з вертикального корпуса 1 знімають накривку 2, виймають зазначену контактну частину 6 і за потреби крізь отвори 12 верхньої кільцевої накривки 9 з порожнини між співвісними гофрованими оболонками 7 і 8 видаляють відпрацьований адсорбент. Далі залежно від параметрів оброблюваного рідкого, парового або газового потоку верхню кільцеву накривку 10 переміщають на стрижневих дистанційний елементах 13, фіксують її і крізь отвори 12 кільцеву контактну частину 6 заповнюють адсорбентом. Після цього кільцеву контактну частину 6 адсорбентом встановлюють у вертикальному корпусі 1 і закривають його накривкою 2. Газову, парову або рідку суміш, що підлягає розділенню, спрямовують у патрубок 3, після чого вона рухається в кільцевому проміжку між корпусом 1 і перфорованою оболонкою 8. Далі суміш проходить крізь перфорацію кільцевих гофрів 14 оболонки 8, шар адсорбенту 11 у радіальному напрямку, крізь перфорацію оболонки 7 потрапляє в її порожнину і нарешті крізь патрубок 4 видаляється з адсорбера (див. Фіг. 1). Пропонована конструкція адсорбера істотно розширює його технологічні можливості.

2.2.3 Адсорбер [8]

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, на яких зображено: на Фіг. 1 - поздовжній розріз адсорбера з перфорованим стаканом у вигляді кільцевого циліндра; на Фіг. 2 - поздовжній розріз адсорбера з циліндричним перфорованим стаканом. Адсорбер містить вертикальний корпус 1, знімну кришку 2, штуцери 3 і 4, а також заповнюваний адсорбентом 5 перфорований стакан 6, який виконано знімним з можливістю його вилучення з вертикального корпусу 1 та його

встановлення у вертикальному корпусі 1 крізь верхню основу вертикального корпусу 1 за умови знятої знімної кришки 2.



1 – корпус; 2 – кришка; 3, 4 – штуцер; 5 – адсорбент; 6 – перфорований стакан

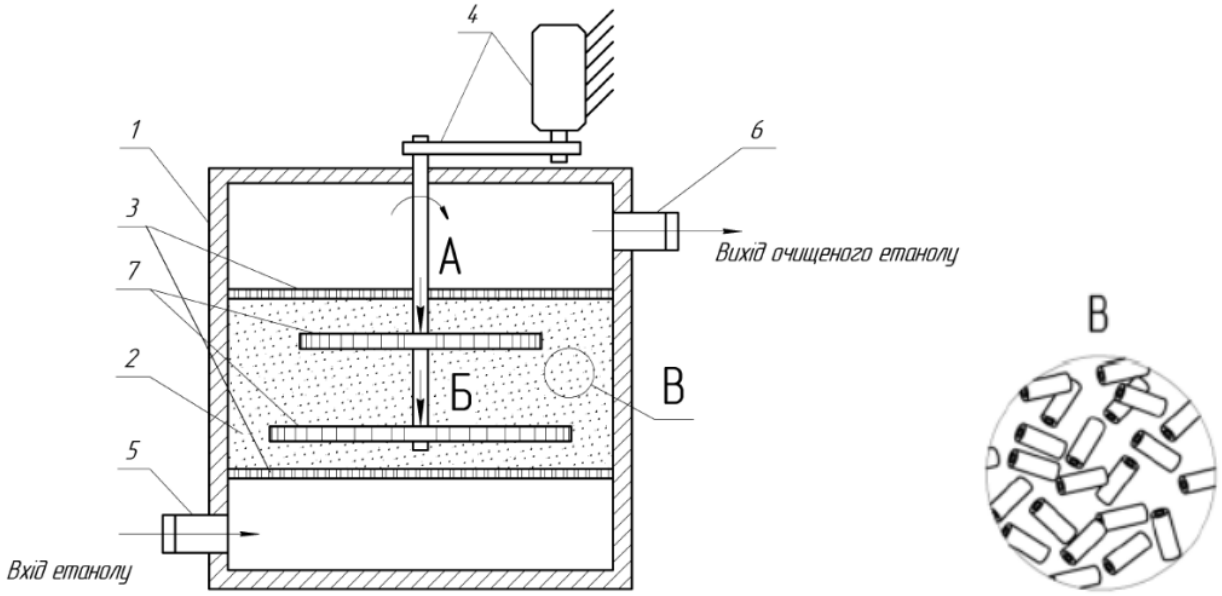
Рисунок 2.2 – Конструкція адсорбера

При цьому знімну кришку 2 з вертикальним корпусом 1 може бути з'єднано за допомогою байонетного затвора 7. Перфорований стакан може бути виконаний у вигляді кільцевого циліндра (Фіг. 1) або у вигляді циліндра (Фіг. 2). Адсорбер працює в такий спосіб. Газову, парову або рідку суміш, що підлягає розділенню, спрямовують у штуцер 3, після чого вона проходить крізь перфорацію перфорованого стакана 6, шар адсорбенту 5 і далі крізь патрубок 4 видаляється з адсорбера (див. Фіг. 1, 2). За потреби заміни адсорбенту 5 у перфорованому стакані 6 знімну кришку 2 знімають з вертикального корпусу 1, після чого перфорований стакан 6 видаляють за межі адсорбера. Після заміни адсорбенту 5 перфорований стакан 6 встановлюють у вертикальному корпусі 1. Пропонований конструкція адсорбера істотно підвищує зручність його експлуатації.

2.2.4 Адсорбер для очищення етанолу [9]

Загальний вигляд адсорбера для очищення етанолу зображений на фіг. 1, на фіг. 2 - мембранний елемент з сорбуючого шару; на фіг. 3 - перемішувач у вигляді

двох кругових співвісних дисків різного діаметра зі спіральними прорізями, вид знизу. Адсорбер мембранний для очищення етанолу містить корпус 1, сорбуючий шар з мембранними елементами 2, обмежувальні решітки 3, електродвигун із механічною передачею 4, вхідний 5 та вихідний 6 патрубки, перемішувач у вигляді двох кругових співвісних дисків різного діаметра із спіральними прорізями 7. Адсорбер для очищення етанолу працює наступним чином. Етиловий спирт (міцністю від 90 до 96 %), який містить органічні домішки (альдегіди, кетони, сивушні масла та інші) подається в корпус 1 через вхідний патрубок 5.



1 – корпус; 2 – сорбуючий шар з мембранними елементами; 3 – обмежувальні решітки; 4 – двигун з механічною передачею; 5 – вхідний патрубок; 6 – вихідний патрубок; 7 – диск із спіральними прорізами

Рисунок 2.3 – Конструкція адсорбера

Перемішувач у вигляді двох кругових співвісних дисків різного діаметра зі спіральними прорізями 7, який встановлений між верхньою та нижньою обмежувальними решітками 3 за допомогою електродвигуна із механічною передачею 4 постійно перемішує сорбуючий шар мембранних елементів 2 (число обертів скоби від 0,5 с -1 до 1 с-1), породжує радіальні та тангенційні потоки рідини, тим самим створюючи сприятливі гідродинамічні умови для контактування мембранних елементів 2 з етанолом. Спіральні прорізі на кругових співвісних

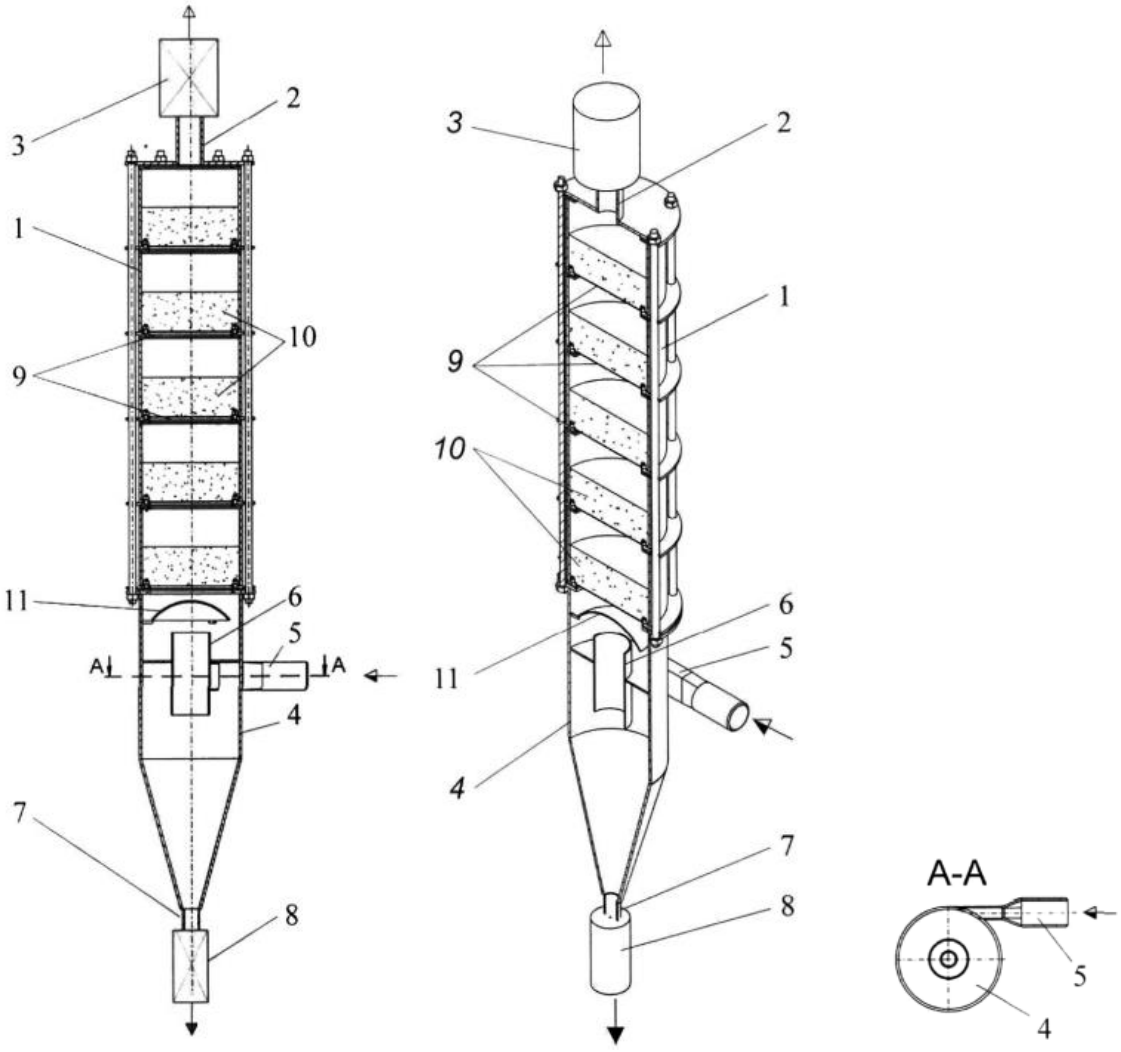
дисках 7 додатково спричинять осьовий рух мембранних елементів 2 в суміші. Різні діаметри двох кругових співвісних дисків, які зменшуються по вертикалі, формують потоки із різними лінійними швидкостями, що призводить до створення перепаду тисків у рідини. Таким чином, буде забезпечуватися повне перемішування суміші у адсорбері. Отже, радіальні, тангенційні та осьові рухи рідини будуть постійно здійснювати збурення мембранних елементів 2, унеможливлять утворення застійних зон по всьому робочому об'єму адсорбера для очищення етанолу. Температура вихідного етилового спирту може бути від 10 ºС до 50 ºС. При цьому відбувається активне видалення органічних домішок з етилового спирту, їх акумуляція в кавернах (мікропустотах) мембранних елементів 2. На відміну від сорбції органічних домішок іншими сорбентами, наприклад активованим вугіллям, коли, в першу чергу, сорбент забирає легко сорбовані речовини, насичується ними і вже не може вбирати важко сорбовані речовини, то мембранні елементи 2, дякуючи пластифікуючому ефекту, забирають з етанолу одночасно і легко- і важкосорбовані домішки. Тому, при сорбції мембранними елементами 2 одержуємо етиловий спирт, який містить від 10-4 до 10-5 % (мкс) органічних домішок, що набагато менше гранично допустимих концентрацій. Окрім цього, при сорбції активованим вугіллям виділяється тепло та підвищується температура, що викликає спікання частинок вугілля, а це негативно впливає на процес сорбції. При проведенні сорбції мембранними елементами 2 підвищення температури, навпаки активує процес. Отриманий очищений етанол залишає адсорбер через вихідний патрубок 6 і поступає в ємність для зберігання. Для відновлення адсорбційних властивостей мембранних елементів 2 (сорбенту) проводять їх регенерацію, тобто організовують процес видалення сорбованих з етилового спирту органічних домішок. Для проведення процесу регенерації з адсорбера через вхідний патрубок 5 зливають етанол і через цей же патрубок 5 подають гаряче повітря або перегріту пару (температура від 100 ºС до 110 ºС), яка проходить через обмежувальні решітки 3 та шар сорбенту х мембранними елементами 2 і виходить через вихідний патрубок 6 разом з паровою фазою органічних домішок. Процес десорбції триває близько 30-40 хвилин. Процес

регенерації (десорбції) проводять наступним чином. Нагрівання мембранних елементів 2 активізує рух молекул поглинутих органічних домішок, які знаходяться в пустотах (кавернах) стінок мембранних елементів. Відбувається проникнення цих молекул через тонкі перегородки, які розділяють каверни. Цей процес називається термодифузією на молекулярному рівні. Пройшовши через ці перегородки, молекули потрапляють на зовнішню поверхню мембранних елементів 2, де контактують з гарячим газоподібним теплоносієм (повітрям або перегрітою парою), одержують тепло фазового переходу, перетворюються на пару та відриваються від поверхні мембранних елементів 2. Після очищення мембранних елементів адсорбер знову готовий до роботи. Процес регенерації мембранних елементів 2 має певну перевагу порівняно з процесом регенерації активованого вугілля. По-перше, повністю відсутні витрати сорбенту, тоді як витрати при регенерації активованого вугілля складають 25-30 % через його перетворення на пил. По-друге, через певний проміжок часу експлуатації адсорбера з активованим вугіллям, його потрібно повністю заміняти, тоді як адсорбер з мембранними елементами такої заміни не потребує. По-третє, при регенерації активованого вугілля, може відбуватися його спікання, тоді як з мембранними елементами цього не відбувається. Технічний результат від реалізації корисної моделі полягає в створенні адсорбера для очищення етанолу, використання якого, в цілому, в сукупності із мембранними елементами, зменшує витрати на виробництво етанолу.

2.2.5 АДСОРБЕР [10]

Суть запропонованої корисної моделі пояснюють схемами, які зображені на: фіг. 1 - загальна схема запропонованого адсорбера; фіг. 2 - вид адсорбера в аксонометрії; фіг. 3 - загальна схема запропонованого адсорбера вигляд А-А. Адсорбер (фіг. 1, фіг. 2, фіг. 3) містить вертикальний корпус 1 з вихідним патрубком 2 і регулювально-запірною арматурою 3 розташовані в його верхній частині, а в нижній частині адсорбера під'єднаний гідроциклон 4 з тангенціально під'єднаним до його циліндричної частини вхідним патрубком 5 та у верхній його

частині по центру встановлено вихідний патрубок 6, у нижній частині на виході з конічної частини гідроциклона 4 встановлено зливний патрубок 7 з регулювальнозапірною арматурою 8. Всередині по висоту вертикального корпусу 1 розташовані і поділені на секції обмежувальні ґратки 9, які частково заповнені адсорбентом 10, а під нижньою обмежувальною ґраткою над вихідним патрубком 6 гідроциклона встановлено відбивач 11 сферичної форми розташований сферою до нижньої обмежувальної ґратки. Адсорбер працює наступним чином (фіг. 1, фіг. 2, фіг. 3).



1 – корпус; 2 – вхідний патрубок; 3 – регулювальна арматура; 4 – гідроциклон; 5 – вхідний патрубок; 6 – вихідний патрубок; 7 – зливний патрубок; 8 – регулювально-запірна арматура; 9 – обмежувальні гратки; 10 – адсорбент; 11 – відбивач

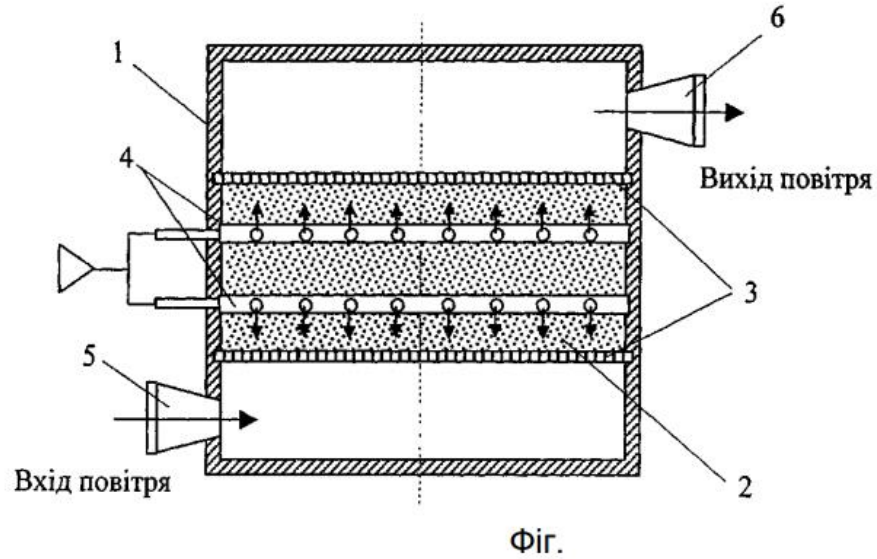
Рисунок 2.4 – Адсорбер

В нижній частині вертикального корпусу 1 адсорбера під'єднано гідроциклон 4. У вхідний патрубок 5, який тангенціально під'єднаний до циліндричної частини гідроциклона 4 подають газ для очищення від вуглекислого газу або інших небезпечних (шкідливих) газоподібних речовин. У гідроциклоні 4 проходить попереднє очищення газу від механічних частин та краплинної вологи де механічні частини і рідину виводять через конічну частину гідроциклона та зливний патрубок 7 з регулювально-запірною арматурою 8, а попередньо очищений газ подають через вихідний патрубок 6 до нижньої обмежувальної ґратки 9 частково заповненої адсорбентом 10. Для забезпечення більш рівномірного надходження потоку газу до всієї поверхні нижньої ґратки, між вихідним патрубком 6 та нижньою обмежувальною ґраткою встановлено відбивач 11 сферичної форми при цьому сферою розташований до поверхні нижньої обмежувальної ґратки. Газ попередньо очищений в гідроциклоні 4 проходить через обмежувальні ґратки 9 частково заповнені адсорбеном 10 при цьому не забруднюючи адсорбент механічними частинами та вологою, і оброблений газ адсорбентом надходить до вихідного патрубка 2 з регулювально-запірною арматурою 3, які знаходяться у верхній частині вертикального корпусу 1. Регулювально-запірна арматура 3 та 8 дає змогу вибирати більш раціональні режими роботи адсорбера для певних умов. В процесі роботи запропонованого адсорбера попередньо очищений газ в гідроциклоні не буде забруднювати адсорбент механічними частинами і вологою, забезпечуючи значно більший термін якісної роботи адсорбенту і в цілому адсорбера.

2.2.8 Адсорбер вугільний [11]

Суть винаходу пояснюється кресленням, на якому зображено адсорбер вугільний, який містить корпус 1, сорбіруючий шар 2, обмежувальні решітки 3, систему перфорованих трубок 4, вхідний і вихідний патрубки 5 і 6 відповідно. Адсорбер вугільний працює наступним чином. Повітря, що фільтрується, надходить у пристрій через вхідний патрубок 6, проходить через сорбіруючий шар

2 (вугілля импрегнірованне СКТ - ЗИ), засипаний між обмежувальними решітками 3. Стиснуте повітря періодично, в імпульсному режимі, подається до сорбіруючого шару, за допомогою системи перфорованих трубок 4. Тим самим, відбувається перемішування сорбенту стиснутим повітрям, що дозволяє усунути спікання і надмірне ущільнення сорбіруючого шару в процесі експлуатації. Завдяки цьому, фільтруючи властивості сорбенту будуть відновлюватися, що приведе до збільшення терміну служби адсорбера вугільного.



Фіг.

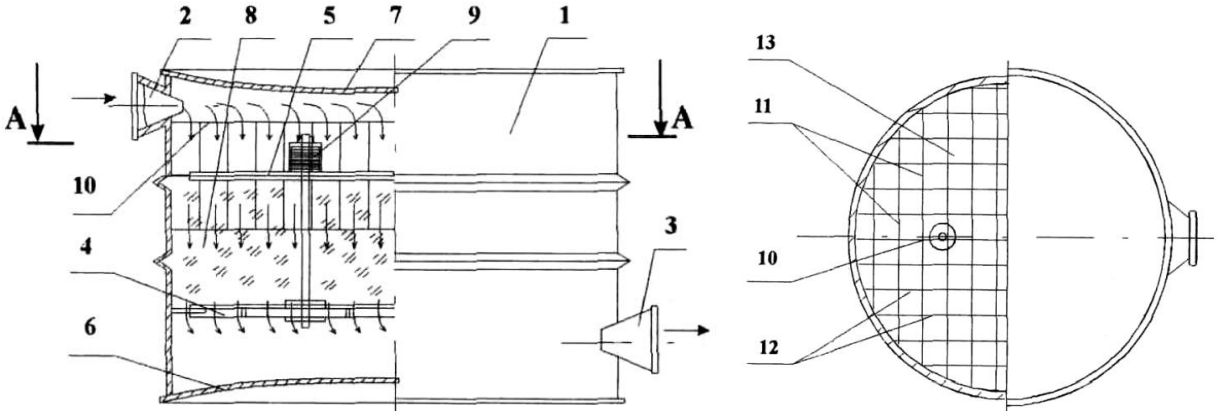
1 – корпус; 2 – сорбуючий шар; 3 – обмежувальні решітки; 4 – система перфорованих трубок; 5 – вхідний патрубок; 6 – вихідний патрубок

Рисунок 2.5 – Адсорбер вугільний

2.2.9 АДСОРБЕР [12]

На фіг. 1 зображений загальний вигляд пропонованого адсорбера; на фіг. 2 зображений переріз А-А фіг. 1. Адсорбер складається з корпусу 1, який оснащений вхідним 2 та вихідним 3 патрубками, розташованих усередині корпусу 1 нижньої 4 та верхньої 5 сіток, які віддалені відповідно від днища 6 та кришки 7, адсорбента 8, розміщеного між сітками 4 та 5, пружини 9, яка придавлює верхню сітку 5 до адсорбента 8. Нижче рівня вхідного 2 патрубка розташований пучок труб 10, осі яких паралельні, та які сполучені з верхньою сіткою 5. Труби 10 утворені за

допомогою штаб 11, розташованих прямовисно та сполучених між собою пластинами 12. Канали 13 труб 10 являють собою у перерізі квадрат із стороною (ефективним діаметром) $Re / 4 , 2 a = \pi \cdot \mu \cdot k \cdot D \cdot Q \cdot \rho$ яка дорівнює, наприклад, 50 мм. Частина труб 10 пучка устромлена в адсорбент 8 на глибину не менш 0,15 товщини шару адсорбента, яка дорівнює у даному випадку 80 мм. Робота пропонованого адсорбера здійсню-ється таким чином. Повітря, яке очищують, потрапляє крізь вхід-ний патрубок 2 усередину корпусу 1 адсорбера, проходить крізь пучок труб 10 та шар адсорбента 8. де відбувається очищення, і далі виходить крізь вихідний патрубок 3. Завдяки пучку труб 10 відбувається роздроблення інтенсивного вихорового потоку повітря над поверхнею адсорбента 8, та обмежування переміщення гранул у поверхневому шарі розмірами каналів 13, внаслідок чого усувається основна причина росту аеродинамічного опору-утворення вугільного пилу через значне розтирання гранул адсорбента 8 під час їх перемішування. Вибір величини ефективного діаметру каналу 13, яка відповідає умові $Re / 4 , 2 a = \pi \cdot \mu \cdot k \cdot D \cdot Q \cdot \rho$ дозволяє максимально зменшити ступінь турбулентності потоку, інтенсивність перемішування гранул та утворення вугільної пилової Фракції, що у підсумку веде до збільшення строку експлуатації адсорбера.



1 – корпус; 2 - вхідний патрубок; 3 - вихідний патрубок; 4 – сітка нижня; 5 – сітка верхня; 6 – днище; 7 – кришка; 8 – сорбент; 9 – пружини; 10 – пучок труб; 11 – шайба 12 – пластина; 13 – канал

Рисунок 2.6 – Адсорер

Для доказу досягнення технічного результату було проведено порівняння роботи адсорбера, що обраний як прототип, та пропонованого. Як показали експерименти, при однакових значеннях висоти засипки (350 мм) та середньої швидкості потоку повітря (1500 м3 /год), у відомому адсорбері відбувалось значне перемішування гранул адсорбента та утворення пилової вугільної Фракції, у той час як у пропонованому адсорбері, що має пучок труб, устромлений в адсорбент на глибину 60 мм, не було помітно утворення пилової вугільної Фракції за один і той же період роботи. Це свідчить про збільшення строку експлуатації пропонованого адсорбера.

3 Особливості проектування виробів у програмі SolidWorks

Сучасні тенденції розвитку машинобудування та промислового виробництва вимагають використання високоефективних систем автоматизованого проектування. Одним із провідних програмних продуктів у цій сфері є SolidWorks, який забезпечує комплексний підхід до моделювання, аналізу та оптимізації виробів. Його застосування дозволяє скоротити час розробки, підвищити точність та якість конструкторської документації, а також інтегрувати процеси проектування з виробництвом.

Основні можливості SolidWorks:

– Параметричне моделювання – створення 3D-моделей із можливістю швидкої зміни геометричних параметрів.

– Асемблювання виробів – формування складних конструкцій із окремих деталей, перевірка їх сумісності та взаємодії.

– Генерація креслень – автоматичне створення двовимірних креслень на основі тривимірних моделей.

– Інтеграція з CAE-системами – проведення міцнісних, теплових та гідродинамічних розрахунків безпосередньо у середовищі програми.

– Візуалізація та рендеринг – створення реалістичних зображень виробів для презентацій та маркетингових матеріалів.

Особливості проектування виробів:

– Параметричність та асоціативність. Зміна одного параметра автоматично коригує всю модель, що забезпечує гнучкість у процесі проектування.

– Модульність SolidWorks дозволяє створювати окремі модулі виробу (деталі), які потім інтегруються у загальну конструкцію.

– Аналіз технологічності Програма має інструменти для перевірки можливості виготовлення виробу, визначення потенційних проблем при обробці чи складанні.

– Використання бібліотек стандартних елементів Вбудовані бібліотеки кріпильних деталей, профілів та інших стандартних компонентів значно скорочують час проектування.

– Сумісність із CAM-системами SolidWorks інтегрується з програмами для підготовки виробництва, що дозволяє швидко переходити від проектування до виготовлення.

Застосування SolidWorks у проектуванні виробів забезпечує:

– скорочення термінів розробки;

– зменшення кількості помилок у конструкторській документації;

– підвищення ефективності комунікації між інженерами, технологами та виробничими підрозділами;

– можливість створення цифрових двійників виробів для подальшого аналізу та оптимізації.

Отже, SolidWorks є потужним інструментом для проектування виробів, який поєднує простоту використання з широкими функціональними можливостями. Його особливості — параметричність, модульність, інтеграція з CAE та CAM-системами — роблять програму незамінною у сучасному інженерному середовищі. Подальший розвиток технологій цифрового моделювання та автоматизації виробництва ще більше підвищить значення SolidWorks у проектуванні та реалізації інноваційних рішень.

У сучасному машинобудуванні та промисловому виробництві ключовим завданням є забезпечення надійності та ефективності конструкцій ще на етапі проектування. Традиційні методи випробувань потребують значних фінансових і часових ресурсів, що зумовлює актуальність використання програмних комплексів для інженерного аналізу. Одним із найбільш поширених інструментів є SolidWorks Simulation, який інтегрується з CAD-системою SolidWorks та забезпечує проведення багатофакторних розрахунків методом скінченних елементів (FEA).

SolidWorks Simulation базується на методі скінченних елементів, що дозволяє дискретизувати модель виробу на окремі елементи та визначати напружено-деформований стан конструкції під дією зовнішніх навантажень. Програма підтримує:

– статичний аналіз для визначення міцності та жорсткості виробів;

– динамічний аналіз для дослідження поведінки конструкцій у часі;

– тепловий аналіз для моделювання процесів теплопередачі;

– нелінійний аналіз для врахування пластичних деформацій та контактних взаємодій;

– оптимізаційні розрахунки, що дозволяють знаходити раціональні параметри конструкцій.

SolidWorks Simulation широко використовується у таких галузях:

– машинобудування – перевірка міцності деталей та вузлів, оптимізація маси конструкцій;

– автомобільна та авіаційна промисловість – аналіз навантажень на корпуси, шасі, двигуни;

– будівництво – моделювання стійкості конструкційних елементів.

Застосування програми дозволяє зменшити кількість фізичних прототипів, скоротити витрати на розробку та підвищити якість кінцевої продукції.

SolidWorks Simulation є потужним інструментом для інженерного аналізу, що забезпечує комплексний підхід до дослідження виробів у віртуальному середовищі. Його використання дозволяє значно скоротити витрати на розробку, підвищити точність проектування та забезпечити оптимізацію конструкцій. Подальший розвиток технологій цифрового моделювання та інтеграція з системами штучного інтелекту відкривають нові перспективи для застосування SolidWorks Simulation у промисловості.

Параметричне дослідження — це своєрідний «діалог» між інженером та моделлю. Змінюючи товщину стінки, діаметр отвору чи властивості матеріалу, ми отримуємо нові результати, які дозволяють зрозуміти, наскільки чутлива конструкція до тих чи інших факторів. Такий підхід дає змогу не лише перевірити працездатність виробу, а й знайти оптимальне співвідношення між його міцністю, масою та вартістю.

Уявімо, що конструктор працює над деталлю, яка має витримувати значні навантаження. Замість виготовлення десятків прототипів він може задати у SolidWorks Simulation кілька варіантів параметрів і отримати відповіді на запитання:

– яка товщина забезпечить достатню жорсткість;

– який матеріал краще витримає навантаження;

– як зміниться поведінка виробу при різних умовах експлуатації.

Таким чином, параметричне дослідження стає інструментом не лише перевірки, а й творчого пошуку, що дозволяє інженеру приймати обґрунтовані рішення.

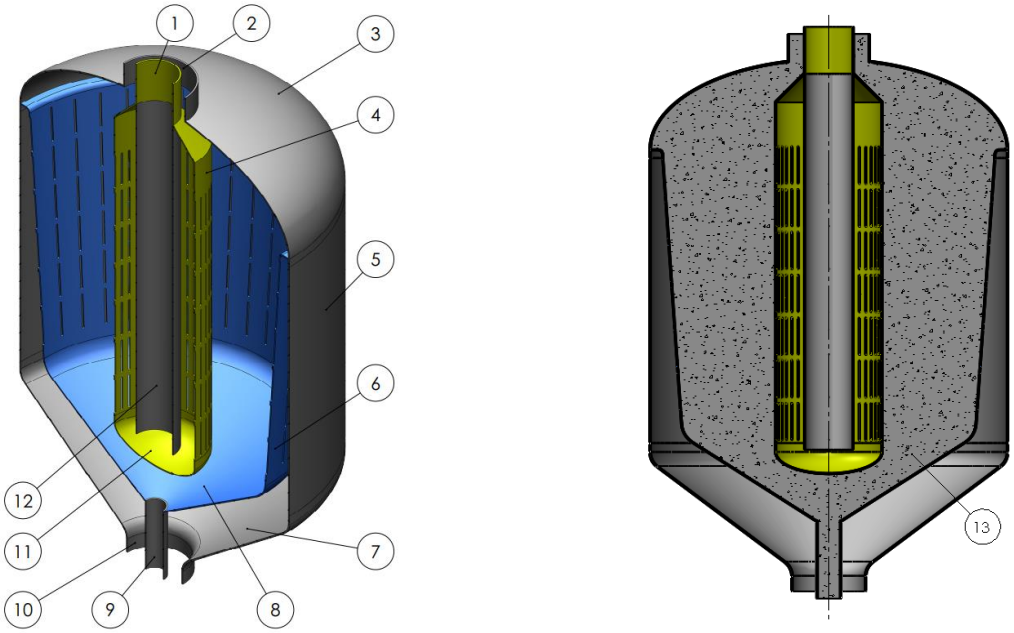
Переваги очевидні: економія часу, зменшення витрат на фізичні експерименти, можливість швидко порівнювати десятки варіантів. Водночас існують і виклики — складність налаштування багатофакторних досліджень, потреба у потужних обчислювальних ресурсах та високій кваліфікації користувача. Але саме ці виклики стимулюють розвиток інженерної думки та вдосконалення програмних засобів.

Параметричне дослідження в SolidWorks Simulation можна назвати мостом між ідеєю та її втіленням. Воно дозволяє інженеру не лише перевіряти конструкцію, а й «гратися» з її параметрами, шукаючи найкраще рішення. У цьому – справжня цінність сучасних цифрових технологій: вони перетворюють процес проектування на творчий експеримент, де кожна зміна відкриває нові горизонти для інновацій.

4 Розроблення конструкції адсорбера та досліження його роботи

4.1 Аналіз роботи адсорбера

Проаналізовано роботу адсорбера, інформацію про якого взято з роботи [13]. Конструкцію цього адсорбера подано на рисунку 4.1.



а) б)

1 – вихідний патрубок для газу; 2 – патрубок для завантажування адсорбенту; 3 – кришка; 4 – внутрішня перфорована труюа; 5 – корпус; 6 – внутрішня конічна перфорована труба; 7 – конусне днище; 8 – конусне днище внутрішньої труби; 9 – патрубок для відвантаження адсорбенту; 10 – вхідний патрубок для газу; 11 – днище еліптичне; 12 – труба; 13 – адсорбент

Рисунок 4.1 – Конструкція адсорбера

Під час дослідження адсорбера застосовано інструмент програми "Пористі середовища", який дозволив імітувати пористість адсорбента: 0,25; 0,5; 0,75. Також було враховано тип проникності адсорбента для моделювання – "Isotropic".

Що стосується граничних умов, то: масова витрата газу на вході адсорбера 0,25 кг/с, на виході з адсорбера задано статичний тиск. Температура газу на вході в адсорбер 70 °С, на виході з адсорбера 20 °С.

Оскільки завданням у дослідженні було визначити швидкість руху газу через шар адсорбенту при заданій конструкції адсорбера, то для побудови графічних залежностей створено три контрольні лінії, розміщення яких показано на рисунку 4.2.

На рисунках 4.3-4.5 зображено отримані результати проведеного імітаційного моделювання.

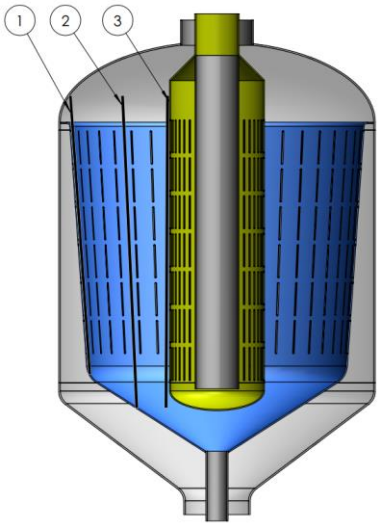


Рисунок 4.2 – Контрольні лінії на шарі адсорьбенту

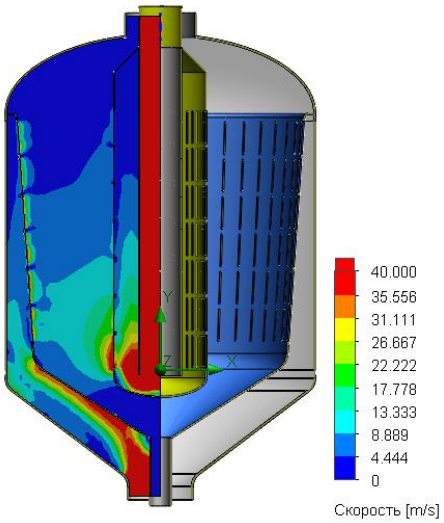


Рисунок 4.3 – Швидкість у поздовжньому перерізі за пористості адсорбенту 0,25

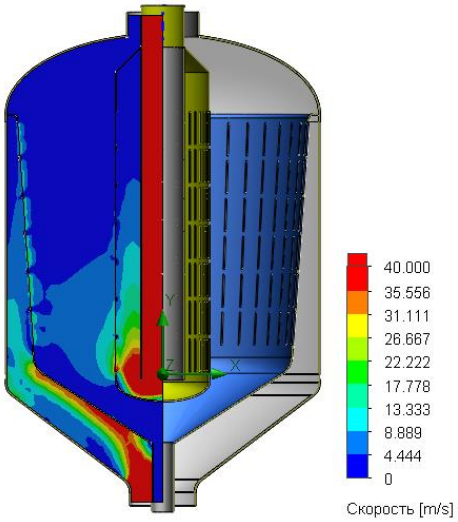


Рисунок 4.4 – Швидкість у поздовжньому перерізі за пористості адсорбенту 0,5

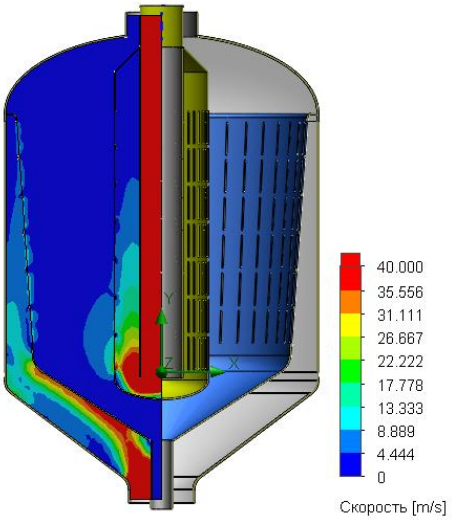


Рисунок 4.5 – Швидкість у поздовжньому перерізі за пористості адсорбенту 0,75

Графічні залежності зміни швидкості газу в різних частинах шару адсорбенту показано на рисунках 4.6-4.8.

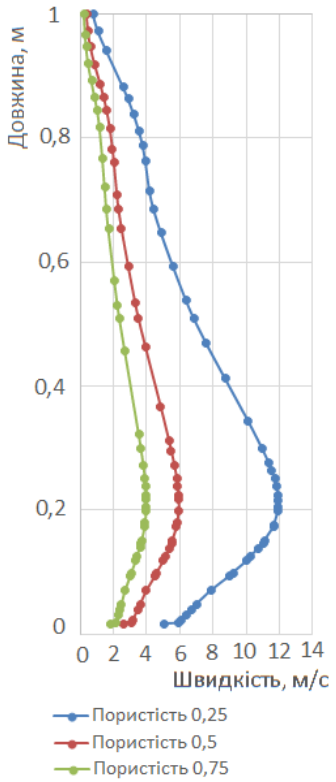


Рисунок 4.6 – Швидкість газу в шарі адсорбенту (лінія 1)

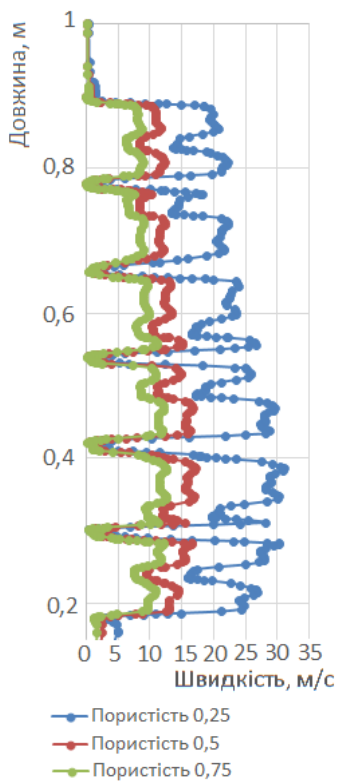


Рисунок 4.7 – Швидкість газу в шарі адсорбенту (лінія 2)

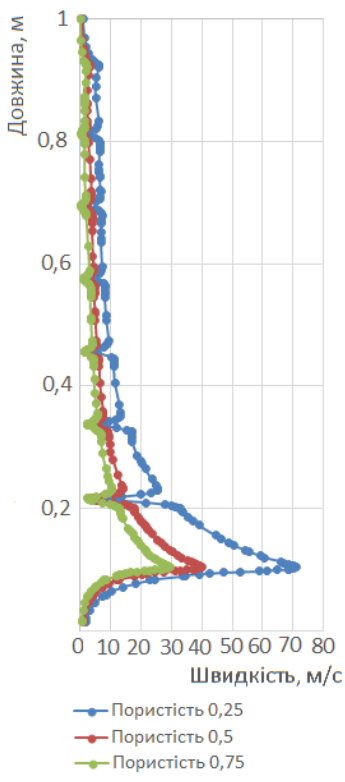


Рисунок 4.8 – Швидкість газу в шарі адсорбенту (лінія 3)

Проаналізувавши результати, які показано на рисунку 4.6-4.8 встановлено, що швидкість газу через шар адсорбенту є нерівномірною. При цьому найнерівномірнішою швидкість є на вході та виході газу з адсорбенту. Прот посередині адсорбенту швидкіть газу порівняно із іншими частинами адсорбенту є найрівномірішою, причому навіть при різній його пористості. При зменшені пористості адсорбенту зростає швидкості газу в ньому, що спричиняє підвищення опору.

4.2 Вдосконалення конструкції адсорбера

Вдосконалення конструкції адсорбера полягає у зміні кута внутрішньої конічної перфорованої труби. У досліджуваній конструкції адсорбера, аналіз роботи якої наведено у підрозділі 4.1 кут був рівний 4º (рис. 4.9).

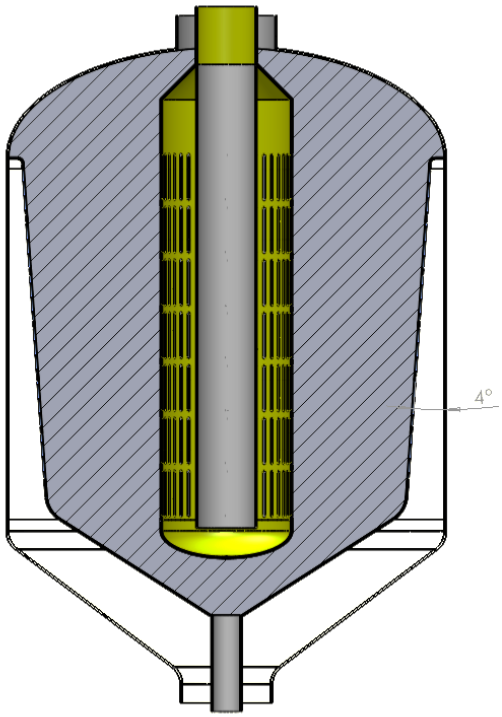


Рисунок 4.9 – Адсорбер з вказаним кутом поверхні внутрішньої конічної перфорованої труби

Пропонується дослідити вплив зміни кута внутрішньої конічної перфорованої труби на розподіл швидкості у шарі сорбенту та порівняти отримані результати встановивши найоптимальнішу величину кута.

4.3 Дослідження конструкції адсорбера

Для дослідження застосовано тривимірну модель адсорбера особивістю якої є те, що окремі її елементи побудовані з використанням відповідних «взаємовз’язків», що дало змогу спротити процес перебудови моделі при зміні її

геометричних параметрів. На риснуку 4.10 наведено ескіз внутрішньої конічної перфорованої труби з наявними на ньому позначеннями «взаємозв'язків».

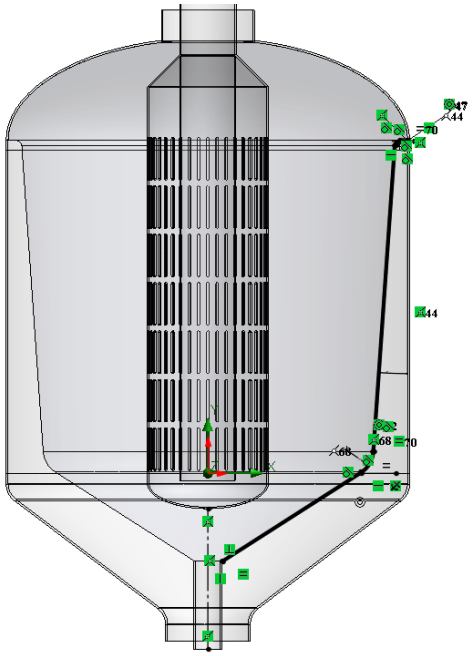
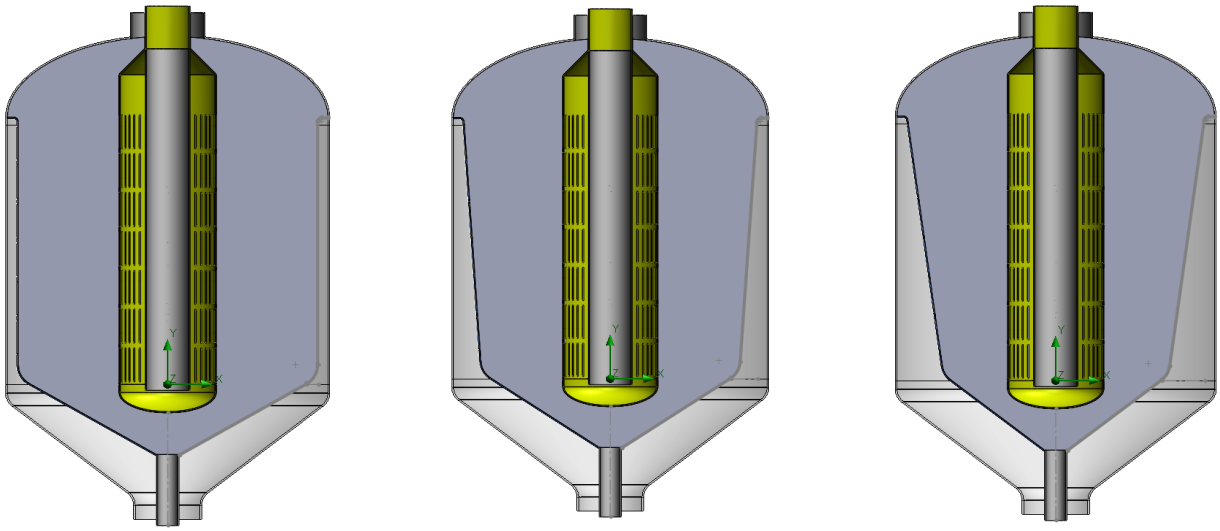


Рисунок 4.10 – Використання «взаємовз'язків» при побудові ескізів

Отже, змінним з кут який показано на рисунку 4.9. Для дослідження приймаємо такі його значення: 0, 4 та 8 градусів. Зображення адсорбера з такими варіантами виконання внутрішньої конічної перфорованої труби показано на рисунку 4.11.



а) б) в)

а) – 0º; б) – 4º; в) – 8º

Рисунок 4.11 – Варіанти виконання внутрішньої конічної перфорованої труби

Побудова сітки скінченних об’ємів також вимагає уваги, оскільки за наявності у конструкції елементів адсорбера щілин, необхідно сітку зробити у них певних розимірів – не надто великих та не надто малих для отримання адекватиних результатів імітаційного моделювання. Побудована сітка скінченних елементів наведена на рисунку 4.12.

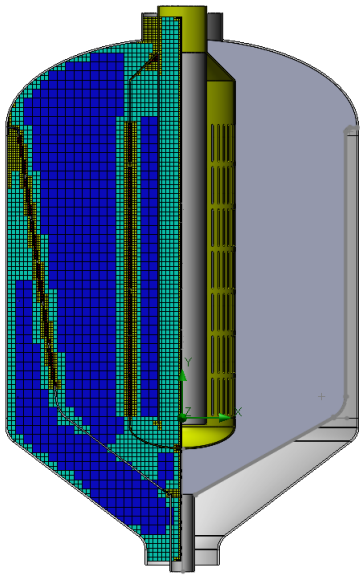
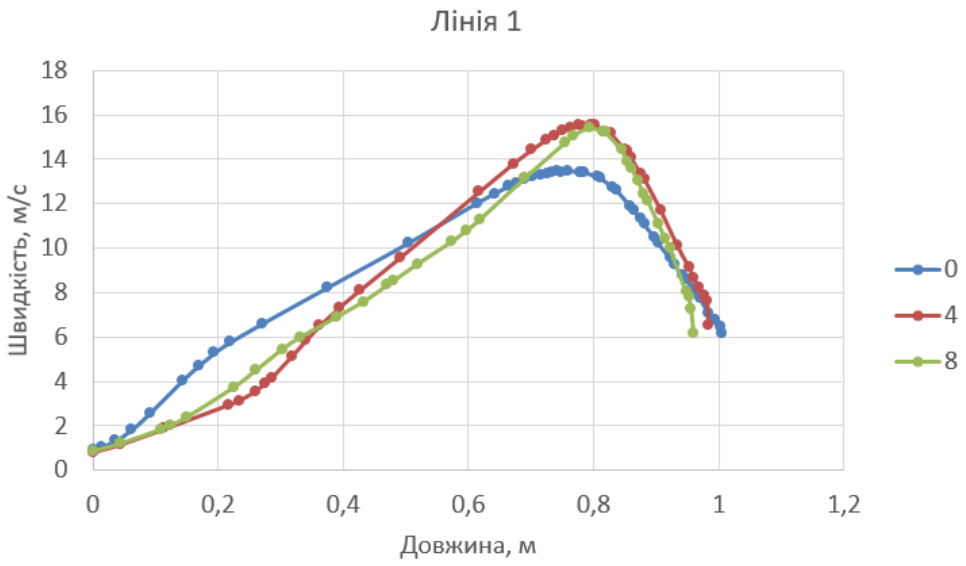
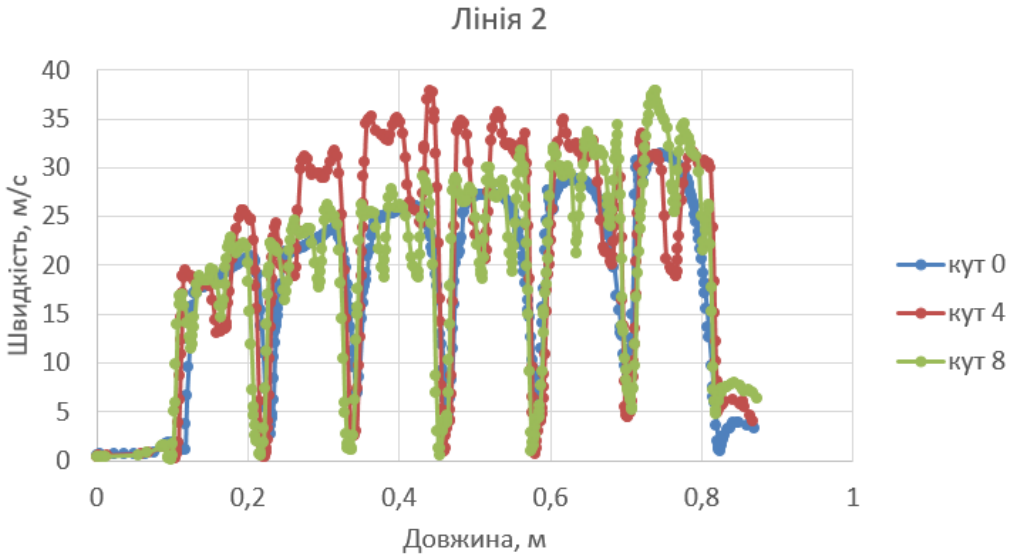


Рисунок 4.12 – Сітка скінсенних елементів

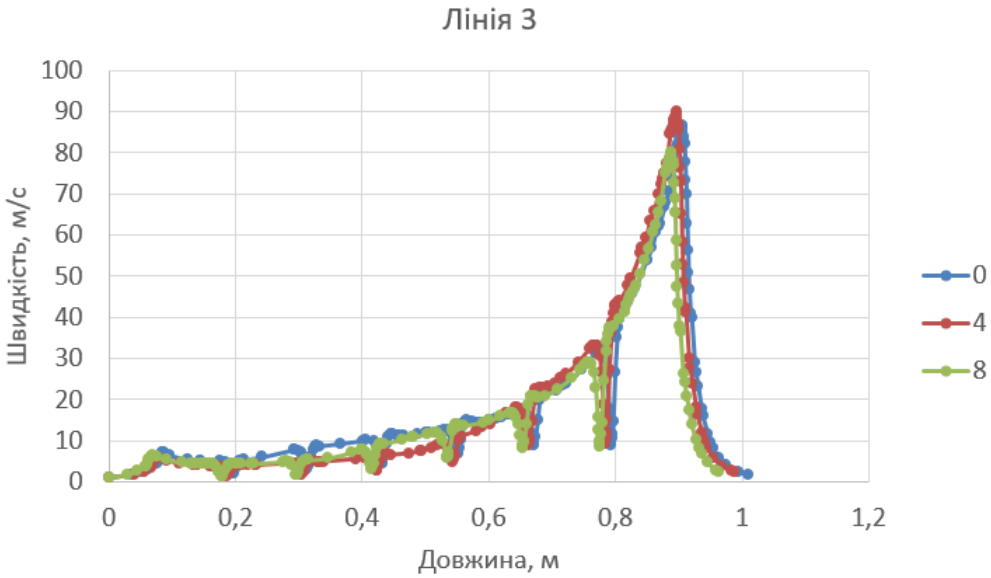
У результаті проведеного розрахунку отримано графічні залежності побудовані по лініях (згідно рисунку 4.2). Проте, на відміну від графічних залежностей поданих на рисунку 4.6-4.8 використано тільки пористість 0,25.



а)



б)



в)

а) – лінія 1; б) – лінія 2; в) – лінія 3

Рисунок 4.13 – Швидкість газу в шарі адсорбенту

Проаналізувавши результати, які подані на рисунку 4.13 можна зробити висновок, що розподіл швидкості газу по лінії один є найкращим при куті внутрішньої конічної перфорованої труби рівним 0º, розподіл по лінії 2 – при куті 0º, та розподіл по лінії 3 – при куті 8º.

Проте, заважаючи на незначну зміну в швидкостях по лінії 3, найкращою є конструкція адсорбера з кутом внутрішньої конічної перфорованої труби рівним 0º.

Нижче наведено розподіли швидкості, тиску та абсолютної вологості у поздовжньому перерізі адсорбера.

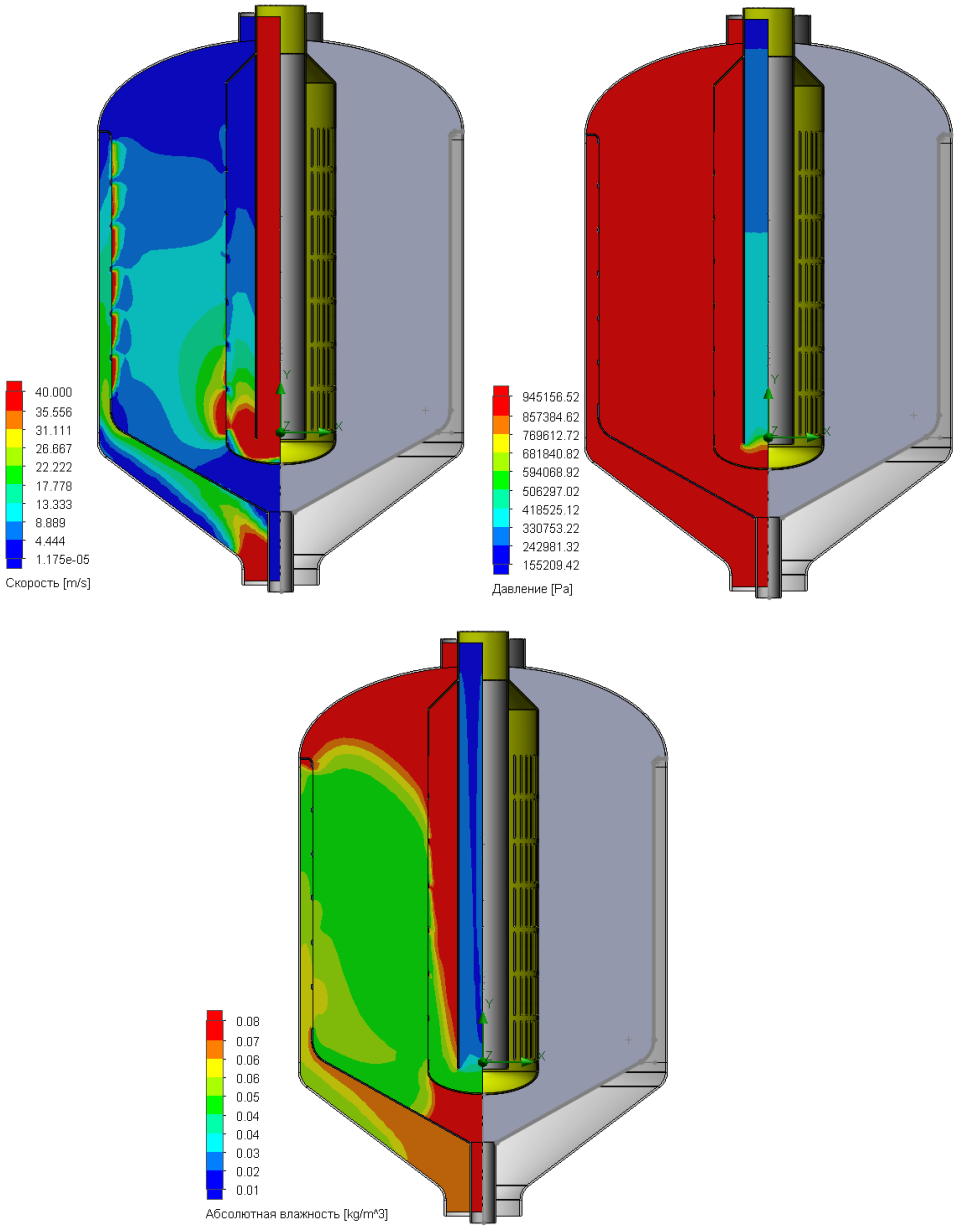


Рисунок 4.14 – Розподіли швидкості, тиску та абсолютної вологості у поздовжньому перерізі адсорбера

5 Інженерні розрахунки

5.1 Розрахунок товщини циліндричної обичайки

Для розрахунку товищни стінки циліндричної обичайки наведено розрахункову схему (рис. 5.1). Для виконання розрахунку застосовується методика [14].

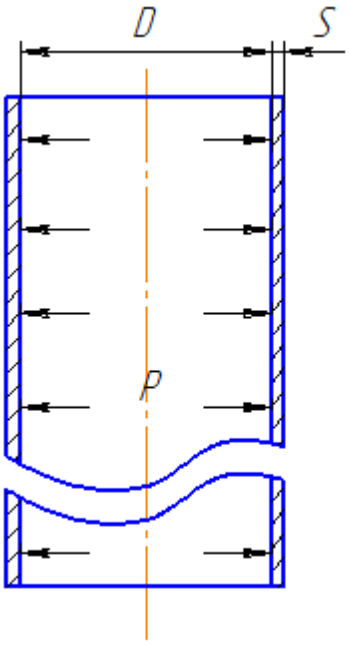


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема

Товщина стінки циліндричної обичайки S_R визначається за формулою:

$$S_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} = \frac{0{,}1 * 2{,}6}{2 * 174 * 1 - 0{,}1} = 0{,}74 \text{ мм}$$

φ_p – коефіцієнт міцності зварного шва, $\varphi_p = 1$;

C_e – добавка для компенсації ерозії, $C_e = 0$ мм.

C_1 – добавка для компенсації корозії і ерозії, $C_1 = 2$ мм

Товщина стінки циліндричної обичайки S_1 при першому наближенні визначається за формулою:

$$S^1 = S_R + C_1 + C_0 = 0{,}74 + 2 + 0{,}26 = 3 \text{ мм}$$

Приймаємо $C_0 = 0{,}19$ мм, оскільки найближча товщина листового прокату складає 3 мм.

Технологічна добавка до розрахункової товщини $C_з$мм, $C_з = 0$ мм

Сума додатків до розрахункової товщини С:

$$\text{С} = \begin{cases} C_1, \text{якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S^1} \leq 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3, \text{якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S^1} > 0{,}05 \end{cases}$$

$$\frac{C_2 + C_3}{S^1} = \frac{0{,}19 + 0}{3} = 0{,}0063 > 0{,}005, \text{тому С} = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 0{,}19 + 0 = 2{,}19 \text{ мм}$$

Товщина стінки обичайки S:

$$S = S_R + C + C_0 = 0{,}74 + 2{,}19 + 0{,}253 = 3 \text{ мм}$$

Перевірка застосування розрахункових формул:

$$\frac{D - C}{D} \leq 0{,}1 \text{ для обичайок і труб при } D \geq 0{,}2 \text{ м}$$

$$\frac{S - C}{D} = \frac{3 - 2{,}19}{2600} = 3{,}3 * 10^{-4} \leq 0{,}1$$

$S \geq 2{,}5 * 10^{-3}$м для обичайок із сталей.

$$3 * 10^{-3} \geq 2{,}5 * 10^{-3}$$

Умови застосування розрахункових формул виконуються.

Визначаємо величину допустимого внутрішнього надлишкового тиску $[p]$:

$$[p] = \frac{2 * [\sigma] * \varphi_р * (S - C)}{D + S + C} = \frac{2 * 174 * 1 * (3 - 2{,}19) * 10^{-3}}{2{,}16 + (3 - 2{,}19) * 10^{-3}} = 0{,}116 \text{ МПа}$$

Перевірка умови міцності:

$$p \leq [p]$$

$$0{,}1\text{МПа} \leq 0{,}116\text{МПа}$$

Умова міцності виконується.

5.2 Розрахунок товщини еліптичного днища

Розрахункову схему еліптичного днища подано на рисунку 6.2.

Розрахунок еліптичного днища виконано відповідно до [14].

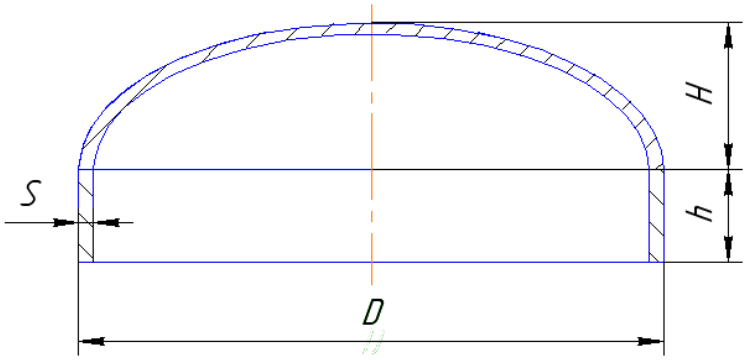


Рисунок 6.2 – Розрахункова схема днища

Оскільки розглядається стандартне днище, то:

$$h_в = 0{,}25\ D, \text{то } R_e = D = 2{,}6 \text{ м.}$$

R_e - Внутрішній радіус кривизни у вершині кришки або днища

Коефіцієнт міцності зварного шва $\varphi_p = 1$.

Розрахункова товщина стінки днища $R_{\text{дн}R}$:

$$R_{\text{дн}R} = \frac{p * R_e}{2 * [\sigma] * \varphi - 0{,}5 * p} = \frac{0{,}1 * 2{,}6}{2 * 174 * 1 - 0{,}5 * 0{,}1} = 0{,}74 \text{ мм}$$

Добавка на ерозію, $\text{C}_\text{e} = 0$ мм

Добавка до розрахункової товщини з метою компенсації корозії, $\text{C}_1 = 2$ мм

Товщина стінки у першому наближенні $S^1_{\text{дн}}$ визначається за формулою:

$$S^1_{\text{дн}} = S_{\text{дн}R} + C + C_1 + C_0 = 0{,}74 + 2 + 0{,}26 = 3\text{мм}$$

Добавка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску, $\text{C}_2 = 0{,}19$ мм

Сума добавок до розрахункової товщини стінки С:

$$\frac{\text{C}_2 + \text{C}_3}{S^1_{\text{дн}}} = \frac{0{,}19 + 0}{2{,}6} = 0{,}062 > 0{,}05, \text{тому } C = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 0{,}19 + 0 = 2{,}19 \text{ мм}$$

Товщина стінки днища, яке йде без відбортовки $S_{\text{дн}}$:

$$S_{\text{дн}} = S_{\text{дн}R} + C + C_e = 0{,}74 + 2{,}19 + 0{,}07 = 3 \text{ мм}$$

Добавка до розрахункової товщини стінки на компенсацію мінусового допуску: $\text{C}_2 = 0{,}19$ мм

Сума добавок до розрахункової товщини С:

$$C = \begin{cases} C_1, \text{якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} \le 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3, \text{якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} > 0{,}05 \end{cases}$$

$$\frac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} = \frac{0{,}19 + 0}{3} = 0{,}0063 > 0{,}005, \text{тому } C = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 0{,}19 + 0 = 2{,}19 \text{ мм}$$

Перевірка умов застосування розрахункових формул.

$$\begin{cases} 0{,}002 \le \dfrac{S_{\text{дн}} - C}{D} \le 0{,}1 \\ 0{,}2 \le \dfrac{h_{\text{в}}}{D} \le 0{,}5 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0{,}002 \le \dfrac{3 - 2{,}19}{2500} \le 0{,}1 \\ 0{,}2 \le \dfrac{0{,}625}{2{,}6} \le 0{,}5 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0{,}002 \le 0{,}0003 \le 0{,}1 \\ 0{,}2 \le 0{,}25 \le 0{,}5 \end{cases}$$

Оскільки умови застосування розрахункових формул не виконуються, то необхідно збільшити розрахункову товщину днища $S'_{\text{дн}R}$ до 5 мм.

Товщина стінки обичайки у першому наближенні $S^1_{\text{дн}}$ визначається за формулою:

$$S^1_{\text{дн}} = S'_{\text{дн}R} + C_1 + C_0 = 5 + 2 + 0 = 7 \text{ мм}$$

Добавка до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску $C2 = 0{,}6$ мм

Сума додатків до розрахункової товщини С:

$$\mathrm{C} = \begin{cases} C_1, \text{якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} \leq 0{,}05; \\ C_1 + C_2 + C_3, \text{якщо } \dfrac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} > 0{,}05 \end{cases}$$

$$\frac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} = \frac{0{,}6 + 0}{8} = 0{,}01 > 0{,}005, \text{тому } \mathrm{C} = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 0{,}6 + 0 = 2{,}6 \text{ мм}$$

Товщина стінки днища, яке йде без відбортовки $S_{\text{дн}}$:

$$S_{\text{дн}} = S'_{\text{дн}R} + C + C_{\text{е}} = 5 + 2{,}8 + 0{,}2 = 8 \text{ мм}.$$

$$\begin{cases} 0{,}002 \leq \dfrac{S_{\text{дн}} - C}{D} \leq 0{,}1 \\ 0{,}2 \leq \dfrac{h_{\text{в}}}{D} \leq 0{,}5 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0{,}002 \leq \dfrac{8 - 2{,}6}{3700} \leq 0{,}1 \\ 0{,}2 \leq \dfrac{0{,}625}{3{,}7} \leq 0{,}5 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0{,}002 \leq 0{,}00208 \leq 0{,}1 \\ 0{,}2 \leq 0{,}25 \leq 0{,}5 \end{cases}$$

Умови застосування розрахункових формул виконуються.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[p]$ визначається за формулою:

$$[p] = \frac{2 * [\sigma] * \varphi_{\text{р}} * (S_{\text{дн}} - C)}{D + 0{,}5(S_{\text{дн}} - C)} = \frac{2 * 174 * 1 * (8 - 2{,}8) * 10^{-3}}{2{,}16 + 0{,}5 * (8 - 2{,}8) * 10^{-3}} = 0{,}695 \text{ МПа}$$

Перевірка умови міцності:

$$p \leq [p]$$

$$0{,}1 \text{ МПа} \leq 0{,}695 \text{ МПа}$$

Умова міцності виконується.

5.3 Розрахунок опорних стійок

Розрахунок проведений згідно джерела [14].

Розрахункова схема опорних стійок подана на рисунку 6.3.

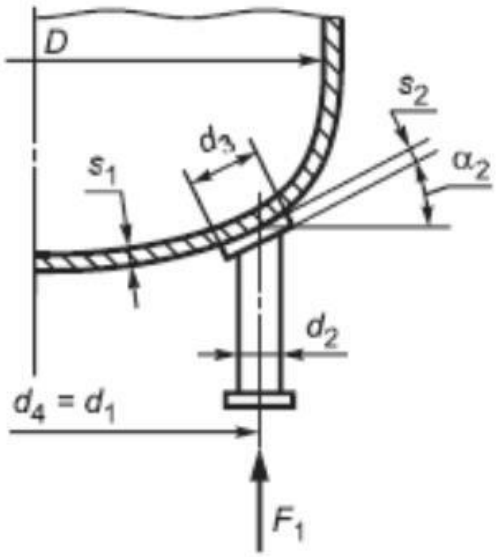


Рисунок 6.3 – Розрахункова схема опорних стійок

Для сталі 12Х18Н10Т при 100 °С допустимі напруження [σ]=184 МПа.

При кількості опорних лап на еліптичних днищах n=4:

$$\begin{cases} 0 < d_4 < 0{,}8 * D \\ \dfrac{G}{4} > \dfrac{M}{d_4} \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 < 1{,}5 < 2{,}08 \\ \dfrac{84270}{4} = 2107 > 0 \end{cases}$$

Умови застосування розрахункових формул виконуються.

Розрахункова сила на опорну стійку F_1, МН визначається за формулою:

$$F_1 = \frac{G}{2} + \frac{M}{d_4} = \frac{84270 * 10^{-6}}{2} + \frac{0}{1{,}5} = 42130 * 10^{-6}$$

Радіус кривизни серединної поверхні днища у опорного колаr_m, м:

для еліптичного днища

$$r_m = \frac{2 * D\sqrt{1 - \frac{3}{4} * \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}}{1 + \frac{1}{1 - \frac{3}{4} * \left(\frac{d_4}{D}\right)^2}} = \frac{2 * 2{,}6\sqrt{1 - \frac{3}{4} * \left(\frac{1{,}5}{2{,}6}\right)^2}}{1 + \frac{1}{1 - \frac{3}{4} * \left(\frac{1{,}5}{2{,}6}\right)^2}} = 1{,}9$$

Кут нахилу меридіанної дотичної у опорного кола α_2, град:

$$\alpha_2 = arcsin\left(\frac{d_4}{2 * 2{,}6\sqrt{1 - \frac{3}{4} * \left(\frac{1{,}5}{2{,}6}\right)^2}}\right) = arcsin\left(\frac{1{,}5}{1 + \frac{1}{1 - \frac{3}{4} * \left(\frac{1{,}5}{2{,}6}\right)^2}}\right) = 19{,}5$$

Ефективний діаметр опорної стійки яка містить підкладний листо, $d_e = d_2 = 0{,}16$

Радіус у вершині днища R, м:

для еліптичного днища

$$R = D = 2{,}6$$

Допустимий внутрішній надлишковий тиск [p], МПа:

$$[p] = \frac{2 * [\sigma] * \varphi_p * (S_1 - C)}{R + 0{,}5 * (S_1 - C)} = \frac{2 * 174 * 1 * (8 - 2{,}8)}{2{,}16 + 0{,}5 * (8 - 2{,}8)} = 0{,}695$$

Допустиме осьове зусилля $[F]_1$, МН

$$[F]_1 = 1{,}57 * [\sigma] * (S_1 - C)^2 * \frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha_2 + \beta)} * \sqrt{1 + 5\frac{d_e^2}{r_m * (0{,}008 - 0{,}0028)}}$$

$$= 1{,}57 * 174 * (0{,}008 - 0{,}0028)^2 * \frac{\cos(0)}{\cos(20{,}5 + 0)}$$

$$* \sqrt{1 + 5\frac{0{,}1^2}{1{,}8 * (0{,}008 - 0{,}0028)}} = 0{,}03$$

Умова несучої здатності опуклого днища

$$\begin{cases} \dfrac{F_1 - p * \dfrac{\pi * d_e^2}{4}}{[F]_1} = \dfrac{p}{[p]} < 1 \\ \dfrac{F_1}{[F]_1} \leq 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{0{,}042 - 0{,}1 * \dfrac{3{,}14 * 0{,}16^2}{4}}{0{,}03} + \dfrac{0{,}1}{0{,}695} = 1{,}5 < 1 \\ \dfrac{0{,}042}{0{,}03} \leq 1 \end{cases}$$

Умова несучої здатності днища не виконується, необхідно застосувати підкладний лист.

Діаметр підкладного листа d_3, м:

$$0 < d_3 < 1{,}6 * d_2$$

$$0 < d_3 < 1{,}6 * 0{,}16 = 0{,}256$$

$$d_3 = d_3 = 0{,}24$$

Ефективний діаметр опорної стійки з підкладним листом d_e, м:

$$d_e = d_3 = 0{,}24$$

Допустиме осьове зусилля при наявності підкладного листа $[F]_1$, МН:

$$[F]_1 = 1{,}57 * [\sigma] * (S_1 - C)^2 * \frac{\cos(\beta)}{\cos(\alpha_2 + \beta)} * \sqrt{1 + 5\frac{d_e^2}{r_m * (0{,}008 - 0{,}0028)}}$$

$$= 1{,}57 * 174 * (0{,}008 - 0{,}0028)^2 * \frac{\cos(0)}{\cos(20{,}5 + 0)}$$

$$* \sqrt{1 + 5\frac{0{,}24^2}{1{,}8 * (0{,}008 - 0{,}0028)}} = 0{,}045$$

Умова несучої здатності опуклого днища

$$\begin{cases} \dfrac{F_1 - p * \dfrac{\pi * d_e^2}{4}}{[F]_1} = \dfrac{p}{[p]} < 1 \\ \dfrac{F_1}{[F]_1} \leq 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{0{,}042 - 0{,}1 * \dfrac{3{,}14 * 0{,}24^2}{4}}{0,,045} + \dfrac{0{,}1}{0{,}754} = 0{,}989 < 1 \\ \dfrac{0{,}042}{0{,}045} \leq 1 \end{cases}$$

Умова несучої здатності днища виконується.

Отже, було визначено, що для викотовлення циліндричної обичайка та еліптичного днища із сталі 12Х18Н10Т вони маються бути 4 мм та 8 мм відповідно. З конструктивних міркувань товщини стінок корпусу та днища рівними 8 мм.

Адсорбер оснащений 4 опорними стійками з підкладним листом. Діаметр стійки складає 0.1 м, підкладний лист – діаметром 0.24 м.

6 Транспортування, заберігання та монтаж адсорбера

У цьому розділі розглянуто організаційно-технічні заходи, що забезпечують правильне транспортування, зберігання та монтаж адсорбера перед введенням його в експлуатацію. Виконання цих вимог є необхідною умовою безпечної роботи обладнання та гарантує досягнення проєктних параметрів адсорбційної установки [15].

6.1. Транспортування адсорбера

Транспортування адсорбера належить до операцій підвищеної відповідальності та має здійснюватися відповідно до чинних норм охорони праці, правил вантажопідіймальних робіт та вимог до перевезення великогабаритного технологічного обладнання.

6.1.1. Підготовка апарата до транспортування

Перед відправленням зовнішню та внутрішню поверхні адсорбера очищують від пилу та технологічних залишків. Усі фланцеві з’єднання герметично закривають захисними металевими або полімерними кришками. При необхідності внутрішню порожнину продувають сухим повітрям чи інертним газом. Транспортування з адсорбентом усередині не допускається, якщо інше не передбачено заводською інструкцією.

6.1.2. Умови кріплення та безпечного перевезення

Адсорбер розміщують на транспортній платформі таким чином, щоб запобігти його зміщенню або перевантаженню окремих точок корпусу. Кріплення здійснюють через спеціальні вантажні вушка або монтажні ребра жорсткості. Використання патрубків, люків та інших технологічних елементів як точок закріплення забороняється.

Для вертикальних апаратів передбачають бокові упори, які фіксують корпус від коливань. Під час навантаження або розвантаження застосовують сертифіковані стропи, траверси та інші підйомні пристрої, що виключають механічні ушкодження поверхні.

6.1.3. Види транспорту

Вибір транспортного засобу залежить від маси та габаритів адсорбера. Невеликі апарати перевозять автотранспортом, для крупних колон використовують залізничні платформи або спеціалізовані низькорамні трали. У міждержавних або морських перевезеннях передбачають додатковий захист від корозії та вібрацій.

6.2. Зберігання адсорбера

Правильна організація зберігання обладнання забезпечує збереження його технічного стану, попереджає корозію та пошкодження внутрішніх поверхонь.

6.2.1. Вимоги до місця та умов зберігання

Апарат зберігають у закритих або піднавісних приміщеннях, що виключають можливість контакту з атмосферними опадами. У разі тимчасового зберігання на відкритому майданчику корпус покривають антикорозійними складами та захищають атмосферостійкою плівкою.

Вертикальні адсорбери встановлюють на штатні опори або спеціальні монтажні підставки. Горизонтальні апарати розміщують на дерев’яних або гумових прокладках, що зменшують точкові навантаження та запобігають деформаціям.

6.2.2. Захист внутрішньої порожнини

Усі технологічні штуцери та оглядові люки повинні бути заглушені. При тривалому зберіганні внутрішню порожнину продувають сухим повітрям або заповнюють інертним газом при невеликому надлишковому тиску. Це запобігає

корозії та утворенню конденсату, особливо у зимовий період.

6.2.3. Періодичний контроль стану

Згідно з регламентом, раз на 1–2 місяці проводять візуальний огляд зовнішнього покриття, перевіряють цілісність заглушок, відсутність механічних пошкоджень та корозійних плям. При необхідності здійснюють локальне оновлення ізоляційного або фарбувального шару.

6.3. Монтаж адсорбера

Монтаж адсорбера виконується відповідно до проєктної документації, технічних умов та вимог промислової безпеки. У процесі монтажу важливо забезпечити точність геометричного розташування апарата, герметичність з’єднань та правильне підключення технологічних трубопроводів.

6.3.1. Підготовчі роботи

Перед початком монтажу перевіряють стан фундаменту чи монтажної рами, проводять контроль їхньої горизонтальності. Оглядають корпус апарата на предмет деформацій та пошкоджень, здійснюють перевірку відсутності внутрішніх сторонніх предметів. Підйомні механізми готують у відповідності до величини маси апарата та розташування його монтажних точок.

6.3.2. Установлення адсорбера

Під час підйому адсорбера використовують траверсу, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження. Установлення вертикальних апаратів виконують у точній відповідності до розмітки фундаментних анкерів. Після фіксації на опорах здійснюють контроль вертикальності за допомогою нівеліра чи лазерного обладнання.

6.3.3. Монтаж комунікацій

Після встановлення адсорбера виконують під’єднання технологічних трубопроводів: ліній подачі газу, відведення очищеного потоку, ліній регенерації, продувки, дренажу та імпульсних ліній. Усі фланцеві з’єднання герметизують відповідними прокладками, після чого проводять випробування на щільність.

6.3.4. Пусконалагоджувальні роботи

До введення апарата в експлуатацію проводять гідравлічні або пневматичні випробування на міцність та герметичність. Перевіряють працездатність арматури та приладів контролю. Завантаження адсорбенту здійснюють відповідно до регламенту — рівномірними порціями через верхній люк або спеціальні завантажувальні пристрої. Після завершення налагоджувальних робіт система переходить у режим дослідного та подальшого штатного пуску.

Висновки

У ході виконання роботи комплексно досліджено процеси очищення газових і парогазових сумішей, а також застосування адсорбційних технологій у нафтогазовій галузі. На основі аналізу літературних та патентних джерел сформовано узагальнену характеристику сучасних типів адсорберів, визначено їхні основні сфери використання – від осушування природного газу до очищення потоків перед кріогенними процесами та виробництва водню. Порівняння адсорбції з альтернативними методами очищення підтвердило її високу ефективність, гнучкість та технологічну доцільність для більшості промислових завдань.

Проведений патентний аналіз дав змогу виявити тенденції у розвитку конструкцій адсорберів, включно з удосконаленнями, спрямованими на підвищення надійності, зменшення енергоспоживання та збільшення ресурсу роботи. Особливу увагу приділено питанням проєктування апаратів у програмному середовищі SolidWorks, що забезпечило точне моделювання та візуалізацію конструкції.

У практичній частині роботи виконано розроблення конструкції адсорбера, проаналізовано його роботу та запропоновано конструктивне удосконалення. Проведені інженерні розрахунки циліндричної обичайки, еліптичного днища та опорних стійок підтвердили міцність і відповідність конструкції вимогам безпеки та нормативним стандартам.

Розглянуто також питання транспортування, зберігання й монтажу адсорбера, що є невід’ємною складовою його безпечної експлуатації та забезпечення довговічності обладнання. Визначено основні вимоги до підготовки апарата, способів перевезення та встановлення на монтажному майданчику.

Перелік посилань на джерела

1. Онищук О. О., Кормош Ж. О. Процеси та апарати хімічних виробництв : курс лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 155 с.

2. GPSA Engineering Data Book. 14th ed. Gas Processors Suppliers Association, 2019.

3. API Standard 12J – Oil and Gas Separators. American Petroleum Institute.

4. API Recommended Practice 14C – Analysis, Design, Installation of Safety Systems.

5. ISO 13703 – Petroleum and natural gas industries — Pipeline transportation systems.

6. AGA Report No. 5 – Natural Gas Quality Specifications.

7. Адсорбер : пат. 63004 Україна, МПК B01D53/04 / Мікульонок І. О. ; заявник і власник Мікульонок І. О. № u201102057 ; заявл. 21.02.2011 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18/2011.

8. Адсорбер : пат. 146021 Україна, МПК F25B37/00, B01D53/04 / Андреєв І. А., Мікульонок І. О. ; заявник і власник Андреєв І. А., Мікульонок І. О. № u202006319 ; заявл. 29.09.2020 ; опубл. 13.01.2021, Бюл. № 2/2021.

9. Адсорбер для очищення етанолу : пат. 153969 Україна, МПК B01D15/00, C07C7/12 / Мельник В. М., Шафаренко М. В. ; заявник і власник Нац. техн. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». № u202300145 ; заявл. 16.01.2023 ; опубл. 27.09.2023, Бюл. № 39/2023.

10. Адсорбер : пат. 157787 Україна, МПК B01D53/04, G21F9/02 / Лях М. М. ; заявник Лях М. М. ; власники Лях М. М., Михайлюк В. В. № u202403039 ; заявл. 10.06.2024 ; опубл. 20.11.2024, Бюл. № 47/2024.

11. Адсорбер вугільний : пат. 52909 Україна, МПК B01D53/02 / Мінін С. О. ; заявник і власник Східноукраїнський нац. ун-т. № 2001107149 ; заявл. 22.10.2001 ; опубл. 15.01.2003, Бюл. № 1/2003.

12. Адсорбер : пат. 582 Україна, МПК B01D53/04 / Федорова Л. І. ; заявник і власник Федорова Л. І. № 99052510 ; заявл. 05.05.1999 ; опубл. 16.10.2000, Бюл. № 5/2000.

13. Михайлюк В. В. Дослідження кільцевого адсорбера. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2023. № 2(55). С. 40–46. DOI: 10.31471/1993-9965-2023-2(55)-40-46.

14. ГОСТ 34233.5–2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. Москва : Стандартинформ, 2019. 37 с.

15. Коваленко І. В. Монтаж, експлуатація та ремонт обладнання хімічних виробництв : навч. посіб. Київ, 2011. 580 с.

16. Северин Л. І., Петрук В. Г., Безвозюк І. І., Васильківський І. В. Природоохоронні технології. Ч. 1 : Захист атмосфери : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2012. 388 с.

17. Врагов А. П. Гідромеханічні процеси та обладнання хімічних і нафтохімічних виробництв : навч. посіб. Суми : Вид-во СумDU, 2001. 216 с.

18. Коваленко І. В., Малиновський В. В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв : підручник. Київ : Інрес, Воля, 2006. 264 с.

19. Коваленко І. В. Процеси та апарати хімічної технології : метод. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2003. 160 с.

20. Врагов А. П. Масообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв : навч. посіб. Суми : Університетська книга, 2007. 284 с.

21. Атаманюк В. М. Розрахунок і конструювання машин та апаратів хімічних та силікатних виробництв. Розрахунок ємнісних апаратів : конспект лекцій. Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2001. 99 с.