

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Дослідження процесу псевдозрідження шару сипкого матеріалу з розробкою компресора повітря»: 85 с., 2 табл., 14 рис., 3 дод., 6 джерел

ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ, КОМПРЕСОР, КИПЛЯЧИЙ ШАР, ЕКСПЕРИМЕНТИ, ТЕХНОЛОГІЧНА УСТАНОВКА, ДИСПЕРСІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – експериментальна установка з псевдозрідженим шаром.

Мета роботи – експериментальне на дослідній установці та розрахункове визначення основних параметрів нової технологічної схеми з розробкою компресора.

Методи дослідження – експериментальні та розрахункові.

У результаті роботи було виконано:

- ✓ ознайомлення зі способами псевдозрідження сипких матеріалів;
- ✓ розробка плану проведення експерименту;
- ✓ проведення експерименту;
- ✓ обробка результатів експерименту;
- ✓ на основі критеріальних рівнянь визначення основних параметрів пілотної установки;
- ✓ розробка частини загальної технологічної схеми, а саме, схеми підключення та параметрів компресора;
- ✓ розрахунок основного апарату схеми компресії – компресора.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Мета і задачі роботи.....	6
2 Аналітичний огляд.....	7
2.1 Загальні відомості процесу псевдо зрідження.....	7
2.2 Переваги та недоліки застосування псевдо зрідження.....	8
2.3 Характеристики псевдозрідженого шару.....	10
2.4 Компресори.....	13
3 Фізико-механічні властивості речовин, що використовуються в роботі.....	32
4 Опис експериментальної установки.....	34
5 План і порядок проведення експериментальних робіт.....	36
6 Визначення необхідної кількості експериментів.....	38
7 Результати проведення експериментальних робіт.....	40
8 Обробка результатів експериментів.....	41
8.1 Попередня обробка даних.....	41
8.2 Перевірка однорідності дисперсій серій експериментів.....	41
8.3 Пошук викидів експериментальних даних.....	43
9 Визначення основних параметрів технологічної установки.....	45
10 Розробка технологічної схеми установки з відділенням компресії зриджуючого агенту.....	49
10.1 Процес глибокого окиснення органічних відходів.....	49
10.2 Опис технологічної схеми пілотної установки.....	51
11 Розрахунок компресора.....	53
11.1 Оцінка потужності компресора.....	55
12 Техніка безпеки під час роботи в лабораторії.....	59
Висновки.....	66
Перелік джерел посилання.....	67
Додаток А.....	68

Додаток Б.....	74
Додаток В.....	80

ВСТУП

Формою існування й розвитку науки є наукове дослідження.

Наукове дослідження – це діяльність, спрямована на всебічне вивчення об'єкта, процесу або явища, їх структури й зв'язків, а також одержання й впровадження в практику корисних для людини результатів.

Об'єктом наукового дослідження є матеріальна або ідеальна системи.

Предметом наукового дослідження є структура системи, взаємодія її елементів, різні властивості, закономірності розвитку і т.д.

Результати наукових досліджень оцінюються тим вище, чим вища науковість зроблених висновків і узагальнень, чим достовірніше вони й ефективніше. Вони повинні створювати основу для нових наукових розробок.

Однією з найважливіших вимог, що висуваються до наукового дослідження, є наукове узагальнення, що дозволить встановити залежність і зв'язок між досліджуваними явищами і процесами і зробити наукові висновки. Чим глибші висновки, тим вищий науковий рівень дослідження.

Результати наукових досліджень є основою для розвитку сучасних технологій, появі нових виробництв та підвищення ефективності існуючих.

У першу чергу результати наукових досліджень застосовуються при проектуванні нових технологій та виробництв.

Проектування хімічних виробництв має свою специфіку і вимагає від проектувальника розуміння загальних закономірностей і спеціальних знань в конкретному хімічному процесі. Необхідно розуміти, що при різноманітті існуючих технологій переробки в хімічній промисловості, в основі їх лежать основні методи і стадії виробництва. Традиційно основними процесами, що використовуються на хімічних підприємствах, є реакційні, теплообмінні, процеси змішування і поділу.

1 МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

Метою роботи є експериментальне на дослідній установці та розрахункове визначення основних параметрів нової технологічної схеми з розробкою компресора.

Досягнення мети відбувається шляхом вирішення таких задач:

- 1 Ознайомлення зі способами псевдозрідження сипких матеріалів.
- 2 Розробка плану проведення експерименту.
- 3 Проведення експерименту.
- 4 Обробка результатів експерименту.
- 5 На основі критеріальних рівнянь визначення основних параметрів пілотної установки.
- 6 Розробка частини загальної технологічної схеми, а саме, схеми підключення та параметрів компресора;
- 7 Розрахунок основного апарату схеми компресії – компресора;
- 8 Формулювання висновків.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

2.1 Загальні відомості процесу псевдозрідження

Псевдозрідження – це процес, при якому по суті тверда статична маса перетворюється в псевдозріджену, станом подібна рідкій масі. На відміну від скраплення в псевдоріджений стан перетворюється не газ, а сипуча (при певних обставинах) маса [1].

Як правило цей процес відбувається, коли рідина (крапельна рідина або газ) рухається вгору через зернистий матеріал. Даний процес псевдозрідження заснований на дії (протидії) сил: аеродинамічного лобового опору і гравітаційних сил.

Так само створення псевдозрідженого шару можливо в результаті дії (протидії) сил: аеродинамічного лобового опору і відцентрових сил.

Коли потік газу вводиться через дно суміші зернистого матеріалу з рідиною або газом, цей потік буде рухатися вгору через порожнечі між зернами матеріалу. При низьких швидкостях газу, сили аеродинамічного лобового опору кожного із зерен, що діють з боку потоку газу, також невеликі, і тому шар залишається в зв'язаному стані. При збільшенні швидкості потоку газу сили аеродинамічного лобового опору, що діють на зерна, зростають і починають протидіяти силам гравітації, що примушує шар до збільшення його обсягу. Останнє обумовлено тим, що тверді зерна прагнуть рухатися один від одного. Подальше збільшення швидкості потоку призводить до того, що об'єм досягає деякого критичного значення, при якому піднімають зерна вгору сили аеродинамічного лобового опору стають рівними гравітаційним силам, що тягне зерна вниз. Це призводить до того, що зерна «висять» в потоці газу або рідини. При критичному об'ємі шар має властивості рідини. При подальшому збільшенні швидкості потоку газу, «єдина густина» («середня густина») шару буде продовжувати зменшуватися, і процес псевдозрідження ставатиме більш інтенсивним доти, поки зерна не

перестануть утворювати єдиний шар і частки не почнуть підніматися вгору та захоплюватися потоком газу.

Псевдозріджений шар поводить себе подібно рідини або газу. Подібно воді у відрі шар буде приймати форму займаної ємності, його поверхня залишається перпендикулярній гравітаційним силам; зерна з густиною, меншою ніж «єдина густина» шару будуть підніматися на поверхню, в той час як об'єкти з густиною вищою ніж «єдина густина» шару опускаються на дно. Ці властивості дозволяють транспортувати масу з твердих зерен по трубах як рідину, не вдаючись до допомоги механічного транспорту (зокрема, стрічкових конвеєрів). Властивості псевдозрідженої маси зерен використовується також в системах вивантаження розчину цементу в автоцементовозах.

2.2 Переваги та недоліки застосування псевдозрідження

Головні переваги апаратів з псевдозрідженим шаром перед застосовуваними в одних і тих же з ними хіміко-технологічних процесах апаратами з нерухомим або рухомим шаром зернистого матеріалу і апаратами типу "обертвий барабан": простота завантаження і переміщення ожіжаючого матеріалу, а також вивантаження готового продукту; можливість розміщення всередині теплообмінних, газорозподільних пристроїв. Для багатьох хіміко-технологічних процесів єдинична потужність агрегатів, що включають апарати з псевдозрідженим шаром, практично необмежена [2].

Області застосування апаратів з псевдозрідженим шаром надзвичайно різноманітні. Узагальнимо їх за допомогою декількох типових схем апаратів (рис. 2.1), кожен з яких може бути використаний для проведення групи процесів (механічних, фізичних, фізико-хімічних або хімічних), що володіють подібними рисами.

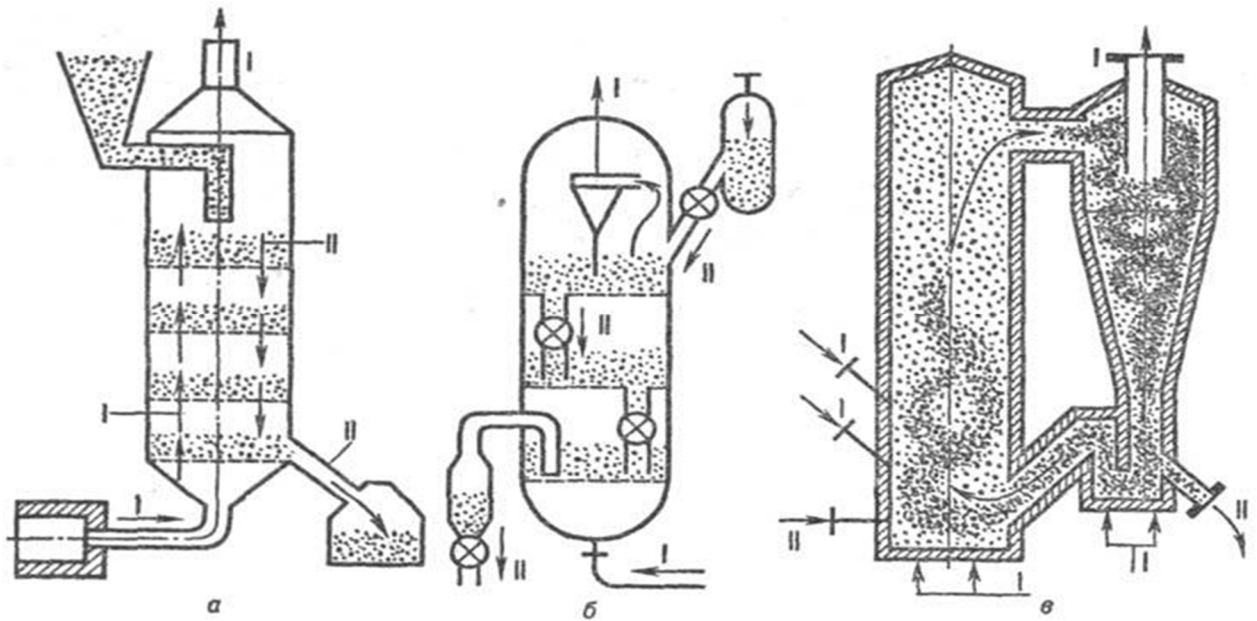


Рисунок 2.1 – Апарати з псевдозрідженим шаром: а, б – секційні протиточні з провальними ґратами і з перетічними пристроями (адсорбція, випал); в – проточний з "швидким" шаром і циркуляцією твердих частинок (випал, спалювання твердих палив)

Псевдозрідження в проточних системах газ-тверде тіло часто застосовують при нагріванні і охолодженні, адсорбції, сушки, водної дегазациї полімерів, коксуванні і ін. Зазвичай тверді частинки рухаються зверху вниз назустріч газовому потоку. Наближення структури потоків до ідеального витіснення досягається за допомогою перегородок провального типу, решіток з перетічними пристроями, оформленням псевдозрідженим шаром у вигляді вертикального каскаду послідовно з'єднаних апаратів.

У подібних протиточних системах створюються оптимальні умови взаємодії фаз. Так, при екзотермічних процесах (наприклад, при окисленні) в верхніх по ходу потоку секціях апарату з псевдозрідженим шаром здійснюється підігрів твердих частинок газами, в нижніх – нагрівання ожіжаючого агента обробленими твердими частинками; в результаті в робочій зоні вдається підтримувати високі температури без додаткового підведення теплоти. При адсорбції в нижніх секціях апарату насичені сорбуємим компонентом частки взаємодіють з газовим потоком, в якому

концентрація цього компонента максимальна, в верхніх секціях збіднений їм газ контактує зі свіжими твердими частинками; таким чином забезпечується наближення до оптимально можливого ступеня вилучення цільового компонента. Внаслідок звуження в секційному апараті спектра розподілу часів перебування твердих частинок і зменшення інтенсивності перемішування досягається їх рівномірна обробка, що важливо в багатьох процесах (наприклад, при відновленні металів з оксидів).

2.3 Характеристики псевдозрідженого шару

Найпростішу псевдозріджену систему створюють в заповненому шаром зернистого матеріалу вертикальному апараті, через днище якого рівномірно по перерізу вводять інертний ожіжаючий агент (газ або рідину). При його невеликій швидкості W зернистий шар нерухомий; з її збільшенням висота шару починає зростати (шар розширюється). Коли W досягає критичного значення, при якому сила гідравлічного опору шару висхідному потоку ожіжаючого агенту стає рівною вазі твердих частинок, шар набуває плинність і переходить в псевдозріджений стан. Відповідну лінійну швидкість ожіжаючого агенту називають швидкістю початку псевдозрідження або його першої критичної швидкістю W_k [3].

Остання зменшується зі збільшенням щільності висхідного потоку. При подальшому зростанні W гідравлічний опір шару залишається постійним, поки він не зруйнується і не почнеться інтенсивний винос зернистого матеріалу потоком з апарату. Швидкість потоку, що відповідає даному стану шару, називають швидкістю винесення (вільного витання часток) або другою критичною швидкістю псевдозрідження, що перевищує W_k в десятки разів. Якщо швидкість ожіжаючого агенту більше швидкості витання найбільших часток сжижаемого матеріалу, шар повністю захоплюється.

У міру збільшення W порізність шару (частка об'єму, зайнятого ожіжаючим агентом) зростає, тому середні концентрації твердих частинок в

одиниці об'єму шару зменшуються. При цьому в разі псевдозрідження газом з'являються рухливі порожнисті неоднорідності – бульбашки (неоднорідний шар).

Аналогія між псевдозрідженим шаром і рідиною – головна властивість шару як середовища для проведення хіміко-технологічних процесів. Виділимо деякі загальні властивості шару і рідини.

- 1) Гідростатичний тиск в шарі висотою h той же, що і для стовпа рідини.
- 2) При механічній дії на поверхні шару, схожою на поверхню киплячої води, можуть виникати поперечні хвилі.
- 3) Поведінка чужорідних тіл в шарі підкоряється закону Архімеда.
- 4) З отвору в боковій стінці апарату з псевдозрідженим шаром через введений в нього трубопровід тверді частинки "впливають", утворюючи струмись.
- 5) Суміжні псевдозріджені шари поводяться як сполучені посудини.
- 6) Швидкості спливання бульбашок в шарі і нев'язкої рідини при малих швидкостях ожіжаючого газу практично однакові.

Теплообмін в псевдозрідженому шарі.

Теплообмін між поверхнею твердих частинок і ожіжаючим газом зазвичай не лімітує швидкість хіміко-технологічних процесів в шарі.

Одна з основних причин широкого застосування техніки псевдозрідження – інтенсивний теплообмін псевдозрідженого шару з поверхнями занурених у нього тіл або зі стінками апарату.

Теплота передається:

- 1) через тонкий газовий прошарок, який безперервно руйнується і оновлюється завдяки руху твердих частинок близько однієї із поверхонь;

2) від твердих частинок при їх контакті з теплообмінної поверхнею (різниця температур окремої частки і поверхні близька до різниці температур поверхні і шару, оскільки час контакту малий);

3) пакетам твердих частинок, які періодично змінюються у поверхні або чергуються з бульбашками;

4) твердій фазі, що рухається суцільним потоком в контакті з поверхнею;

5) у високотемпературних псевдозріджених системах помітну роль відіграє також теплове випромінювання.

Особливості псевдозрідженого шару

Залежно від особливостей хіміко-технологічного процесу одні і ті ж властивості псевдозрідженого шару можна трактувати як переваги так і недоліки.

Так, винесення з шару дрібних частинок ускладнює здійснення каталітичних процесів, а при сушінні використовується для вивантаження готового продукту; при інтенсивному перемішуванні вирівнюється поле температур і усувається можливість значних локальних перегрівів, тобто досягається ізотермічність шару, проте знижується рушійна сила процесу і зростає неоднорідність обробки твердих частинок. Стираність їх в шарі може призводити, наприклад, до збільшення витрати каталізаторів, істотних витрат на пилеочистку відпрацьованих газів; проте, при випалюванні, хлорування або сушінні, супроводжуваних обсмоленням поверхні твердих частинок і стінок апаратів, стираність грає важливу роль.

2.4 Компресори

Компресор (від лат. *Compressio* – стиск) – енергетична машина або пристрій для підвищення тиску (стиску) і переміщення газоподібних речовин [5].

Типи компресорів

Конструктивно незалежно від стискаючих газів і робочих параметрів розрізняють такі типи компресорів:

1. Об'ємної дії – поршневі, мембранні, спіральні, гвинтові, роторно-пластинчасті, РУТС, рідино-кільцеві, трохоїдні, з частковим внутрішнім стиском.
2. Динамічної дії – відцентрові, осьові, вихрові і динамічні.

Поршневі компресори

На рис. 2.2 наведено приклад толкового компресора.

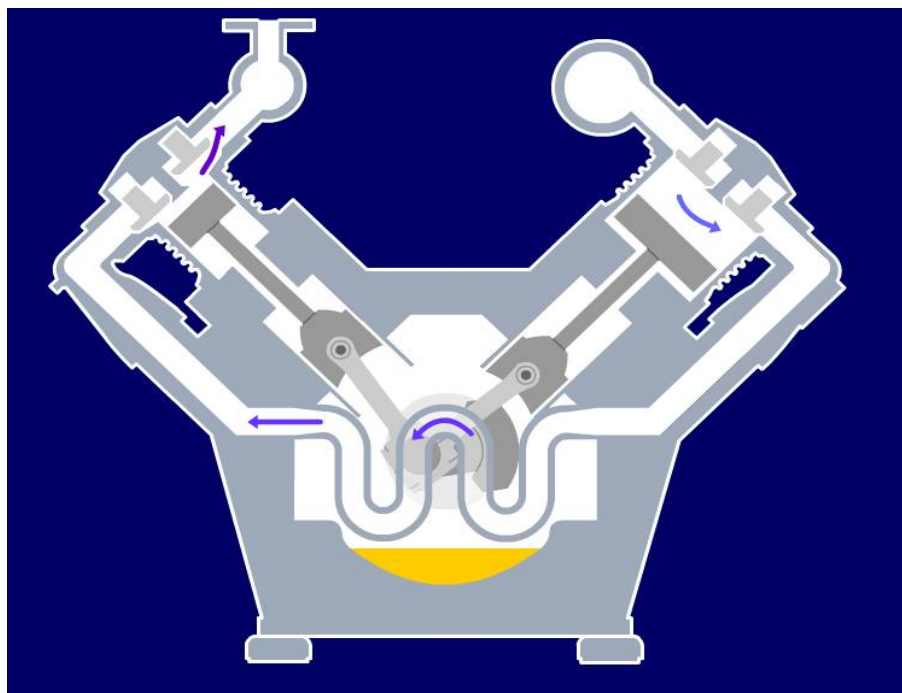


Рисунок 2.2 – Толоковий компресор

Поршневі компресори виробляються і використовуються в якості джерела стиснення газів вже більше ста років. Будь який поршневий компресор складається з коленвала, шатунно-поршневої групи, блоку циліндрів, клапанів. Під час роботи компресора виникають сили інерції, викликані зворотно-поступальним рухом шатунно-поршневої групи і призводять до появи вібрацій. Для їх зменшення на колінчастому валу встановлюються противаги. Для збільшення плавності роботи компресора використовується маховик.

У компресоробудуванні існує ряд основних конструктивних схем для багатоступінчастих машин – оппозитний, Г-подібна, V-подібна, W-образна. Оппозитна схема є найбільш урівноваженою, кутові схеми є найбільш компактними рішеннями.

Також по конструкції розрізняються крейцкопфні і безкрейцкопфні компресори. Крейцкопфні компресори найчастіше використовуються для циліндрів двосторонньої дії і безмасляного стиснення. На компресорах високого тиску з великою кількістю ступенів стиснення часто використовуються поршні подвійної дії, що дозволяє значно спростити конструкцію компресора.

Сучасне застосування поршневих компресорів величезне в промисловості. Видув ПЕТ-тари, видобуток газу, стиснення і дотискування різних промислових газів в діапазоні від 20 до 600 атм, стиснення фреонів. В Україні можна зустріти багато «унікальних» застосувань поршневих компресорів таких як пересувні дизельні компресори для автодорожніх служб (в Європі цей сегмент давно зайнятий гвинтовими компресорами), загальнозаводське повітря середніх і великих підприємств (в Європі до 50 м³/хв – гвинтові компресори, понад – відцентрові). Практично будь який компресорний бренд має у своїй номенклатурі поршневі компресори. Самими інноваційними є – Ariel, CAMERON, AtlasCopco, Reavell.

Мембранні компресори

На рис. 2.3 наведено приклад мембранного компресора.

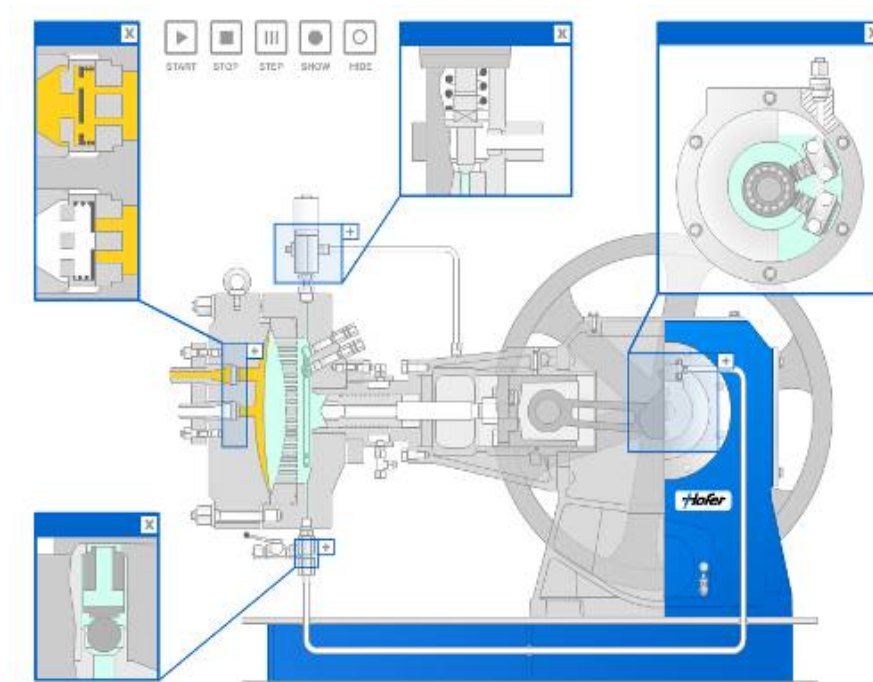


Рисунок 2.3 – Мембранний компресор

Мембранні компресори є досить новою технологією в компресоробудуванні і її розвиток безпосередньо пов'язано з розвитком конструкційних матеріалів. Загалом мембранні компресори схожі на поршневі: в мембранному компресорі також є колінвал з шатуном, блок циліндра з клапанами, але робочим елементом є не поршень, а гнучка мембрана.

У промисловості мембранні компресори одержали поширення там, де потрібна дуже висока чистота стисливого газу і для стиснення агресивних і вибухонебезпечних газів. Діапазон застосування – малі та середні продуктивності в діапазоні високих тисків від 200 до 4000 атм. Мембранні компресори – це компресори сухого стиснення і застосовуються для стиснення будь-яких газів.

Виробники: AndreasHofer, PDCMachines.

Спіральні компресори

На рис. 2.4 наведено приклад спірального компресора.

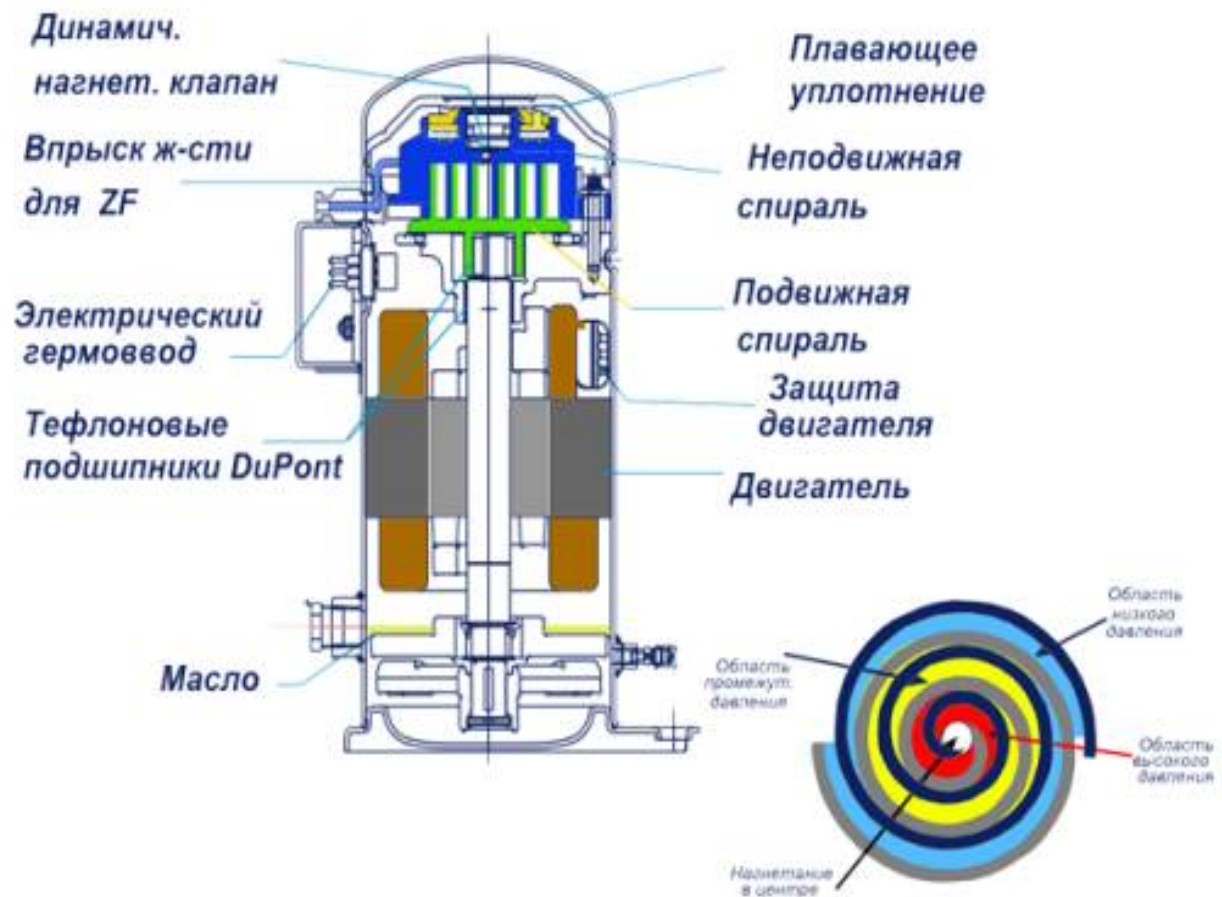


Рисунок 2.4 – Спіральний компресор

Спіральні компресори також є досить новою інженерною розробкою. Спіральний компресор складається з двох спіралей – одна нерухома, друга здійснює круговий рух і має проти зворотній пристрій. Спіральні компресори бувають з вертикальною і горизонтальною віссю руху рухомої спіралі.

Спіральні компресори знайшли широке застосування в холодильній техніці в якості пристрою для стиснення фреонів.

Діапазон застосування – машини малої холодопродуктивності. Можуть бути з сухим стисненням або з додаванням в робочу порожнину рідини.

Найвідомішими компаніями розвиваючими спіральну технологію є компанії Daikin, Danfoss, Copeland.

Гвинтові компресори

На рис. 2.5 наведено приклад гвинтового компресора.

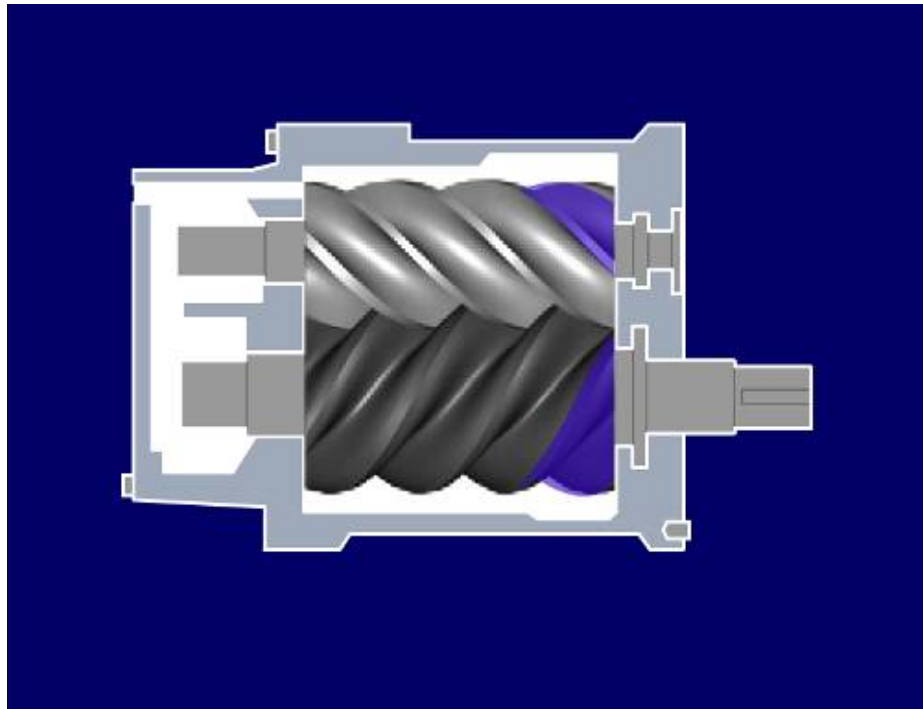


Рисунок 2.5 – Гвинтовий компресор

Гвинтові компресори одержали масове поширення в 60-70-ті р. Традиційно гвинтовий компресор складається з двох гвинтових роторів (також існують одно гвинтові компресори). Розрізняються компресори безмасляні, з мокрим стисненням і маслозаповнені в залежності від кількості масла. Також гвинтові компресори поділяються за профілем гвинтових пар на асиметричні і симетричні.

Гвинтові компресори врівноважені, не мають клапанів і мертвого об'єму і мають примусове газорозподіл за допомогою вікон.

У промисловості гвинтові компресори зайняли місце в якості джерела стисненого повітря загальнопромислового призначення в діапазоні тисків від 4 до 15 атм і продуктивністю від 4 до 500 м³/хв. Через врівноваженість гвинтові компресори виготовляються як пересувні з дизельним приводом. Дуже широке застосування гвинтові компресори одержали в холодильній техніці для стиснення фреонів і аміаку в діапазоні середніх і великих холодопродуктивностей.

Серед компаній з найбільшим досвідом і з самими цікавими рішеннями в області гвинтового компресоробудування можна виділити-AtlasCopco, Kaeser, GardnerDenver, CompAir, Bitzer, Sulair.

Роторно-пластинчасті компресори

На рис. 2.6 наведено приклад роторно-пластинчастого компресора.

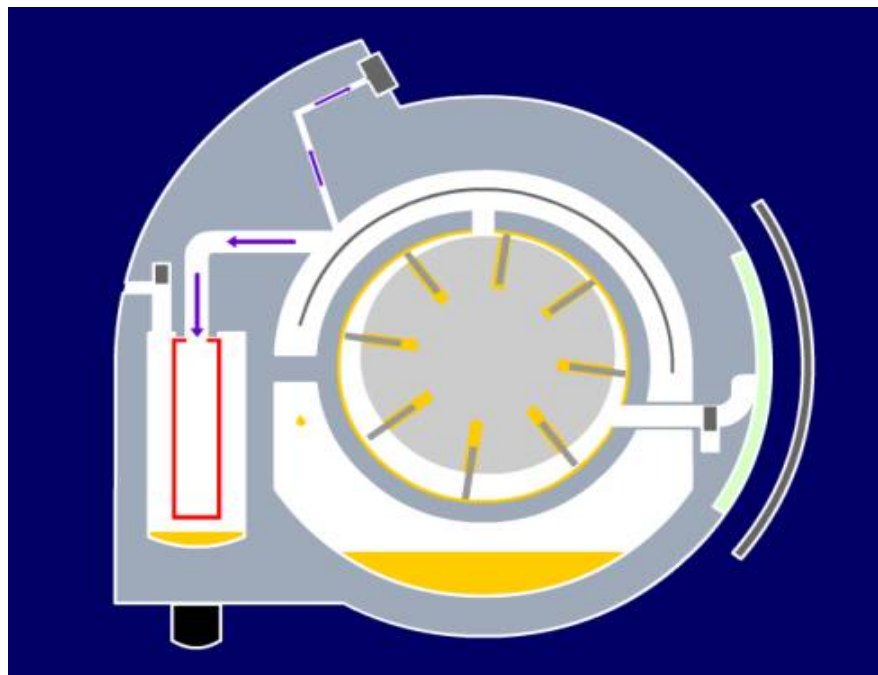


Рисунок 2.6 – Роторно-пластинчастий компресор

Роторно-пластинчасті компресори стали застосовуватися в промисловості в 50-х р. Роторно-пластинчастий компресор складається з ротора,

ексцентрично зміщеного відносно осі статора. У пазах ротора радіально або нахилом розташовуються пластини, які під час обертання за рахунок дії відцентрової сили і газових сил притискаються до стінки статора.

Конструктивно роторно-пластинчасті компресори поділяються на безмасляні, з краплинним змащенням і маслозаповнені. В безмасляних компресорах використовуються графітові пластини, в маслозаповнених – металеві. Також компресори випускають з горизонтальною і вертикальною віссю обертання ротора. Вертикальні компресори мають більш компактну конструкцію. Газорозподіл у цих машин примусовий через вікна. Внаслідок врівноваженості використовується в пересувних установках.

У промисловості роторно-пластинчасті компресори одержали поширення в холодильній техніці в діапазоні малих холодопродуктивностей, а також використовуються для стиснення повітря і газів. Повітряні машини роторно-пластинчастого типу роблять із тиском нагнітання від 1 до 2 атм, також використовують їх в якості вакуум-насосів або як джерело стисненого повітря загальнопромислового призначення в діапазоні продуктивностей від 0,1 до 50 м³/хв до 5 атм в одній ступені.

Серед відомих і досвідчених компаній можна виділити-Danfoss, DemagWittig, Hydrovane, ElmoRietchle, Becker, Busch.

РУТС

На рис. 2.7 наведено приклад РУТС компресора.

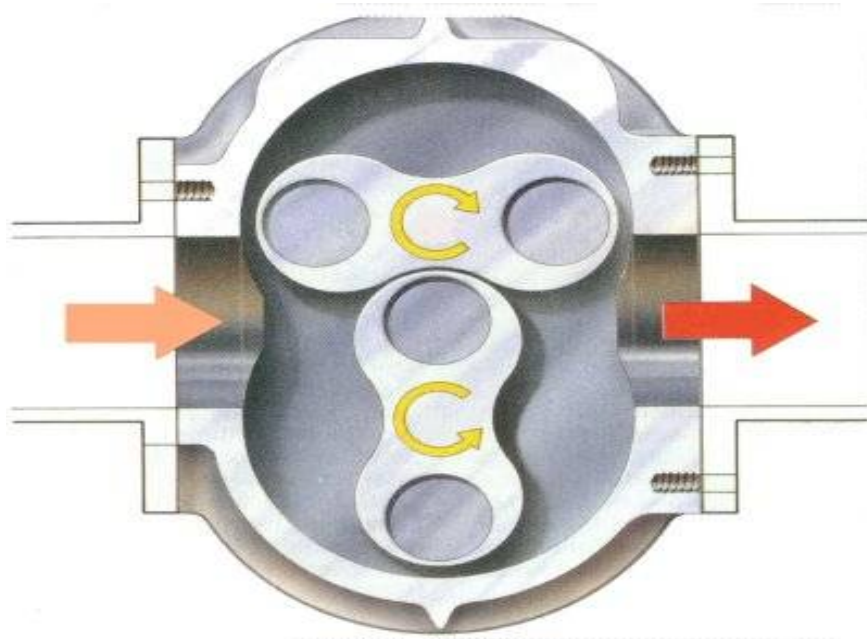


Рисунок 2.7 – РУТС компресор

Компресори типу РУТС складаються з двох роторів, що працюють в безконтактному зачепленні. За кількістю лопатей роторів компресори поділяються на дво- і багатолопатеvu.

Всі компресори даного типу безмасляні і, як правило, використовуються для тисків від 0,1 до 1 атм. Діапазон продуктивностей оптимального застосування даних компресорів від 1 до 40 м³/хв. Це машини із зовнішнім стисненням, врівноважені.

У промисловості дані компресори найчастіше використовуються для пневмотранспорту сипучих, а також в якості вакуумних насосів.

Серед відомих виробників-Aerzener, AtlasCopco, GardnerDenver.

Відцентрові компресори

На рис. 2.8 наведено приклад відцентрового компресора.

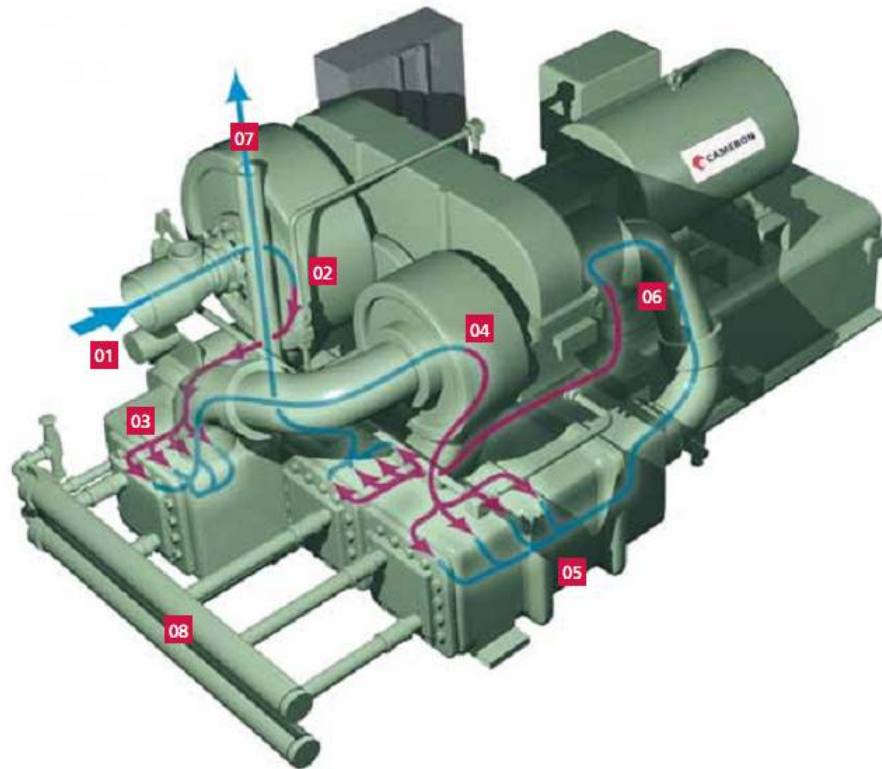


Рисунок 2.8 – Відцентровий компресор

Широке промислове застосування відцентрові компресори одержали в 60-х р. XX століття. Конструкція відцентрових компресорів досить проста. Відцентровий компресор складається з підвідного пристрою, робочого колеса (імPELLера), дифузора і вихідного пристрою. У відцентровому колесі стислива середу розганяється, а в дифузорі кінетична енергія потоку перетвориться в потенційну енергію тиску.

Конструктивно відцентрові компресори поділяються на однобагатоступінчасті, з одностороннім і двостороннім, одновальні і многовальні. За типом робочих коліс відцентрові компресори розрізняються на закриті, напіввідкриті та відкриті. За розташуванням коліс відносно один одного відцентрові компресори поділяються на односпрямовані і протилежно спрямовані. Це машини з сухим стисненням, швидкохідні.

Широке промислове застосування відцентрові компресори одержали в скляній та вугільній промисловості, металургії та машинобудуванні, в

нафтогазовій галузі. Відцентрові компресори є основним джерелом виробництва стисненого повітря загальнопромислового призначення на великих підприємствах, у складі ГПА відцентрові компресори беруть участь в процесі транспортування природного газу. Також дуже часто відцентрові компресори служать джерелом стисненого повітря для великих ВРУ. У холодильній техніці відцентрові компресори використовуються для машин з великими холодопродуктивностями (до 2000 кВт).

Серед найбільш інноваційних компаній в області відцентрового компресоробудування можна виділити CAMERON, AtlasCopco, Danfoss (Turbocor), CompAir (Quantima), MANTurbo.

Осьові компресори

На рис. 2.9 наведено приклад осьового компресора.

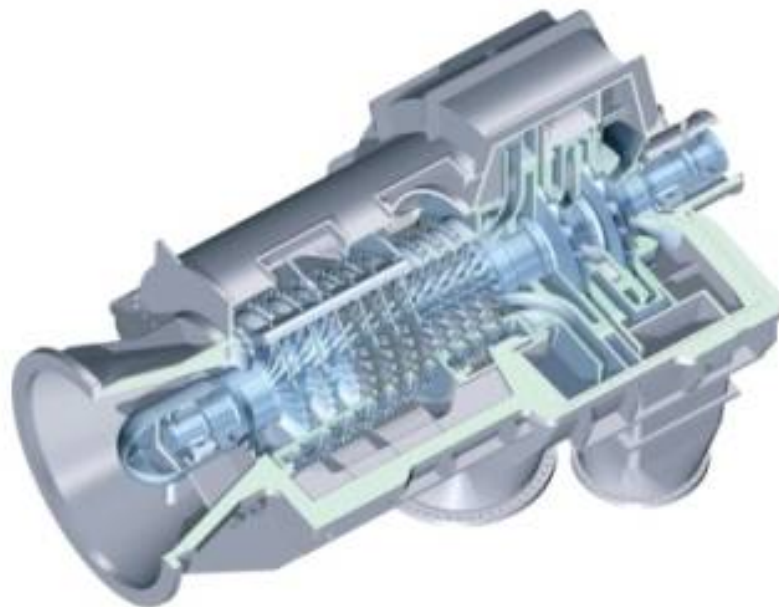


Рисунок 2.9 – Осьовий компресор

Осьові компресори є різновидом компресорів динамічної дії або турбокомпресорів, тільки на відміну від відцентрового компресора в

осьовому стисненню відбувається уздовж осі вала. Конструктивно осьові компресори бувають одно-і багатоступінчатими. Також осьові компресори можуть відрізнятися типом лопаток.

Широке промислове застосування осьові компресори одержали в авіабудуванні, а також в промислових процесах, де потрібні величезні продуктивності (від 2000 м³/хв) і невеликий тиск (1...10 атм). Також осьові компресори можуть використовуватися в складі комбінованого компресора в якості початкових ступенів.

Серед виробників осьових компресорів з суто компресорних компаній можна виділити Siemens, Elliott.

Вихрові компресори

На рис. 2.10 наведено приклад вихрового компресора.

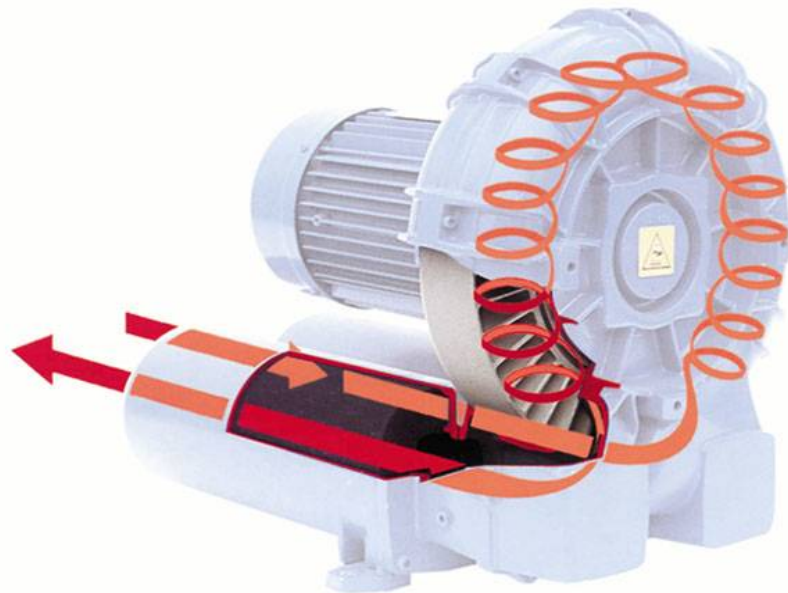


Рисунок 2.10 – Вихровий компресор

Вихрові компресори – це порівняно нові машини. Початок їх дослідження та застосування відноситься до 50-х р. ХХ століття. Вихровий компресор складається з робочого колеса, на якому рівномірно по колу розміщені лопатки, всмоктувального, нагнітаючого робочого каналу. Всмоктувальний і нагнітаючий канали розділені спеціальною перегородкою, яка також називається роздільником або відсікачем.

Вихрові компресори за принципом перетворення енергії відносяться до машин динамічного принципу дії.

Володіючи всіма перевагами цих машин, вихрові компресори відрізняються простотою конструкції, технологічністю і дешевизною виготовлення, їх робота стійка у всьому діапазоні зміни режимних параметрів, відсутнє явище «помпажу», властиве відцентровим компресорним машинам. Максимум ефективності вихрових компресорів досягається при відносно малих частотах обертання і окружних швидкостях, що дозволяє виконувати вихрові компресори без мультиплікаторів.

У першому наближенні робочий процес в ступені вихрового компресора можна вважати аналогічним процесу у відцентровому компресорі з багаторазової циркуляцією стислого середовища через робоче колесо і нерухомі елементи ступені. Частинки робочого середовища рухаються від всмоктувального патрубку до нагнітаючого, по складній спіралеподібній траєкторії і лопатки робочого колеса на відміну від інших машин динамічного стиснення не один, а кілька разів впливають на частинки газу. Ця обставина забезпечує значно більший натиск вихрових компресорів, ніж відцентрових.

З огляду на те, що даний тип компресорів з'явився відносно недавно і технічно представлений в дуже вузькому діапазоні продуктивностей / тиску (до 100 м³/хв і до 0,8 атм) Промислове застосування даного типу компресорів невелике. Серед галузей, де найбільш часто використовуються вихрові компресори – гірничорудна промисловість, поліграфія, харчова і

хімічна промисловість. Останнім часом вихрові компресори знаходять застосування для аерації стічних вод.

Серед компаній, які займаються розвитком даної технології можна виділити-ElmoRietchle, Becker.

Інші класифікації

За призначенням компресори класифікуються по галузі виробництва, для яких вони призначені:

- хімічні,
- холодильні,
- енергетичні,
- загального призначення і т.д.

За родом стисливого газу:

- повітряний,
- кисневий,
- хлорний,
- азотний,
- гелієвий,
- фреоновий,
- вуглекислотний і т.д.

За способом відводу теплоти:

- з рідинним охолодженням,
- повітряним охолодженням.

За типом приводного двигуна:

- с приводом від електродвигуна,

- с приводом від двигуна внутрішнього згорання,
- с приводом від парової або газової турбіни.

Дизельні газові компресори широко використовуються у віддалених районах із проблемами подачі електроенергії. Вони гучні й вимагають вентиляції для вихлопних газів. З електричним приводом компресори широко використовуються у виробництві, майстернях і гаражах з постійним доступом до електрики. Такі вироби вимагають наявності електричного струму напругою 110...120 В (або 230...240 В).

Залежно від розміру й призначення компресори можуть бути:

- стаціонарними,
- портативними.

За конструкцією компресори можуть бути:

- одноступінчастими,
- багатоступінчастими.

За кінцевим тиском розрізняють:

- вакуум-компресори, газодувки – машини, які відсмоктують газ із простору з тиском нижче або вище атмосферного. Повітродувки й газодувки подібно вентиляторам створюють потік газу, однак, забезпечують можливість досягнення надлишкового тиску від 10 до 100 кПа (0,1...1 атм), у деяких спеціальних виконаннях – до 200 кПа (2 атм). У режимі усмоктування повітродувки можуть створювати розрідження, як правило, 10...50 кПа, в окремих випадках до 90 кПа й працювати як вакуумний насос низького вакууму;
- компресори низького тиску – призначені для нагнітання газу при тиску від 0,15 до 1,2 МПа;

- компресори середнього тиску – від 1,2 до 10 МПа;
- компресори високого тиску – від 10 до 100 МПа;
- компресори надвисокого тиску – призначені для стиску газу вище 100 Мпа.

Продуктивність

Продуктивність компресорів звичайно виражають в одиниці об'єму стислого газу в одиницю часу ($\text{м}^3/\text{хв}$, $\text{м}^3/\text{год}$). Продуктивність звичайно розраховують за показниками, що приведені до нормальних умов. При цьому розрізняють продуктивність по входу й по виходу. Ці величини практично рівні при маленькій різниці тисків між входом і виходом, але при великій різниці, наприклад, у поршневих компресорів, вихідна продуктивність може при тих же обертах падати більш ніж у два рази в порівнянні із вхідною продуктивністю, обмірюваної при нульовому перепаді тиску між входом і виходом.

Компресори називаються такими, що дожимають, якщо тиск усмоктуваного газу суттєво перевищує атмосферний.

Агрегативання компресорів

Агрегативання являє собою процес установки компресора й двигуна на раму. У зв'язку з тим, що компресори поршневого типу характеризуються нерівномірної тряскою, результатом якої при відсутності відповідного фундаменту або опори стає надмірна вібрація, агрегативання повинне виконуватися з урахуванням якісно спроектованого фундаменту.

Вібрацію компресорів підсилюють наступні фактори:

- великий розмір компресора (потужніші компресора характеризуються потужнішою вібрацією);
- швидкість роботи (збільшення швидкості роботи компресора спричиняє посилення вібрації);
- дуже маленький розмір маховика (більші навантаження й робота на низьких швидкостях вимагають наявності маховика більшого розміру);
- висота компресора (компресори з потрібним ущільненням вище й сильніше піддані вібрації).

Поршневі компресори

Поршневий компресор – тип компресора зворотно-поступальної дії.

Ефект компресії створюється за рахунок зменшення об'єму газу при русі поршня в циліндрі. Усмоктувальні і нагнітальні клапани підтиснути пружиною і працюють автоматично під дією перепаду тиску, що виникає між циліндром компресора і тиском в трубопроводі при русі поршня.

Поршневі компресори виробляються з повітряним або рідинним охолодженням. Число оборотів колінчастого вала у таких компресорів зазвичай в межах від 125 до 1000 оборотів за хвилину. Швидкість руху поршня – в межах від 2,54 до 5 м/с. Номінальна швидкість газу – в межах від 22 до 40 м/с, а робочий тиск на виході може змінюватися від вакууму до 4100 атмосфер. Компресори даного типу широко застосовуються в машинобудуванні, текстильному виробництві, в хімічній, нафтогазовій, холодильній промисловості і криогенній техніці. Розрізняються за конструктивним виконанням, схемами і компонованням.

Поршневі компресори розрізняють за влаштуванням кривошипно-шатунного механізму або лінійного приводу, влаштуванню і розташуванню циліндрів, числу ступенів стиснення.

Поршневі компресори можуть бути:

- крейцкопфні – з двостороннім всмоктуванням;
- бескрейцкопфні – одностороннього всмоктування (потужністю до 100 кВт).

По розташуванню циліндрів компресори поділяються на вертикальні, горизонтальні та кутові.

До вертикальних відносяться машини з циліндрами, розташованими вертикально. При горизонтальному розташуванні циліндри можуть бути розміщені по одну сторону колінчастого вала, такі компресори називаються горизонтальними з одностороннім розташуванням циліндрів; або по обидва боки валу – з горизонтальним або двостороннім розташуванням циліндрів.

До кутових компресорів відносяться машини з циліндрами, розташованими в одних рядах вертикально, в інших – горизонтально. Такі компресори називаються прямокутними. До кутових компресорів відносяться машини з нахиленими циліндрами, встановленими V-образно і W-образно (компресори називаються відповідно V- і W-образними).

Прогресивним у розвитку поршневих компресорів з'явився перехід на опозитне виконання компресорів великої і середньої продуктивності. Опозитні компресори, що представляють собою горизонтальні машини з зустрічним рухом поршнів і розташуванням циліндрів по обидві сторони валу, відрізняються високою динамічною врівноваженістю, меншими габаритами і масою. Завдяки своїм перевагам опозитні компресори практично повністю витіснили традиційний тип великого горизонтального компресора.

Для машин малої та середньої продуктивності основним є прямокутний тип компресора і компресора з V-подібним розташуванням циліндрів.

За кількістю ступенів стиснення компресори розрізняються одно-, дво- і багатоступінчасті.

Багатоступінчасте стиснення викликається необхідністю обмежити температуру стиснення газу. У повітряних компресорах виникає небезпека займання та вибуху масляного нагару, що накопичується в трубопроводах, на

кришках компресорів і поверхнях клапанів, тому температура повітря, що нагнітається не повинна перевищувати 453 °К.

Принцип роботи поршневого компресора

Компресор поршневий забезпечений пристроєм, аналогічним двигуну внутрішнього згорання. Поршень приводиться в дію кривошипно-шатунним механізмом, що використовує прямий привід. Поршень, здійснюючи зворотно-поступальні рухи, стискає і виштовхує в область приєднаної магістралі повітря атмосфери.

При опусканні поршня, в порожнині циліндра утворюється вільний простір, розряджається повітря. В результаті перепаду потенціалів тиску, відкривається впускний клапан, впускає повітря в камеру, де він стискається. Після цього, коли поршень перетинає точку повороту, відповідну максимальному об'єму камери стиску, впускний клапан зачиняється, і тиск повітря починає рости.

Зі скороченням об'єму камери тиск повітря стає все вище. Коли він досягає заданих величин, відкривається нагнітальний клапан – стиснене повітря в цей момент залишає камеру. Для досягнення найбільшого ККД під час стиснення між нерухомим циліндром і ковзаючим в його площині поршнем необхідне ефективне ущільнення. Незважаючи на наявність у продажу безмасляних поршневих компресорів, найчастіше зустрічаються змащувальні апарати.

Подача масла в циліндричну груп знижує знос циліндрових стінок і поршня, але це супроводжується погіршенням якості повітря, що подається, з огляду на підмішування дрібних частинок масла.

Таким чином, якщо технологія виробництва вимагає використання чистого повітря, необхідно встановити масловідділитель на лінії подачі, для усунення з повітряного потоку масла.

Види поршневих компресорів

Коаксіальні – колінвал з'єднується з електроприводом за допомогою муфти. Таке з'єднання виключає втрати потужності на тертя. Конструкція компактна. Різниця агрегатів цього типу полягає в методах мастила.

Безмасляні не вимагають змазування циліндропоршневої групи. Стиснене повітря, що вироблене подібними пристроями, не має масляних домішок. Такі апарати застосовуються в харчовій промисловості, фармацевтиці, медицині.

У масляних компресорах використовують як мастило мінеральне компресорне масло, завдяки чому компресор має значний ресурс. Робочий режим коаксіальних агрегатів – періодичний (20 хвилин роботи, 40 – перерви). Робочий тиск – вісім бар. Потужність не більше 2,25 кіловат. Продуктивність – близько 200 л/хв. Основні переваги – компактні, легкі, відносно дешеві.

Ремінні – колінвал з'єднується з електроприводом ремінною передачею. Характерна висока продуктивність і тривалість експлуатації. Можуть працювати безперервно кілька годин поспіль. Застосовуються найчастіше в будівництві, в шиномонтажних майстернях, на СТО. Потужність – від 2,25 до 5,5 кіловат. Продуктивність досягає 500 літрів за хвилину, робочий тиск – до 16 бар. Основна перевага – стиснення повітря до значних величин. Робочий тиск може досягати 30 бар.

Недоліки поршневих компресорів

Механізм поршневого компресора при роботі створює сильний шум і вібрацію (виняток – апарати з опозитним становищем циліндрів), тому для розміщення потрібно виділення спеціального приміщення з міцним бетонним фундаментом.

Ще один недолік компресора поршневого – досить низька продуктивність – до 5 кубометрів повітря за хвилину, що також обмежує області застосування. Але компенсуються ці недоліки тим, що компресор поршневий порівняно легко переносить роботу в періодичному режимі, при частому включенні і виключенні агрегату. Багато підприємств не вимагають наявності стисненого газу в безперервному режимі, саме для таких випадків використовується компресор поршневий.

3 ФІЗИКО – МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИН, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РОБОТІ

Зернистий матеріал – синій поліетилен у вигляді луски еліптичної форми.

Густина поліетилену – 914 [кг/м³].

Насипна густина розраховується як

$$\rho_n = \frac{m - m_{\text{ст}}}{V_{\text{ст}}} = \frac{0.114 - 0.016}{200 \cdot 10^{-6}} = 490 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right],$$

де m – маса мірного стакана з насипним матеріалом, [кг];

$m_{\text{ст}}$ – маса мірного стакана, [кг];

$V_{\text{ст}}$ – об'єм мірного стакана, [м³].

За розмірами гранули зернистого матеріалу можна поділити на три фракції:

велика (5 шт.), розміри 6.2 x 4.4 x 2.0 [мм];

середня (65 шт.), розміри 5.6 x 4.2 x 1.5 [мм];

дрібна (27 шт.), розміри 4.9 x 3.4 x 1.4 [мм].

Для спрощення подальших розрахунків з незначною похибкою приймемо, що лусочки мають форму циліндра. Відповідно до фракцій:

велика (5%), розміри $d = 5.3$ [мм], $h = 2.0$ [мм];

середня (67%), розміри $d = 4.9$ [мм], $h = 1.5$ [мм];
 дрібна (28%), розміри $d = 4.2$ [мм], $h = 1.4$ [мм].

Зважаючи на те, що лусочки мають форму циліндра, визначимо площу поверхні та об'єм лусочок відповідно до фракцій.

Площа поверхні циліндра складається з двох площ кіл та площі бокової поверхні (прямокутник): $S = 2 \cdot (\pi \cdot d^2 / 4) + \pi \cdot d \cdot h$.

Об'єм циліндра визначається як добуток площі поперечного перерізу (кола) на висоту циліндра: $V = \pi \cdot d^2 / 4 \cdot h$.

велика (5%), розміри $S_B = 77.4$ [мм²], $V_B = 44.1$ [мм³];
 середня (67%), розміри $S_C = 60.8$ [мм²], $V_C = 28.3$ [мм³];
 дрібна (28%), розміри $S_D = 46.2$ [мм²], $V_D = 19.4$ [мм³].

Використовується повітря з температурою 20 [°C] і густиною 1.205 [кг/м³], динамічній в'язкістю 18,1 [Па · с] та кінематичній в'язкістю 15,06 [м²/с].

4 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Схема дослідної установки

На рис. 4.1 наведено схема моделі трубчатого реактора.

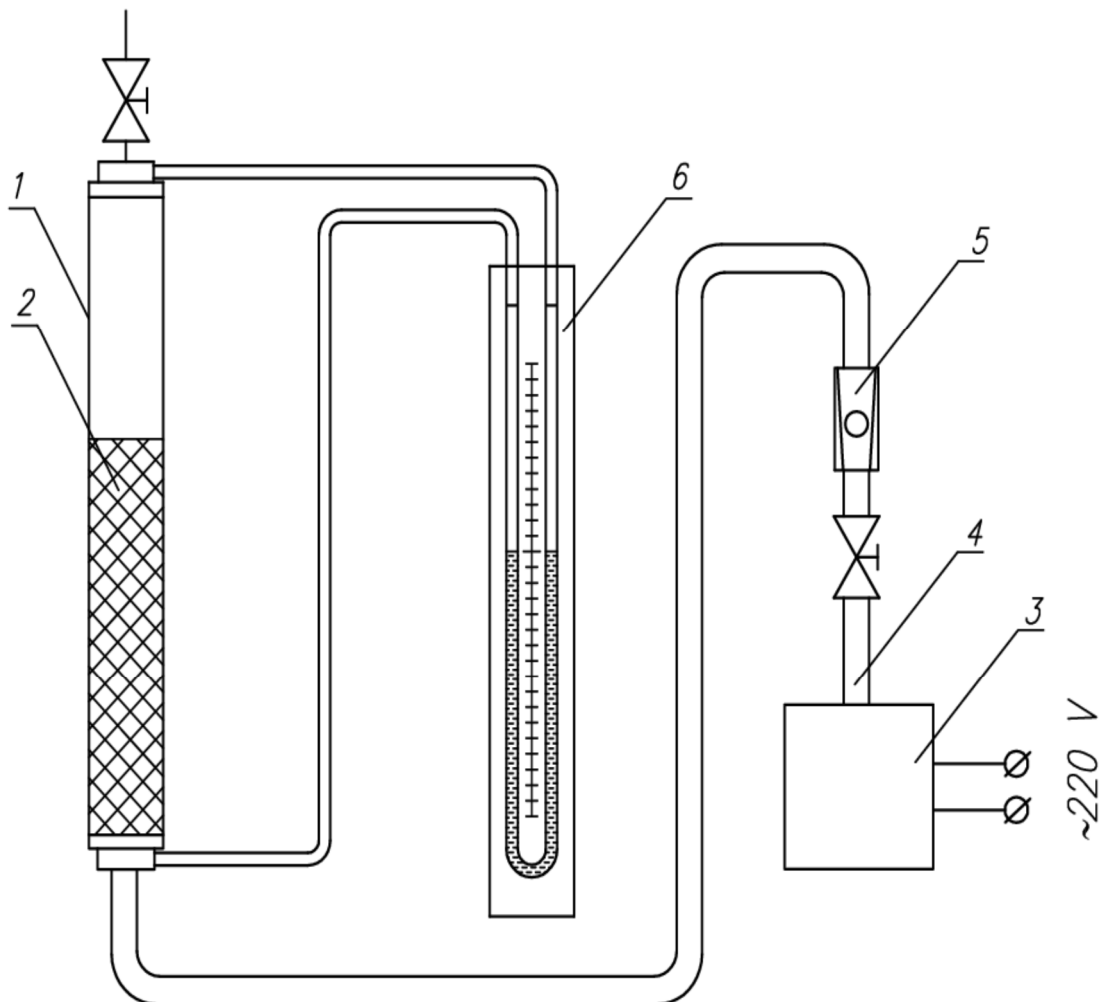


Рисунок 4.1 – Модель трубчатого реактора

1 – реакторна колонка, 2 – сипкий матеріал, 3 – газодувка, 4 – основний хід газу, 5 – витратомір (ротаметр), 6 – водяний дифманометр.

Повітря всмоктується газодувкою (3), надходить у витратомір (5), потім потрапляє у нижню частину реакторної колонки (1) далі рухається вгору через сипкий матеріал (2), водяним дифманометром визначається перепад тиску (6).

Фотографії експериментальної установки представлені на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Фотографії експериментальної установки

а) – реакторна колонка з водяним дифманометром, б) – витратомір

5 ПЛАН И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ

Опис проведення експерименту

За шкалою витратоміра змінювали витрату повітря від -2 мм і до 78 мм. Градування витратоміра наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Шкала градування витратоміра

	Шкала рогаме тра	Скоро сть газа, м/с	Объем ный расход, м3/с
1			
2	0	0,784	0,002
3	5	0,947	0,0024
4	10	1,11	0,0028
5	15	1,275	0,0033
6	20	1,44	0,0037
7	25	1,635	0,0042
8	30	1,83	0,0047
9	35	1,96	0,005
10	40	2,09	0,0053
11	45	2,22	0,0057
12	50	2,35	0,006
13	55	2,55	0,0065
14	60	2,75	0,007
15	65	2,945	0,0075
16	70	3,14	0,008
17	75	3,335	0,0085
18	80	3,53	0,009
19	85	3,635	0,0093
20	90	3,74	0,0095
21	95	4,025	0,0103
22	100	4,31	0,011

Встановлювали витрату вентилем, що дорівнює приблизно однієї десятої діапазону змін. Визначали значення перепаду тиску за допомогою водяного дифманометра для кожного значення витрат, результати записували.

Проводили експеримент при збільшенні витрати від мінімальної до максимальної та при зменшенні витрати від максимальної до мінімальної.

Встановлювали максимальне значення витрати до початку виносу сипучого матеріалу.

Результати експериментів заносили у таблицю.

6 ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Планування, проведення експериментальної частини роботи

Розрахунок необхідної кількості експериментів [6]

Вихідні дані:

α – рівень значущості (поняття математичної статистики, що відображає степінь імовірності помилкового виводу щодо статистичної гіпотези про розподіл ознаки, що перевіряється на основі вибірових даних);

G^* – передбачуване значення відносної дисперсії G .

Необхідно визначити мінімальну кількість вибірок k та обсяг кожної вибірки n , що достатньо для підтвердження гіпотези про однорідність ряду дисперсій.

Обираємо $\alpha = 0.05$, $G_\alpha^* = 0.25$.

Необхідно визначити k та n .

Розв'язок.

Попереднє визначений діапазон зміни вхідного параметра – витрат повітря від повітродувки – від 0 до 16 [діл. шк.].

Розділяємо цей діапазон на зручну кількість інтервалів $k = 11$.

Для заданого G^* і k у таблиці критерію Кохрена [6] необхідно знайти кількість степенів волі n .

Застосувавши метод кускове-лінійної апроксимації, як результат отримали кількість ступенів волі $n = 8$. Відповідно, кількість реалізацій експерименту має бути не менш як $n_e = 9$, оскільки $(n_e - 1) = 8$.

Таким чином, для перевірки гіпотези про однорідність ряду дисперсій (розглядаємо вибірки в кожному з $(k = 11)$ інтервалів) обсягом не менш $n_e = 9$ кожна. Для отримання більш надійного результату збільшимо кількість реалізацій експерименту до $(n_e = 14)$, і в кожному інтервалі будемо мати чотирнадцять точок.

7 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ

Проведені чотирнадцять експериментів, вони записані в таблицю [додаток А]. Всі експерименти записуються в єдину таблицю, розбиваються на інтервали за величиною витрати газу та упорядковуються відповідно до збільшення витрати газу.

Одержані в експериментах дані по шкалі ротаметра відповідно до таблиці 1 переводяться в об'ємні витрати газу, $[m^3/c]$.

Дані щодо перепаду тиску, які одержані по шкалі дифманометра, переводяться у систему одиниць СІ.

8 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

8.1 Попередня обробка даних

Відповідно до плану, експеримент проводився як при збільшенні керуючого параметра, так і при його зменшенні. Для подальшої обробки даних необхідно отсортувати дані, що отримані при зменшенні керуючого параметра від максимального значення до мінімального у зворотному порядку [6].

Після цього зводимо дані усіх експериментів в одну таблицю.

Зведену таблицю сортуємо за збільшенням показників керуючого параметру (витрати повітря) – значеннями шкали ротаметру.

Після сортування даних, розбиваємо їх інтервали. Серединою кожного інтервалу є фіксовані значення витрат повітря, для яких проводилися вимірювання.

Після цього дані готові для подальшої обробки.

8.2 Перевірка однорідності дисперсій серій експериментів

Перевірка гіпотези про однорідність ряду дисперсій (критерій Кохрена)

Обробка даних починається з того, що весь діапазон зміни x на поле кореляції розбивається на 11 рівних інтервалів $\Delta = 14$ одиниць [6].

Все точки, що потрапили в інтервал Δx_j , відносять до його середини x_j . Після цього підраховують часткові середні \bar{y}_j для кожного інтервалу:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n_j} \cdot \sum_{i=1}^{n_j} y_{ji}, \quad (8.1)$$

тут n_j – кількість точок в інтервалі Δx_j .

$$\sum_{j=1}^{11} n_j = 154, \quad (8.2)$$

де k – кількість інтервалів розбиття;

N – обсяг вибірки (кількість даних експериментів).

Для кожного інтервалу розраховуємо дисперсію

$$s_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{n_j - 1}, \quad (8.3)$$

де n_j – кількість даних, що потрапили до інтервалу x_j ;

i – номер точки в інтервалі x_j .

Наступним кроком розраховуємо та аналізуємо послідовності величин G_i :

$$G_j = \frac{s_j^2}{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_k^2}, \quad (8.4)$$

де j – номер вибірки;

k – кількість вибірок (інтервалів розбиття діапазону x).

За результатами розрахунків отримуємо максимальне значення $G_{max} = 0.1734$, воно належить восьмому інтервалу ($s_8^2 = 263156$).

Тепер для $k = 11$ і $(n_1 - 1) = 13$ знайдемо табличне значення $G_{0.05}$ для степені значущості $\alpha = 0.05$.

Оскільки наші дані не точно відповідають табличним, застосуємо метод кусково-лінійної інтерполяції. Підсумкове табличне значення $G_{0.05} = 0.2171$.

Порівняння результатів показує, що розрахункове значення менше табличного ($G_{max} = 0.1734$) < ($G_{0.05} = 0.2171$). Робимо висновок, що гіпотеза про однорідність результатів експериментів підтверджується з імовірністю 0.95. Результати експериментів занесені в таблицю (Додаток Б).

8.3 Пошук викидів експериментальних даних.

Статистична перевірка гіпотез при оцінці членів вибірки, що різко виділяються

Критерій типу r

Оцінка однорідності дисперсій вимірювальних інтервалів показала, що критерій G для першого інтервалу більше табличного значення. Відповідно, для першого інтервалу треба оцінити члени вибірки, статистичні показники яких суттєво відрізняються. Якщо такі будуть знайдені, їх треба відкинути і знову перевірити однорідність дисперсій [6].

Для перевірки статистичних показників розрахуємо для експериментальних значень характеристику r :

$$r = \frac{|\bar{x} - x_i|}{s_n \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}},$$

де

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}.$$

В таблиці [10] знаходимо значення критерію r для рівня значущості $\alpha = 0.05$ і числа ступенів волі $n - 1 = 13$.

$$r_\alpha = 2.493.$$

Вибірка даних не має жодного інтервалу, значення критерію r в якому більше за табличне.

Це означає, що вибірка не має даних, які мають занадто значні відхилення від найбільш очікуваного значення (так званих викидів).

9 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ УСТАНОВКИ

Для розрахунку витрат газу в промисловому апараті приймемо, що стан течії газу в дослідному апараті та промисловому мають бути однаковими. Ця умова буде виконуватися, якщо будуть дорівнюватися відповідні критерії, а саме, критерії Рейнольдса:

$$Re_{да} = Re_{па}, \quad (9.1)$$

де $Re_{да}$ – критерій Рейнольдса у дослідному апараті;

$Re_{па}$ – критерій Рейнольдса у промисловому апараті.

Критерій Рейнольдса визначається за формулою:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (9.2)$$

де v – швидкість речовини;

d – діаметр каналу;

ρ – густина речовини;

μ – динамічна в'язкість.

Після підстановки відомих складових величин у критерії для дослідного та промислового апаратів (9.2) у формулу (9.1) можна знайти величину швидкості газу у промисловому апараті:

$$v_{па} = \frac{v_{да} \cdot d_{да} \cdot \rho_{да} \cdot \mu_{па}}{\mu_{да} \cdot d_{па} \cdot \rho_{па}}. \quad (9.3)$$

Вихідні дані для дослідного апарату (газ – повітря):

Температура газу:	20 [°C]
Густина газу:	1.205 $\left[\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}\right]$
Динамічна в'язкість газу:	18.1 · 10 ⁻⁶ [Па · с]
Внутрішній діаметр апарату:	57 · 10 ⁻³ [м]
Лінійна швидкість газу в апараті:	3.5916 $\left[\frac{\text{М}}{\text{С}}\right]$

Вихідні дані для промислового апарату (газ – повітря):

Робоча температура газу:	500 [°C]
Робочий тиск:	1 [МПа]
Густина газу при атмосферному тиску та робочій температурі (500 [°C]):	0.456 $\left[\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}\right]$
Густина газу при робочому тиску та температурі*:	4.56 $\left[\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}\right]$
Динамічна в'язкість газу при робочій температурі (500 [°C])**:	36.2 · 10 ⁻⁶ [Па · с]
Внутрішній діаметр апарату:	0.4 [м]

* Для розрахунку значення густини газу при робочому тиску, скористаємося рівнянням Клапейрона у вигляді

$$\frac{\rho_1 \cdot T_1}{P_1} = \frac{\rho_2 \cdot T_2}{P_2}.$$

Індексом «1» тут буде позначено, наприклад, початкові значення параметрів, а індексом «2» буде позначено шукані значення параметрів.

$$T_1 = T_2 = 500 \text{ [}^\circ\text{C]};$$

$P_1 = 10^5 \text{ [Па]}$ – атмосферний тиск;

$P_2 = 10^6 \text{ [Па]}$ – робочий тиск в апараті.

Звідси знаходимо

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{T_1 \cdot P_2}{P_1 \cdot T_2}.$$

Оскільки температура не змінюється, рівняння набуде вигляду

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot \frac{P_2}{P_1} = 0.456 \cdot \frac{10^6}{10^5} = 4.56 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right].$$

** Тиск до 10 атмосфер на величину динамічної в'язкості практично не впливає.

Підставляємо висхідні дані у рівняння (9.3) і розраховуємо лінійну швидкість газу (повітря) у реакційної частині промислового апарату

$$\begin{aligned} v_{\text{па}} &= \frac{v_{\text{да}} \cdot d_{\text{да}} \cdot \rho_{\text{да}} \cdot \mu_{\text{па}}}{\mu_{\text{да}} \cdot d_{\text{па}} \cdot \rho_{\text{па}}} = \frac{3.5916 \cdot 57 \cdot 10^{-3} \cdot 1.205 \cdot 36.2 \cdot 10^{-6}}{18.1 \cdot 10^{-6} \cdot 0.4 \cdot 4.56} = \\ &= 0.27 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]. \end{aligned}$$

Тепер можна розрахувати об'ємні витрати газу у промисловому апараті при температурі 500 [°C] і тиску 1 [МПа]

$$F_{\text{па}}^{\text{об}} = v_{\text{па}} \cdot S_{\text{па}} = v_{\text{па}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{па}}^2}{4} = 0.27 \cdot \frac{3.14159 \cdot (0.4)^2}{4} = 0.0339 \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right].$$

де $S_{\text{п а}}$ – площа поперечного перерізу промислового апарату.

Зважаючи на умови в апараті, можна розрахувати масові витрати газу:

$$F_{\text{п а}}^{\text{мас}} = \rho_{\text{п а}} \cdot F_{\text{п а}}^{\text{об}} = 4.56 \cdot 0.0339 = 0.1546 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right].$$

Величина масових витрати газу, на відміну від об'ємних витрат, не залежить від зовнішніх умов, а саме, тиску та температури. Виходячи з цього, можна розрахувати об'ємні витрати на вході газового компресора, що подає повітря у теплообмінник і, в подальшому, до реактора. Густина повітря при 20 [°C] дорівнює 1.205 [кг/м³].

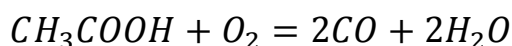
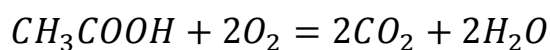
$$F_{\text{вхід}}^{\text{об}} = \frac{F_{\text{п а}}^{\text{мас}}}{\rho_{\text{вхід}}} = \frac{0.1546}{1.205} = 0.128 \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right].$$

10 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ У ЧАСТИНІ РЕАКЦІЙНОГО БЛОКУ

10.1 Процес глибокого окиснення органічних відходів

Технологія знешкодження рідких відходів із застосуванням рідких реагентів-відновлювачів відбувається з процесами випару рідини безпосередньо в реакційній зоні на поверхні часток диспергованого матеріалу. Застосування псевдозрідженого шару часток диспергованого матеріалу дозволяє здійснювати хімічну взаємодію речовин незалежно від їхнього агрегатного стану [4].

Процес описується наступними сумарними рівняннями:



Рідина (без попереднього випару) уводиться безпосередньо в шар псевдозрідженого каталізатора. Перевагою реактора, розробленого для реалізації такого процесу, є сполучення зон випару й реакції в одному апараті. При цьому тепло реакції окиснення повністю або частково використовується для випару рідини й нагрівання реагентів.

Можливість здійснення такого технічного рішення впливає з особливостей явища псевдозрідження твердих часток. У шарі каталізатора відбувається вирівнювання градієнта температур. При безпосередньому контакті рідкого реакційного потоку з розігрітою каталітичною масою відбувається інтенсифікація массо- і теплообмінних процесів і вирівнювання температури реагентів і каталізатора. У цьому й полягає основна перевага застосування псевдозрідженого шару каталізатора перед стаціонарним, тому що для останнього характерний певний градієнт температур по перерізу й висоті шару каталізатора, що знижує ефективність процесу.

Розробка технології термokatалітичного окиснення органічних речовин у реакторі із псевдозрідженим шаром дозволила ефективно знешкоджувати промислові стічні води з різним змістом органіки в інтервалі температур 400 ... 600[°C]. Для процесу застосовуються міднохромові каталізатори, нанесені на сферичний оксид алюмінію. Окиснення органічних складових стоків відбувається до утворення термодинамічно стійких продуктів: діоксиду вуглецю й води. Надлишок кисню підтримується в межах 1.05...1.1.

Вибухобезпечність технології забезпечується застосуванням псевдозрідженого шару твердого матеріалу, що має властивості гасити виникаюче полум'я. Рекомендоване значення порізності псевдозрідженого шару каталізатора становить 0.56...0.58 при діаметрі часток каталізатора не більш 2 [мм].

Для зіставлення активності ряду каталітичних систем при окисненні різних класів органічних сполук уведено поняття граничного навантаження по вуглецю. Граничне навантаження – це величина, що забезпечує концентрацію монооксиду вуглецю в газах, що відходять, до 20 [мг/м³] (ПДК робочої зони) [4].

10.2 Опис технологічної схеми пілотної установки

На рис. 10.1 наведена запропонована технологічна схема пілотної установки з відділенням компресії зріджуючого агенту

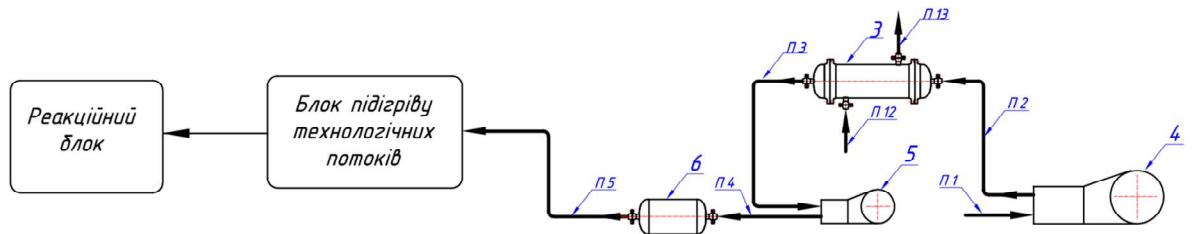


Рисунок 10.1 – Технологічна схема пілотної установки з відділенням компресії зріджуючого агенту

Технологічні апарати та потоки схеми установки з відділенням компресії зріджуючого агенту наведено у таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Технологічні апарати та потоки схеми

Апарати:		
3	–	проміжний холодильник;
4	–	компресор першого ступеня;
5	–	компресор другого ступеня;
6	–	ресивер.
Технологічні потоки:		
П1	–	атмосферне повітря на вході компресора;
П2	–	повітря з виходу першого ступеня компресора на вхід проміжного холодильника;
П3	–	повітря з виходу проміжного холодильника на вхід другого ступеня компресора;
П4	–	повітря з виходу другого ступеня компресора на вхід ресивера;
П5	–	повітря з виходу ресивера на вхід підігрівача повітря;

П12	–	вхід охолоджувальної води в проміжний холодильник;
П13	–	вихід охолоджувальної води з проміжного холодильника.

На першому етапі підготовки зріджуючого агенту для реактора глибокого окиснення органічних відходів необхідне підняти тиск атмосферного повітря, що подається на установку, до 1 [МПа]. Це здійснюється у відділенні компресії зріджуючого агенту. Основним апаратом відділення компресії є толоковий компресор. Подальші розрахунки показують, що необхідно застосовувати двоступеневий компресор з проміжним охолоджувачем стиснутого газу. Атмосферне повітря П1 надходить до першого ступеня компресора 4, де воно стискується і нагрівається до температури не більше 180 [°C]. Далі стиснене повітря П2 поступає до проміжного охолоджувача 3, де охолоджується до 100 [°C] охолоджувальною водою П12 ... П13, і потоком П3 надходить до другого ступеня толокового компресора, де набуває кінцевого значення тиску. Стиснене повітря П4 надходить до ресиверу 6, де вирівнюється його тиск і відбирається компресорне масло та конденсат і потоком П5 надходить до підігрівача повітря.

11 РОЗРАХУНОК КОМПРЕСОРА

У компресорах важливо не допускати надмірного підвищення температури стиснення газу (не більше 180 [°C]), так як існує небезпека вибуху і загоряння мастила.

Вихідні дані для розрахунку компресора:

Робочий газ – повітря, показник адіабати $k = 1.4$, степінь політропи приймемо $n = 1.3$.

Тиск на вході у компресор – 0.1 [МПа].

Температура на вході у компресор – 20 [°C] (293.15 [K]).

Тиск на виході у компресор – 1.1 [МПа].

Масові витрати газу – $F_{\text{мас}} = 0.1546$ [кг/с].

Об'ємні витрати газу – $F_{\text{об}} = 0.128$ [м³/с].

Вважаючи робочий газ ідеальним, а процес стискування – адіабатним, знайдемо температуру газу на виході компресора.

З залежності

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

знаходимо

$$T_{2a} = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293.15 \cdot \left(\frac{1.1}{0.1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 581.6 \text{ [K]}.$$

Степінь підвищення тиску в компресорі

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1.1}{0.1} = 11.$$

Будемо вважати, що при роботі компресора буде застосовуватися компресорне масло, що допускає температуру нагріву до $T_{2 \text{ доп}} = 180 \text{ [}^\circ\text{C]} (453.15 \text{ [K]})$.

Оцінимо кількість ступенів стискування, необхідних для досягнення заданих параметрів газу.

З урахуванням допустимої температури нагріву масла, степiнь підвищення тиску в одному ступені компресора при адіабатному стискуванні

$$\varepsilon_{1 \text{ max}} = \left(\frac{T_{2 \text{ доп}}}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{453.15}{293.15} \right)^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 4.59 .$$

Оцінюємо необхідне число ступенів стиснення

$$z_{\text{min}} = \frac{\ln \varepsilon}{\ln \varepsilon_{1 \text{ max}}} = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \varepsilon_{1 \text{ max}}} = \frac{\ln 11}{\ln 4.59} = 1.57 .$$

Таким чином, необхідне обрати двуступеневий компресор з проміжним охолодженням стискуваного газу.

Визначимо тиск газу на виході першого ступеня компресора в результаті політропічного стиснення з обмеженням за температурою.

$$P_{2 \text{ 1ст}} = P_{1 \text{ 1ст}} \cdot \left(\frac{T_{2 \text{ 1ст}}}{T_{1 \text{ 1ст}}} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 0.1 \cdot \left(\frac{453.15}{293.15} \right)^{\frac{1.3}{1.3-1}} = 0.66 \text{ [МПа]} .$$

Газ, нагрітий до $180 \text{ [}^\circ\text{C]} (453.15 \text{ [K]})$, поступає в проміжний холодильник, де охолоджується до $125 \text{ [}^\circ\text{C]} (398.15 \text{ [K]})$ та подається до другого ступеню компресору. У другому ступеню газ дотискається до 1.1 [МПа] і виходить з температурою

$$T_{2\text{ст}} = T_{1\text{ст}} \cdot \left(\frac{P_{2\text{ст}}}{P_{1\text{ст}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 398.15 \cdot \left(\frac{1.1}{0.66} \right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 448 \text{ [K]}.$$

11.1 Оцінка потужності компресора

Теоретична робота, що витрачається за цикл стискування визначається як

$$L_{\text{ц}} = \frac{n}{n-1} \cdot R_{\text{пов}} \cdot (T_2 - T_1) \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right],$$

де $L_{\text{ц}}$ – робота, що здійснюється у циліндрі компресора за один цикл стиснення газу;

$R_{\text{пов}}$ – газова стала для повітря [Дж/(кг · К)].

$$R_{\text{пов}} = \frac{R}{M} = \frac{8.314}{29} = 287 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right],$$

де R – універсальна газова стала [Дж/(Моль · К)];

M – мольна маса повітря [кг/кМоль].

Робота, що здійснюється у двох ступенях стискування, дорівнює сумі робіт за кожним ступенем

$$L_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^z L_{\text{ц}i},$$

де z – кількість ступенів стиснення.

$$\begin{aligned} L_{\text{ц}} &= \frac{n}{n-1} \cdot R_{\text{пов}} \cdot [(T_{2\text{ст}} - T_{1\text{ст}}) + (T_{2\text{ст}} - T_{1\text{ст}})] = \\ &= \frac{1.3}{1.3-1} \cdot 287 \cdot [(453.15 - 293.15) + (448 - 398.15)] = \end{aligned}$$

$$= 260\,983.45 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right].$$

При цьому розміри циліндрів підбираються таким чином, щоб проводилася однакова робота на всіх щаблях стиснення повітря.

За нашими розрахунками на першому ступені стиснення здійснена робота дорівнює $190\,986.7$ [Дж/кг], на другому ступені – $69\,996.75$ [Дж/кг].

Для оптимізації роботи компресора необхідне збалансувати роботу ступенів стискування таким чином, аби $L_{ц1ст} \approx L_{ц2ст}$.

Встановимо, що температура газу на виході першого ступеня дорівнює 125°C ($398,15$ К). Тоді тиск буде дорівнювати

$$P_{2\,1ст} = P_{1\,1ст} \cdot \left(\frac{T_{2\,1ст}}{T_{1\,1ст}} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 0.1 \cdot \left(\frac{398.15}{293.15} \right)^{\frac{1.3}{1.3-1}} = 0.377 \text{ [МПа]} .$$

Стиснений газ з виходу першого ступеня компресора надходить до проміжного холодильника, де охолоджується до температури 100°C ($373,15$ К). Охолоджений газ подається до другого ступеню компресора, де стискається до необхідного тиску 1.1 [МПа]. Його температура після стискування становить

$$T_{2\,2ст} = T_{1\,2ст} \cdot \left(\frac{P_{P2\,2ст}}{P_{2\,1ст}} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 373.15 \cdot \left(\frac{1.1}{0.377} \right)^{\frac{1.3-1}{1.3}} = 477.8 \text{ [К]} .$$

Робота за цикл стиснення газу, що здійснюється у першому ступені компресора, дорівнює

$$L_{ц1} = \frac{n}{n-1} \cdot R_{пов} \cdot (T_{2\,1ст} - T_{1\,1ст}) =$$

$$= \frac{1.3}{1.3 - 1} \cdot 287 \cdot (398.15 - 293.15) = 130\,585 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right].$$

Робота за цикл, що здійснюється у другому ступені компресора дорівнює

$$\begin{aligned} L_{ц2} &= \frac{n}{n-1} \cdot R_{\text{пов}} \cdot (T_{22\text{ст}} - T_{12\text{ст}}) = \\ &= \frac{1.3}{1.3 - 1} \cdot 287 \cdot (477.8 - 373.15) = 130\,150 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]. \end{aligned}$$

Робота за цикл, що здійснюється у двох ступенях компресора дорівнює

$$L_{ц} = L_{ц1} + L_{ц2} = 130\,585 + 130\,150 = 260\,735 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right].$$

Потужність компресору визначається як

$$N_{\text{компр}} = F_{\text{мас}} \cdot L_{ц} = 0.1546 \cdot 260\,735 = 40\,310 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт} \right].$$

На рис. 11.1 наведено схему двоступінчастого толокового компресора. Обидві ступені розташовані на одному валу, розташування циліндрів – V-образне.



Рисунок 11.1 – Схема двоступінчастого толокового компресора

12 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЇ

Правила з безпеки життєдіяльності при роботі у комп'ютерних лабораторіях

12.1 Загальні положення

12.1.1 Дана інструкція розроблена відповідно до вимог державних санітарних правил та норм ДСанПіН 5.5.6.009-98 "Влаштування и обладнання кабінетів комп'ютерної техніки в навчальних закладах та режим праці учнів на персональних комп'ютерах", затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України 30.12 .1998 р. № 9.

12.1.2 Вимоги цієї інструкції з безпеки поширюються на студентів під час проведення навчального процесу в комп'ютерних лабораторіях кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств (МОПП).

12.1.3 До роботи із засобами обчислювальної техніки допускаються особи, які пройшли медичний огляд і інструктаж з питань охорони праці та безпеки життєдіяльності: вступний – при зарахуванні до університету; первинний – перед початком занять в комп'ютерній лабораторії; плановий – при зміні умов виконання навчальних завдань, при порушенні студентами вимог нормативно-правових актів про охорону праці.

12.1.4 Дотримання цієї інструкції обов'язково.

12.1.5 Робочі місця студентів при роботі із засобами обчислювальної техніки в комп'ютерних лабораторіях кафедри МОПП повинні бути організовані відповідно до таких вимог:

12.1.6 Вимоги до приміщення:

- а) приміщення, обладнане комп'ютерною технікою, має мати підлоги з поверхнею, пристосованої до вологого прибирання;
- б) вікна повинні мати регульовані жалюзі або штори.

12.1.7 Вимоги до освітлення приміщень та робочих місць:

а) приміщення комп'ютерних лабораторій повинно мати природне і штучне освітлення;

б) штучне освітлення в приміщеннях комп'ютерних лабораторій повинно здійснюватися системою загального освітлення; в якості джерел світла при штучному освітленні повинні застосовуватися переважно люмінесцентні лампи;

12.1.8 Вимоги до мікроклімату:

а) в приміщенні комп'ютерних лабораторій температура повітря повинна бути $19,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$; відносна вологість повітря $60 \pm 5\%$, швидкість руху повітря не більше $0,1$ м/с;

б) для охолодження і очищення повітря від пилу необхідно встановлювати побутові кондиціонери.

12.1.9 Вимоги до обладнання та організації робочого місця:

а) основним обладнанням робочого місця з персональним комп'ютером є монітор, клавіатура, стілець (крісло), робочий стіл, допоміжним – пуспітр, підставка для ніг та інше;

б) конструкція робочого столу повинна забезпечувати можливість оптимального розміщення на поверхні столу обладнання, при цьому необхідно враховувати його кількість, конструктивні особливості і характер виконуваної роботи;

12.1.10 Вимоги з електробезпеки:

а) приміщення комп'ютерної лабораторії має бути обладнано автономним контуром захисного заземлення;

б) заземлення персональних ЕОМ здійснюється за допомогою штатного кабелю живлення з заземлювальним провідником і триполюсні розетки;

12.1.11 Вимоги щодо пожежної безпеки. У приміщеннях комп'ютерних лабораторій забороняється:

а) користуватися електронагрівальними приладами;

б) встановлювати на вікнах глухі решітки;

- в) користуватися відкритим вогнем.

12.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

12.2.1 Візуально оглянути справність кабелів живлення, вилок, розеток, заземлення.

12.2.2 Переконатися в достатності освітлення місця роботи.

12.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи

12.3.1 При виконанні роботи на ПЕОМ необхідно перебувати в раціональній позі, яка виключає підвищене навантаження на характерні групи м'язів.

12.3.2 Забороняється застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам «Правил улаштування електроустановок до переносних електропроводів».

12.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

12.4.1 Завершити роботу на ПЕОМ.

12.4.2 Повідомити про закінчення роботи викладачеві, який проводив заняття або зав. Лабораторією.

12.5 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

12.5.1 При виникненні будь-якої аварійної ситуації негайно повідомити про те, що трапилося викладачеві, який проводить заняття або зав. лабораторією і діяти тільки за їхньою вказівкою.

Правила з безпеки життєдіяльності при роботі в лабораторіях

12.6 Загальні положення

12.6.1 Дана інструкція розроблена з урахуванням вимог Правил улаштування електроустановок для студентів при виконанні лабораторних робіт у лабораторіях кафедри електронних апаратів.

12.6.2 Порухення цієї інструкції забороняється.

12.6.3 При виконанні лабораторних робіт використовуються електроприлади і електрообладнання.

12.7 Вимоги безпеки перед початком роботи

12.7.1 Візуально перевірити справність обладнання, проводки, вилок, розеток.

12.7.2 При виявленні будь-яких несправностей до роботи не приступати, негайно повідомити викладачеві, зав. лабораторією.

12.8 Вимоги безпеки під час виконання роботи

12.8.1 Працювати тільки на справному обладнанні.

12.8.2 Підключати і відключати електроприлади необхідно тільки тримаючись за вилку.

Студентам забороняється виконувати будь-які ремонтні роботи на електрообладнанні і електроприладах.

Забороняється переміщати з місця на місце включені в мережу електроприлади.

12.9 Вимоги безпеки після закінчення роботи

12.9.1 Відключити електроприлади та електрообладнання.

12.9.2 Привести до ладу робоче місце.

12.10 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

12.10.1 При роботі з електрообладнанням і приладами можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- ураження електричним струмом.

12.10.2 Причинами займання горючих матеріалів можуть бути перегрів електронних компонентів схем, проводів, утворення електричних іскор і дуг.

Правила з охорони праці при роботі на електрообладнанні, вимірювальних приладах і персональному комп'ютері

12.11 Загальні положення

12.11.1 Дана інструкція призначена для працівників кафедри МОПП і студентів при роботі на персональному комп'ютері, приладах і другому електрообладнанні, розташованому в лабораторіях кафедри.

12.11.2 До електроустаткування кафедри відносяться: персональні комп'ютери, монітори, принтери, джерела живлення, генератори, осцилографи, частотоміри, вольтметри, амперметри, телевізори, відеомагнітофони, електричні шафи, комбіновані прилади, кондиціонери, подовжувачі мережеві і розетки.

12.11.3 До роботи з електрообладнанням допускаються особи, які пройшли інструктаж, навчання та перевірку знань з питань охорони праці.

12.12 Вимоги безпеки перед початком роботи

12.12.1 Одягнути спецодяг.

12.12.2 Перед підключенням обладнання до мережі необхідно перевірити ланцюг захисного заземлення в мережевих розетках.

12.13 Вимоги безпеки під час виконання роботи

12.13.1 Працівникам і студентам дозволяється працювати тільки на справних вимірювальних приладах, персональних комп'ютерах і іншому електрообладнанні.

12.13.2 При роботі з електрообладнанням і електроприладами можливі випадки ураження людей електричним струмом. Причинами цього можуть бути:

- одночасний дотик руками або металевим предметом до корпусу електрообладнання і оголених проводів;
- робота на несправному електрообладнанні;
- порушення правил користування електрообладнанням.

12.14 Вимоги безпеки після закінчення роботи

12.14.1 Після закінчення роботи вимкнути прилади, персональні комп'ютери, стенди.

12.14.2 Вимкнути всі автоматичні вимикачі, відключити використовувані подовжувачі мережі 220 V.

12.15 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

12.15.1 При роботі з електрообладнанням і вимірювальними приладами на кафедрі МОПП можливі наступні аварійні ситуації:

- загоряння горючих матеріалів;
- поразка електричним струмом.

12.15.2 При пожежі:

- негайно знеструмити все електрообладнання загальним автоматичним вимикачем;
- негайно евакуювати в безпечне місце постраждалих людей;
- повідомити по телефону 101 до служби порятунку;
- видалити в безпечне місце неушкоджені комп'ютери та прилади;
- приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння;
- гасити електрообладнання і дроти водою забороняється.

ВИСНОВКИ

В ході виконання роботи:

- ознайомився зі способами псевдозрідження сипких матеріалів;
- розроблена експериментальна установка апарату з псевдозрідженим шаром;
- розроблений план проведення експерименту;
- провели експерименти та обробили результати експериментів;
- на основі критеріальних рівнянь визначили основні параметри пілотної установки;
- розроблена частини загальної технологічної схеми, а саме, схеми підключення та параметрів компресора;
- розраховано основний апарат схеми компресії – компресора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Разумов И.М. Псевдоожигение и пневмотранспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов, – М.: Химия, 1972. – 240 с.
2. Катализ в кипящем слое. Изд. 2-е, перераб. Под общей ред. И.П. Мухленова и В.М. Помаранцева. – Л.: Химия, 1978. – 312 с.
3. Кунии Д. Промышленное псевдоожигение / Д. Кунии, О. Левешнпиль, США, 1969. Пер. с англ., под ред. М.Г. Слинько и Г.С. Яблонского, – М.: Химия, 1976. – 294 с.
4. Аэрозольный катализ. Возможности, проблемы, решения / М.А. Гликин, Д.А. Кутакова, Е.М. Принь, Е.В. Фурсов // Химическая промышленность. – 1999.
5. Ванєєв С.М. Зав. кафедри Технічної теплофізики Сумського Державного Університету <http://energysystems.com.ua/tipy-kompressorov/?lang=ua>
6. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романенков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., Атомиздат, 1978, 232 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Результати проведення експерименту

Номер інтервалу	Положення поплавка ротаметра, [см]	Показник по шкалі ротаметра, [ед. шкали]	Витрати газу, [м ³ /с]	Перепад тиску по шкалі дифманометра, [см.вод.ст.]	Перепад тиску, [Па]	Висота псевдозріженого шару, [см]
1	0,50	1,43	0,002040	28,00	2745,91	106,00
1	0,50	1,43	0,002040	28,00	2745,91	106,00
1	0,50	1,43	0,002040	30,00	2942,04	104,00
1	0,50	1,43	0,002040	24,00	2353,63	106,00
1	0,50	1,43	0,002040	24,00	2353,63	106,00
1	0,50	1,43	0,002040	24,00	2353,63	108,00
1	0,50	1,43	0,002040	30,00	2942,04	105,00
1	0,50	1,43	0,002040	26,00	2549,77	105,00
1	0,50	1,43	0,002040	26,00	2549,77	105,00
1	0,50	1,43	0,002040	24,00	2353,63	106,00
1	0,50	1,43	0,002040	28,00	2745,91	104,00
1	0,50	1,43	0,002040	28,00	2745,91	106,50
1	0,50	1,43	0,002040	28,00	2745,91	106,50
1	0,50	1,43	0,002040	24,00	2353,63	106,50
2	1,00	2,86	0,002164	32,00	3138,18	106,00
2	1,00	2,86	0,002164	30,00	2942,04	106,00
2	1,00	2,86	0,002164	33,00	3236,25	104,00
2	1,00	2,86	0,002164	25,00	2451,70	107,00
2	1,00	2,86	0,002164	30,00	2942,04	106,00
2	1,00	2,86	0,002164	26,00	2549,77	108,00
2	1,00	2,86	0,002164	33,00	3236,25	105,00

2	1,00	2,86	0,002164	27,00	2647,84	105,00
2	1,00	2,86	0,002164	33,00	3236,25	105,00
2	1,00	2,86	0,002164	28,00	2745,91	107,00
2	1,00	2,86	0,002164	30,00	2942,04	104,00
2	1,00	2,86	0,002164	29,00	2843,97	107,00
2	1,00	2,86	0,002164	30,00	2942,04	106,00
2	1,00	2,86	0,002164	27,00	2647,84	107,00
3	1,50	4,29	0,002289	36,00	3530,45	106,00
3	1,50	4,29	0,002289	32,00	3138,18	106,50
3	1,50	4,29	0,002289	36,00	3530,45	104,00
3	1,50	4,29	0,002289	28,00	2745,91	108,00
3	1,50	4,29	0,002289	32,00	3138,18	106,00
3	1,50	4,29	0,002289	28,00	2745,91	109,00
3	1,50	4,29	0,002289	36,00	3530,45	105,00
3	1,50	4,29	0,002289	32,00	3138,18	106,50
3	1,50	4,29	0,002289	35,00	3432,38	105,50
3	1,50	4,29	0,002289	30,00	2942,04	107,50
3	1,50	4,29	0,002289	34,00	3334,31	104,00
3	1,50	4,29	0,002289	30,00	2942,04	107,00
3	1,50	4,29	0,002289	32,00	3138,18	106,00
3	1,50	4,29	0,002289	30,00	2942,04	107,00
4	2,00	5,71	0,002413	40,00	3922,72	106,00
4	2,00	5,71	0,002413	33,00	3236,25	107,00
4	2,00	5,71	0,002413	38,00	3726,59	104,00
4	2,00	5,71	0,002413	30,00	2942,04	108,50
4	2,00	5,71	0,002413	38,00	3726,59	106,00
4	2,00	5,71	0,002413	32,00	3138,18	109,50
4	2,00	5,71	0,002413	39,00	3824,65	105,00
4	2,00	5,71	0,002413	35,00	3432,38	106,50

4	2,00	5,71	0,002413	39,00	3824,65	106,00
4	2,00	5,71	0,002413	33,00	3236,25	108,00
4	2,00	5,71	0,002413	37,00	3628,52	104,00
4	2,00	5,71	0,002413	32,00	3138,18	107,50
4	2,00	5,71	0,002413	34,00	3334,31	106,50
4	2,00	5,71	0,002413	32,00	3138,18	108,00
5	2,50	7,14	0,002537	44,00	4314,99	106,00
5	2,50	7,14	0,002537	34,00	3334,31	108,00
5	2,50	7,14	0,002537	42,00	4118,86	104,00
5	2,50	7,14	0,002537	34,00	3334,31	109,00
5	2,50	7,14	0,002537	40,00	3922,72	106,50
5	2,50	7,14	0,002537	34,00	3334,31	110,00
5	2,50	7,14	0,002537	42,00	4118,86	105,50
5	2,50	7,14	0,002537	38,00	3726,59	107,00
5	2,50	7,14	0,002537	41,00	4020,79	106,00
5	2,50	7,14	0,002537	34,00	3334,31	108,50
5	2,50	7,14	0,002537	40,00	3922,72	104,00
5	2,50	7,14	0,002537	34,00	3334,31	108,00
5	2,50	7,14	0,002537	38,00	3726,59	106,50
5	2,50	7,14	0,002537	34,00	3334,31	108,50
6	3,00	8,57	0,002662	47,00	4609,20	106,00
6	3,00	8,57	0,002662	36,00	3530,45	108,50
6	3,00	8,57	0,002662	45,00	4413,06	104,50
6	3,00	8,57	0,002662	36,00	3530,45	110,00
6	3,00	8,57	0,002662	44,00	4314,99	106,50
6	3,00	8,57	0,002662	37,00	3628,52	111,00
6	3,00	8,57	0,002662	45,00	4413,06	106,00
6	3,00	8,57	0,002662	40,00	3922,72	107,00
6	3,00	8,57	0,002662	45,00	4413,06	106,50

6	3,00	8,57	0,002662	35,00	3432,38	109,00
6	3,00	8,57	0,002662	44,00	4314,99	104,00
6	3,00	8,57	0,002662	36,00	3530,45	109,00
6	3,00	8,57	0,002662	42,00	4118,86	106,50
6	3,00	8,57	0,002662	36,00	3530,45	109,50
7	3,50	10,00	0,002786	50,00	4903,40	107,00
7	3,50	10,00	0,002786	40,00	3922,72	109,00
7	3,50	10,00	0,002786	48,00	4707,27	104,50
7	3,50	10,00	0,002786	38,00	3726,59	110,50
7	3,50	10,00	0,002786	48,00	4707,27	107,00
7	3,50	10,00	0,002786	36,00	3530,45	112,00
7	3,50	10,00	0,002786	49,00	4805,33	106,50
7	3,50	10,00	0,002786	44,00	4314,99	107,50
7	3,50	10,00	0,002786	46,00	4511,13	106,50
7	3,50	10,00	0,002786	38,00	3726,59	110,00
7	3,50	10,00	0,002786	48,00	4707,27	105,00
7	3,50	10,00	0,002786	40,00	3922,72	110,00
7	3,50	10,00	0,002786	44,00	4314,99	107,00
7	3,50	10,00	0,002786	39,00	3824,65	110,00
8	4,00	11,43	0,002911	51,00	5001,47	107,50
8	4,00	11,43	0,002911	42,00	4118,86	109,00
8	4,00	11,43	0,002911	54,00	5295,68	105,00
8	4,00	11,43	0,002911	39,00	3824,65	111,00
8	4,00	11,43	0,002911	50,00	4903,40	107,50
8	4,00	11,43	0,002911	38,00	3726,59	114,00
8	4,00	11,43	0,002911	51,00	5001,47	106,50
8	4,00	11,43	0,002911	48,00	4707,27	107,50
8	4,00	11,43	0,002911	49,00	4805,33	114,00
8	4,00	11,43	0,002911	40,00	3922,72	110,00

8	4,00	11,43	0,002911	50,00	4903,40	105,50
8	4,00	11,43	0,002911	42,00	4118,86	112,00
8	4,00	11,43	0,002911	46,00	4511,13	107,00
8	4,00	11,43	0,002911	42,00	4118,86	110,50
9	4,50	12,86	0,003035	52,00	5099,54	110,50
9	4,50	12,86	0,003035	45,00	4413,06	109,50
9	4,50	12,86	0,003035	52,00	5099,54	114,00
9	4,50	12,86	0,003035	42,00	4118,86	113,00
9	4,50	12,86	0,003035	52,00	5099,54	122,00
9	4,50	12,86	0,003035	44,00	4314,99	115,00
9	4,50	12,86	0,003035	54,00	5295,68	108,00
9	4,50	12,86	0,003035	52,00	5099,54	108,00
9	4,50	12,86	0,003035	50,00	4903,40	111,00
9	4,50	12,86	0,003035	43,00	4216,93	112,00
9	4,50	12,86	0,003035	52,00	5099,54	116,00
9	4,50	12,86	0,003035	46,00	4511,13	112,00
9	4,50	12,86	0,003035	49,00	4805,33	112,00
9	4,50	12,86	0,003035	46,00	4511,13	110,50
10	5,00	14,29	0,003160	54,00	5295,68	111,00
10	5,00	14,29	0,003160	50,00	4903,40	110,00
10	5,00	14,29	0,003160	50,00	4903,40	115,00
10	5,00	14,29	0,003160	46,00	4511,13	114,00
10	5,00	14,29	0,003160	54,00	5295,68	124,00
10	5,00	14,29	0,003160	48,00	4707,27	115,00
10	5,00	14,29	0,003160	58,00	5687,95	108,50
10	5,00	14,29	0,003160	58,00	5687,95	109,00
10	5,00	14,29	0,003160	52,00	5099,54	115,00
10	5,00	14,29	0,003160	44,00	4314,99	114,00
10	5,00	14,29	0,003160	53,00	5197,61	113,00

10	5,00	14,29	0,003160	48,00	4707,27	112,50
10	5,00	14,29	0,003160	52,00	5099,54	112,50
10	5,00	14,29	0,003160	50,00	4903,40	111,00
11	5,50	15,71	0,003284	58,00	5687,95	126,00
11	5,50	15,71	0,003284	58,00	5687,95	126,00
11	5,50	15,71	0,003284	50,00	4903,40	115,00
11	5,50	15,71	0,003284	50,00	4903,40	115,00
11	5,50	15,71	0,003284	55,00	5393,74	117,00
11	5,50	15,71	0,003284	55,00	5393,74	117,00
11	5,50	15,71	0,003284	60,00	5884,08	125,00
11	5,50	15,71	0,003284	60,00	5884,08	125,00
11	5,50	15,71	0,003284	53,00	5197,61	123,00
11	5,50	15,71	0,003284	53,00	5197,61	123,00
11	5,50	15,71	0,003284	54,00	5295,68	114,00
11	5,50	15,71	0,003284	54,00	5295,68	114,00
11	5,50	15,71	0,003284	56,00	5491,81	118,00
11	5,50	15,71	0,003284	56,00	5491,81	118,00

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Кохрена

Інтервальні середні $Y_{j \text{ сер}}$	Квадрати різниць	Інтервальні дисперсії S_j^2	Інтервальна відносна дисперсія G_j	Табличне значення критерія Кохрена
2605,81	19627,23	49883,37	0,0329	0,2171
	19627,23			
	113052,86			
	63592,24			
	63592,24			
	63592,24			
	113052,86			
	3140,36			
	3140,36			
	63592,24			
	19627,23			
	19627,23			
	19627,23			
63592,24				
2893,01	60108,40	67691,31	0,0446	
	2404,34			
	117812,47			
	194751,22			
	2404,34			
	117812,47			
	117812,47			
	60108,40			
	117812,47			

	21639,02		
	2404,34		
	2404,34		
	2404,34		
	60108,40		
	137832,24		
	441,61		
	137832,24		
	170806,00		
	441,61		
	170806,00		
3159,19	137832,24	77202,97	0,0509
	441,61		
	74632,55		
	47154,43		
	30667,55		
	47154,43		
	441,61		
	47154,43		
	226890,82		
	44161,27		
	78508,93		
	254368,94		
	78508,93		
3446,39	94995,81	103360,03	0,0681
	143082,53		
	196,27		
	143082,53		
	44161,27		

	33170,02		
	94995,81		
	12561,43		
	94995,81		
3705,57	371396,32	133427,44	0,0879
	137832,24		
	170806,00		
	137832,24		
	47154,43		
	137832,24		
	170806,00		
	441,61		
	99362,87		
	137832,24		
	47154,43		
	137832,24		
	441,61		
	137832,24		
3978,76	397451,47	187485,37	0,1235
	200982,87		
	188617,71		
	200982,87		
	113052,86		
	122670,21		
	188617,71		
	3140,36		
	188617,71		
	298530,22		
	113052,86		

	200982,87		
	19627,23		
	200982,87		
	415312,25		
	113052,86		
	200982,87		
	283417,25		
	200982,87		
	530720,38		
4258,96	298530,22	222995,56	0,1469
	3140,36		
	63592,24		
	283417,25		
	200982,87		
	113052,86		
	3140,36		
	188617,71		
	254368,94		
	143082,53		
	637688,80		
	452211,45		
	165065,03		
4497,12	593723,80	263155,90	0,1734
	254368,94		
	44161,27		
	94995,81		
	329933,79		
	165065,03		
	143082,53		

	196,27		
	143082,53		
4756,30	117812,47	156466,79	0,1031
	117812,47		
	117812,47		
	406332,79		
	117812,47		
	194751,22		
	290924,66		
	117812,47		
	21639,02		
	290924,66		
	117812,47		
	60108,40		
	2404,34		
	60108,40		
5022,49	74632,55	160060,09	0,1055
	14180,68		
	14180,68		
	261483,81		
	74632,55		
	99362,87		
	442839,45		
	442839,45		
	5937,24		
	500543,51		
	30667,55		
	99362,87		
5937,24			

	14180,68		
5407,75	78508,93	95962,07	0,0632
	78508,93		
	254368,94		
	254368,94		
	196,27		
	196,27		
	226890,82		
	226890,82		
	44161,27		
	44161,27		
	12561,43		
	12561,43		
	7065,80		
	7065,80		

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Пошук викидів даних за критерієм типу г

Табличне значення критерію $g - 2,493$

Ном ер інте рвал у j	Ном ер точк и i	Сортова ні значенн я перепад у тиску Y_{ji} [Па]	Інтервал ьні середні $Y_{j\text{сер}}$ [°C]	Квадрати різниці	Інтерваль ні дисперсії S_j^2	Інтервал ьне середне квадрат ичне відхиле ння S_j	Значе ння крите рію g (min, max)
1	1	2353,63	2605,81	63592,24	58953,07	242,80	1,078
1	2	2353,63		63592,24			
1	3	2353,63		63592,24			
1	4	2353,63		63592,24			
1	5	2353,63		63592,24			
1	6	2549,77		3140,36			
1	7	2549,77		3140,36			
1	8	2745,91		19627,23			
1	9	2745,91		19627,23			
1	10	2745,91		19627,23			
1	11	2745,91		19627,23			
1	12	2745,91		19627,23			
1	13	2942,04		113052,86			
1	14	2942,04		113052,86			1,437
2	1	2451,70	2893,01	194751,22	79998,82	282,84	1,619
2	2	2549,77		117812,47			
2	3	2647,84		60108,40			
2	4	2647,84		60108,40			
2	5	2745,91		21639,02			

2	6	2843,97		2404,34			
2	7	2942,04		2404,34			
2	8	2942,04		2404,34			
2	9	2942,04		2404,34			
2	10	2942,04		2404,34			
2	11	3138,18		60108,40			
2	12	3236,25		117812,47			
2	13	3236,25		117812,47			
2	14	3236,25		117812,47			1,259
3	1	2745,91	3159,19	170806,00	91239,87	302,06	1,420
3	2	2745,91		170806,00			
3	3	2942,04		47154,43			
3	4	2942,04		47154,43			
3	5	2942,04		47154,43			
3	6	3138,18		441,61			
3	7	3138,18		441,61			
3	8	3138,18		441,61			
3	9	3138,18		441,61			
3	10	3334,31		30667,55			
3	11	3432,38		74632,55			
3	12	3530,45		137832,24			
3	13	3530,45		137832,24			
3	14	3530,45		137832,24			1,275
4	1	2942,04	3446,39	254368,94	122152,76	349,50	1,498
4	2	3138,18		94995,81			
4	3	3138,18		94995,81			
4	4	3138,18		94995,81			
4	5	3236,25		44161,27			
4	6	3236,25		44161,27			

4	7	3334,31		12561,43			
4	8	3432,38		196,27			
4	9	3628,52		33170,02			
4	10	3726,59		78508,93			
4	11	3726,59		78508,93			
4	12	3824,65		143082,53			
4	13	3824,65		143082,53			
4	14	3922,72		226890,82			1,414
5	1	3334,31	3705,57	137832,24	157686,98	397,10	0,970
5	2	3334,31		137832,24			
5	3	3334,31		137832,24			
5	4	3334,31		137832,24			
5	5	3334,31		137832,24			
5	6	3334,31		137832,24			
5	7	3726,59		441,61			
5	8	3726,59		441,61			
5	9	3922,72		47154,43			
5	10	3922,72		47154,43			
5	11	4020,79		99362,87			
5	12	4118,86		170806,00			
5	13	4118,86		170806,00			
5	14	4314,99		371396,32			1,593
6	1	3432,38	3978,76	298530,22	221573,62	470,72	1,205
6	2	3530,45		200982,87			
6	3	3530,45		200982,87			
6	4	3530,45		200982,87			
6	5	3530,45		200982,87			
6	6	3628,52		122670,21			
6	7	3922,72		3140,36			

6	8	4118,86		19627,23			
6	9	4314,99		113052,86			
6	10	4314,99		113052,86			
6	11	4413,06		188617,71			
6	12	4413,06		188617,71			
6	13	4413,06		188617,71			
6	14	4609,20		397451,47			1,390
7	1	3530,45	4258,96	530720,38	263540,21	513,36	1,473
7	2	3726,59		283417,25			
7	3	3726,59		283417,25			
7	4	3824,65		188617,71			
7	5	3922,72		113052,86			
7	6	3922,72		113052,86			
7	7	4314,99		3140,36			
7	8	4314,99		3140,36			
7	9	4511,13		63592,24			
7	10	4707,27		200982,87			
7	11	4707,27		200982,87			
7	12	4707,27		200982,87			
7	13	4805,33		298530,22			
7	14	4903,40		415312,25			1,303
8	1	3726,59	4497,12	593723,80	311002,43	557,68	1,434
8	2	3824,65		452211,45			
8	3	3922,72		329933,79			
8	4	4118,86		143082,53			
8	5	4118,86		143082,53			
8	6	4118,86		143082,53			
8	7	4511,13		196,27			
8	8	4707,27		44161,27			

8	9	4805,33		94995,81			
8	10	4903,40		165065,03			
8	11	4903,40		165065,03			
8	12	5001,47		254368,94			
8	13	5001,47		254368,94			
8	14	5295,68		637688,80			1,486
9	1	4118,86	4756,30	406332,79	184915,30	430,02	1,538
9	2	4216,93		290924,66			
9	3	4314,99		194751,22			
9	4	4413,06		117812,47			
9	5	4511,13		60108,40			
9	6	4511,13		60108,40			
9	7	4805,33		2404,34			
9	8	4903,40		21639,02			
9	9	5099,54		117812,47			
9	10	5099,54		117812,47			
9	11	5099,54		117812,47			
9	12	5099,54		117812,47			
9	13	5099,54		117812,47			
9	14	5295,68		290924,66			1,302
10	1	4314,99	5022,49	500543,51	189161,92	434,93	1,688
10	2	4511,13		261483,81			
10	3	4707,27		99362,87			
10	4	4707,27		99362,87			
10	5	4903,40		14180,68			
10	6	4903,40		14180,68			
10	7	4903,40		14180,68			
10	8	5099,54		5937,24			
10	9	5099,54		5937,24			

10	10	5197,61		30667,55			
10	11	5295,68		74632,55			
10	12	5295,68		74632,55			
10	13	5687,95		442839,45			
10	14	5687,95		442839,45			1,588
11	1	4903,40	5407,75	254368,94	113409,72	336,76	1,554
11	2	4903,40		254368,94			
11	3	5197,61		44161,27			
11	4	5197,61		44161,27			
11	5	5295,68		12561,43			
11	6	5295,68		12561,43			
11	7	5393,74		196,27			
11	8	5393,74		196,27			
11	9	5491,81		7065,80			
11	10	5491,81		7065,80			
11	11	5687,95		78508,93			
11	12	5687,95		78508,93			
11	13	5884,08		226890,82			
11	14	5884,08		226890,82			1,468