

РЕФЕРАТ

Звіт 115 с., 2 табл., 10 рис., 3 дод., 13 літ. джерел

ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ, РЕАКТОР, 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 реактора.

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 реактора;
- ✓ розрахунок основного апарату схеми – реактора.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Мета і задачі роботи.....	8
2 Аналітичний огляд.....	9
2.1 Загальні відомості процесу псевдозрідження.....	9
2.2 Переваги та недоліки застосування псевдозрідження.....	14
2.3 Характеристики псевдозрідженого шару.....	17
2.4 Методи виготовлення елементів апаратів під тиском.....	30
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 у частині реакційного блока.....	49
10.1 Процес глибокого окиснення органічних відходів.....	49
10.2 Опис технологічної схеми пілотної установки.....	51
11 Розрахунки на міцність, жорсткість і стійкість.....	52
11.1 Розрахунок на міцність, жорсткість і стійкість.....	52
11.2 Розрахунок нижнього еліптичного днища.....	55
11.3 Розрахунок конічного переходу.....	56
11.4 Розрахунок верхнього еліптичного днища.....	60

11.5 Розрахунок фланцевого з'єднання апарату.....	61
11.6 Розрахунок опорних вузлів та стропових пристроїв.....	81
11.7 Конструкція і загальний вид пілотної моделі апарату.....	82
12 Техніка безпеки під час роботи в лабораторії.....	85
Висновки.....	92
Перелік джерел посилання.....	93
Додаток А.....	95
Додаток Б.....	102
Додаток В.....	109

ВСТУП

Формою існування й розвитку науки є наукове дослідження. Мета наукового дослідження – визначення конкретного об'єкта і всебічне, достовірне вивчення його структури, характеристик, зв'язків на основі розроблених у науці принципів і методів пізнання, а також отримання корисних для діяльності людини результатів, впровадження у виробництво з подальшим ефектом.

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.

Наукові дослідження розділяються на фундаментальні й прикладні.

Під фундаментальними науковими дослідженнями розуміють експериментальну або теоретичну діяльність, спрямовану на отримання нових знань про основні закономірності побудови, функціонування й розвитку людини, суспільства, навколишнього природного середовища. Прикладні наукові дослідження визначаються як дослідження, спрямовані переважно на застосування нових знань для досягнення практичних цілей і вирішення конкретних завдань. За джерелом фінансування розрізняють наукові дослідження: бюджетні, госпдоговірні і не фінансовані. Бюджетні дослідження фінансуються з коштів бюджету України. Госпдоговірні дослідження фінансуються організаціями – замовниками з господарських договорів. Не фінансовані дослідження можуть виконуватися з ініціативи вченого, індивідуального плану викладача.

За тривалістю наукові дослідження можна розділити на довгострокові, короткострокові й експрес-дослідження.

У науці можна виділити емпіричний і теоретичний рівні дослідження й організації знання. Теоретичний рівень наукового знання припускає наявність особливих абстрактних об'єктів і поєднуючих їх теоретичних законів, що створюються з метою ідеалізованого опису й пояснення емпіричних ситуацій, тобто з метою пізнання сутності явищ. Їх мета – розширити знання суспільства й допомогти більш глибоко зрозуміти закони природи. Такі розробки використовують в основному для подальшого розвитку нових теоретичних досліджень, які можуть бути довгостроковими, бюджетними й ін.

Елементами емпіричного знання є факти, що отримуються за допомогою спостережень і експериментів і констатуючі якісні й кількісні характеристики об'єктів і явищ. Стійка повторюваність і зв'язки між емпіричними характеристиками виражаються за допомогою емпіричних законів, що часто мають імовірнісний характер [1].

Економічна ефективність, якісні та кількісні показники технологічних процесів і обладнання значною мірою залежать від доцільності та обґрунтованості схем і режимів функціонування розроблюваних систем, які вибрали проектувальники, їхнього вміння прогнозувати поведінку систем у складних умовах виробництва з багатогранною взаємодією факторів у просторі та часі. Традиційні методи прийняття виробничих рішень, базованих на набутому досвіді, часто вступають у протиріччя із швидким розвитком техніки. Це спричиняє розтягування строків проектування, збільшення затрат, часто тільки у вторинних зразках чи системах, після експериментальних досліджень на об'єкті досягають більш-менш оптимальних рішень.

Специфіка технологічних процесів і обладнання окремих галузей виробництва зумовлює свої особливості, пов'язані з використанням складних

фізичних і хімічних явищ, мініатюризацією або іншими особливостями виробів, забезпеченням високої точності механізмів тощо.

Застосування та розширення моделювання явищ і процесів, механізмів і обладнання, систем керування процесами й виробництвом, особливо із застосуванням електронно-обчислювальної техніки, дає змогу вже на перших етапах проектування перевірити пропоновані технічні рішення, вибрати найкращі з них.

Моделювання – основний метод дослідження таких технологічних процесів, для яких неможливо визначити експериментально їхні основні характеристики у виробничих умовах. Крім того, тепер значно збільшилась важливість значення абстрактно-теоретичних методів дослідження. Без складання моделі в сучасних умовах виробництва практично неможливо одержати оптимальне рішення.

Моделювання дає можливість спеціалістам підвищити ефективність їхніх суджень та інтуїції, може слугувати засобом узагальнення й осмислення реальності. Цим пояснюється інтерес спеціалістів до моделювання як прикладної науки. Досягненню істотних результатів у цій галузі сприяють широкі знання методів моделювання та вміння застосовувати їх на практиці [2].

1 МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

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

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 реактора;
7. Розрахунок основного апарату схеми – реактора;
8. Формулювання висновків.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

2.1 Загальні відомості процесу псевдозрідження

Псевдозрідженим називають стан двофазної системи, що характеризується переміщенням твердих частинок одна щодо одної за рахунок обміну енергією з яким-небудь її джерелом. Під псевдозрідженим розуміють перетворення шару зернистого матеріалу в псевдогомогенну систему під впливом зріджуючого агента. При цьому сама двофазна псевдогомогенна система отримала назву псевдозрідженого шару. Свою назву псевдозріджений шар отримав завдяки тому, що йому притаманні багато властивостей крапельних рідин [1].

В системі газ-тверде сипучий зважений шар твердого матеріалу за зовнішнім виглядом нагадує киплячу рідину. Як і в киплячій рідині, в ньому виникають, а потім зростають, зливаються бульбашки газу; на верхній межі виникають фонтанчики; вся система Г-Т в постійному нерегульованому русі. Частина дослідників називає киплячим зважений шар при порівняно невеликих швидкостях газу – від початку зважування зерен до $3 \dots 5 \omega_{кр}$, тому що саме в цій області зважений шар найбільш схожий на киплячу рідину. У ряді випадків виробничого застосування зваженого шару особливо важливим виявилось те, що твердий зернистий матеріал набуває плинність, подібну рідині, тому зважений шар називають зрідженим або псевдозрідженим [2].

Рух потоку газу через шар сипкого матеріалу може викликати його розширення і хаотичний рух твердих частинок в цьому розширеному шарі. Такий шар, званий псевдозрідженим, може існувати при швидкості газового потоку, що перевищує певне значення. При менших швидкостях потік фільтрується через звивисті порові канали нерухомого шару [3].

Псевдозрідження зернистих матеріалів – явище, що має місце при взаємодії газу і шару сипкого зернистого матеріалу; при цьому висхідний

потік газу, що продувається через шар, призводить зернистий матеріал в легкорухливий, подібний рідині, стан [4].

Шар частинок твердого матеріалу при проходженні через нього потоку газу може залишатися нерухомим; в цьому випадку кожна частинка зіткається з іншою і обсяг шару постійний, навіть при деякому зростанні швидкості потоку газу w (рис. 1.1, а). Подальше збільшення w призводить до того, що частинки починають вібрувати (рис. 1.1, б), потім вібрація посилюється і деякі частинки з глибини шару пересуваються до його поверхні (рис. 1.1, в). При цьому висота шару H майже не змінюється (рис. 1.2, ділянка а-б).

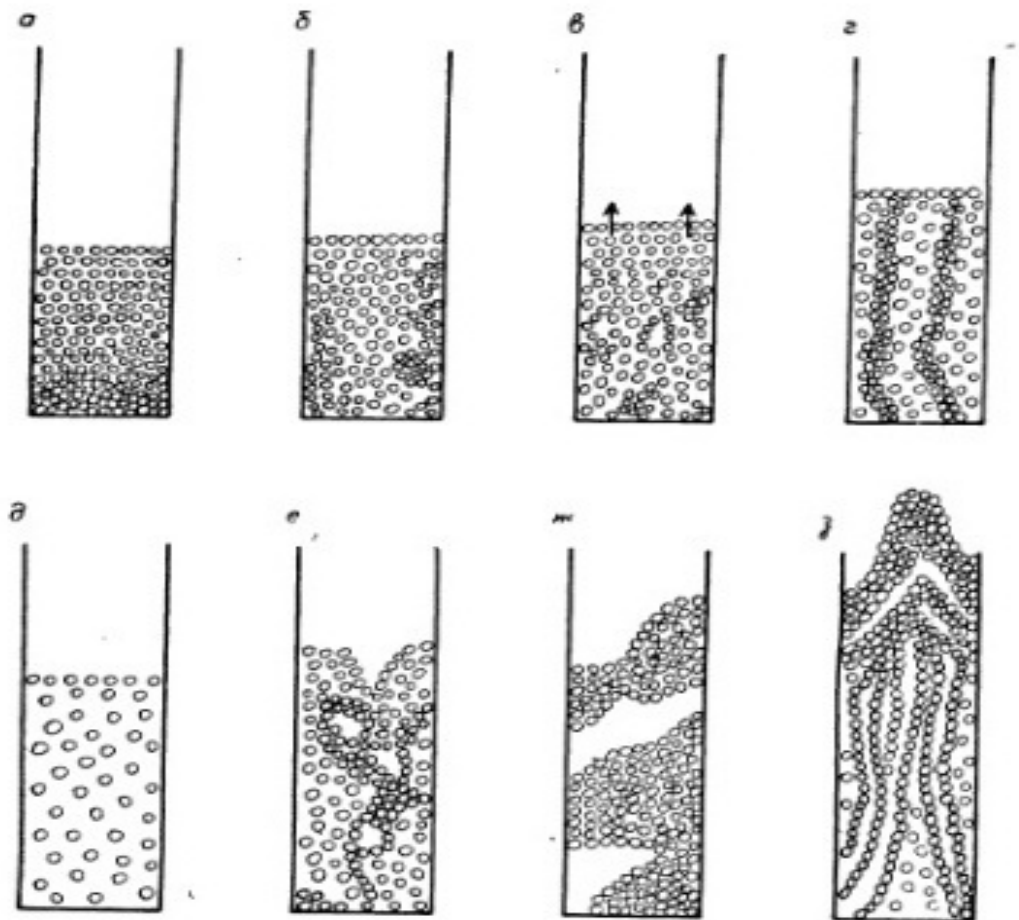


Рисунок 2.1 – Характер зміни структури шару в залежності від швидкості потоку газу

Гідравлічний опір Δp шару з підвищенням швидкості потоку газу збільшується по степеневому закону, при чому показник ступеня n залежить від значення критерію Рейнольдса Re .

При певній швидкості $w_{кр}$ потоку газу – шар дещо розбухає, і в результаті пересування частинок з нижньої частини шару до поверхні в ньому утворюються канали (рис. 2.1, г).

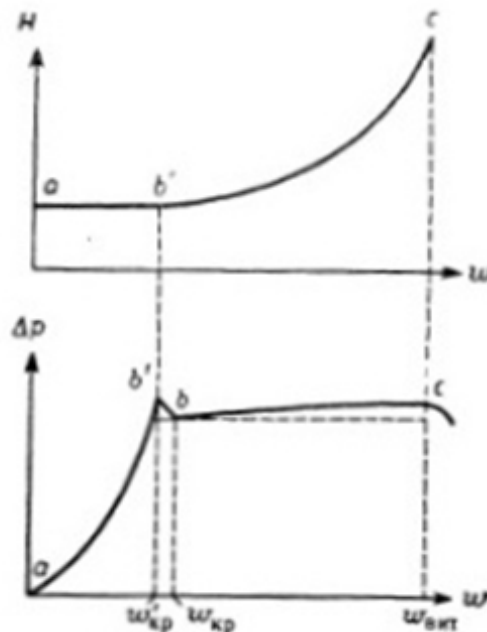


Рисунок 2.2 – Зміна висоти гідравлічного опору p в залежності від швидкості потоку газу w

З подальшим підвищенням швидкості потоку газу, до так званої критичної ($w_{кр}$), шар ще більше збільшується в об'ємі (рис. 2.1, д) і значення Δp зменшується (рис. 2.2, ділянка $b'-b$). Тепер навіть незначне зростання швидкості призводить до розриву шару дрібними довгастими газовими прошарками (рис 2.1, е), всі тверді частинки починають рухатися – починається псевдозрідження (рис. 2.2, точка b). При подальшому збільшенні швидкості потоку газу (рис. 1.2, ділянка $b-c$) гідравлічний опір залишається

майже незмінним і рівним вазі шару, що приходить на одиницю площі, а порізність і висота шару збільшуються. Деякий стрибок гідравлічного опору в момент розширення шару пояснюється перебудовою його структури – на подолання сил зчеплення між твердими частинками необхідна витрата енергії.

У шарі дрібних частинок, а також частинок, схильних до злипання, газові бульбашки здійснюються під час руху вгору і можуть утворювати канали, через які значна частина газу проходить не контактуючи з матеріалом.

При порівняно високих швидкостях газу (найчастіше в шарах великої висоти) газові бульбашки зливаються по горизонталі і заповнюють весь переріз апарату, розриваючи шар і утворюючи "поршні".

Ці скупчення частинок підкидаються вгору і знову падають вниз, причому гідравлічний опір шару коливається. Амплітуда коливань зростає із збільшенням висоти шару і швидкості потоку газу.

Коли швидкість потоку газу буде вищою швидкості витання часток, утворюється газовий струмінь, що проходить через шар то уздовж його осі, то поблизу стінки апарату (рис 2.1, з), при цьому частки починають виноситись газовим потоком – настає режим пневмотранспорту. Внаслідок зменшення ваги шару значення $\Delta\rho$ знижується.

Перехід щільного шару в псевдозріджений і характер "кипіння" залежать від багатьох факторів, в тому числі і від конструкції апарату. Найбільш сприятливі умови утворення псевдозрідженого шару спостерігаються при сферичній формі частинок і їх однорідному фракційному складі, причому стійке псевдозрідження має місце при збільшенні порозності шару порівняно з нерухомим на 0,15. Для щільного шару, що складається з сферичних частинок рекомендується приймати порозність $\varepsilon = 0,4$; тоді початок стійкої роботи відповідає $\varepsilon = 0,55$. Стале псевдозрідження в щільній фазі спостерігається до $\varepsilon = 0,75$. Особливістю щільної фази є нерухомість шару в цілому щодо стінок апарату. При

збільшенні швидкості потоку газу ($\varepsilon \approx 0,9$) досягається стан шару, який зветься розбавленою фазою.

Великі частинки однакового розміру схильні до утворення шару з барботажем великих міхурів. Додавання до такого прошарку порції більш дрібних частинок трохи збільшує однорідність псевдозрідження, газові пузири стають менше. Тверді частинки, схильні до злежування, утворюють в області, близької до початку псевдозрідження, шар з наскрізними каналами.

Газ проходить по цим каналам, залишаючи практично нерухомою основну масу частинок твердого матеріалу.

Чисельні спостереження показали, що зі збільшенням швидкості потоку зріджуючого агента вище деякого значення, стабільність і однорідність псевдозрідженого шару, що має постійний по висоті перетин, зменшуються, об'єм газових бульбашок зростає по мірі їх підйому [5].

Апарат зваженого шару представляє собою камеру або колону, розділену однією або декількома сітчатими або ковпачковими решітками й забезпечену штуцерами для введення і виведення реагуючих фаз. При дуже малих швидкостях безперервного потоку газу шар зернистого матеріалу лежить на решітці, тобто спирається на неї, тисне на решітку силою своєї ваги. Однак зі зростанням $\omega_{кр}$ збільшується сила тертя між газом і твердою фазою і тиск зернистого матеріалу на решітку зменшується.

При першій критичній швидкості $\omega_{кр}$ вага шару врівноважується силою тертя газу і підйомною силою Архімеда; шар зернистого матеріалу підіймається в потоці газу і не тисне на решітку. Решітка служить в основному для розподілу потоку газу по перерізу апарату і в шарі зернистого матеріалу.

В подальшому при збільшенні швидкості газу, відстані між частинками зернистого матеріалу зростають настільки, щоб сила Архімеда і сила тертя врівноважували вагу шару.

При значному збільшенні швидкості потоку газу, в порівнянні з першою критичною швидкістю $\omega_{кр}$, сили тертя виявляються достатніми не тільки для подолання ваги частинок, але і для повідомлення їм такої кількості руху, якого достатньо для їх винесення за межі зваженого шару.

В системі газ-тверде зважений шар однорідних зерен існує при збільшенні загальної швидкості від $\omega_{кр}$ до швидкості виносу $\omega_в$ приблизно в 5-20 разів. В залежності від співвідношення густини зерен і газу, а також від розміру зерен значення $\omega_в$ коливаються $\omega_в \approx 5\omega_{кр}$ до $\omega_в \approx 20\omega_{кр}$ [2].

2.2 Переваги та недоліки техніки псевдозрідження

Широке впровадження методу псевдозрідження в промислову практику обумовлено наступними його основними перевагами:

- 1 Інтенсивне перемішування твердої фази, що призводить до практичного вирівнювання температур і концентрацій в обсязі псевдозрідженого шару. Завдяки цьому, зокрема, усувається небезпека локального перегріву (або переохолодження) твердих частинок, що перешкоджає оптимальному протіканню ряду теплових, каталітичних та інших процесів.
- 2 Високі значення коефіцієнтів ефективною теплопровідності і тепловіддачі від псевдозрідженого шару до поверхонь теплообміну (або навпаки), співмірні з відповідними значеннями коефіцієнтів для крапельних рідин. Ця найважливіша особливість псевдозрідженого шару дозволяє не тільки економити поверхні теплообміну і робочі обсяги апаратів, але також здійснювати хімічні та інші процеси з високим тепловим навантаженням при тонкому температурному регулюванні.
- 3 Можливість використання твердих частинок малих розмірів, тобто твердої фази з розвиненою питомою поверхнею, для зниження дифузійного гальмування і підвищення продуктивності апаратів при здійсненні ряду сорбційних, теплових, каталітичних та інших процесів. Зауважимо, що

застосування дрібних твердих частинок в апаратах з нерухомим шаром твердої фази часто перешкоджають нерівномірність температурного поля в поперечних і поздовжніх перетинах шару, високий гідравлічний опір і малоінтенсивний теплообмін (низькі коефіцієнти тепловіддачі). Крім того, на відміну від нерухомого шару твердих частинок, де сумарна поверхня останніх значно перевищує активну поверхню фазового контакту, в псевдозрідженому шарі величини цих поверхонь помітно зближуються.

- 4 Рухливість («текучість») псевдозрідженого шару дозволяє створити апарати з безперервним введенням свіжої та відведенням відпрацьованої твердої фази, використовуючи при цьому виносні пристрої для теплообміну та регулювання температури. Як приклад можна привести сучасні апарати для каталітичного крекінгу нафти в псевдозрідженому шарі, де між реактором та регенератором циркулює до 1 т/сек каталізатора з розмірами частинок 30 ... 100 мк. Слід зазначити, що при діаметрі цих апаратів до 18 м і тепловим навантаженням 80 ... 100 млн. ккал/год перепад температур по висоті шару зазвичай не перевищує 3°C.
- 5 Невеликий гідравлічний опір і незалежність його величини від швидкості зріджуючого агента (газу, рідини) в межах існування псевдозрідженого шару.
- 6 Широкий діапазон властивостей застосовуваних твердих частинок і зріджуючих агентів (гази, пари і краплинної рідини), включаючи можливість живлення апаратів з псевдозрідженим шаром пастоподібними матеріалами і суспензіями.
- 7 Порівняно простий пристрій апаратів з псевдозрідженим шаром, легкість їх механізації і автоматизації.

Поряд з великими перевагами, методу псевдозрідження притаманні деякі недоліки, найбільш суттєві з яких призводять до наступного:

1. Неможливість протитоку фаз в межах окремого псевдозрідженого шару внаслідок інтенсивного перемішування і, отже, неможливість здійснення процесів хімічного перетворення, тепло- і масообміну при

максимальній рушійній силі. Інтенсивне перемішування частинок псевдозрідженого шару гальмує проходження хімічних реакцій в результаті зниження робочих концентрацій реагентів і, отже, рушійної сили процесу. При цьому вплив перемішування проявляється тим сильніше, чим вище порядок хімічної реакції і більше необхідна глибина перетворення. Процеси в окремому псевдозрідженому шарі часто характеризуються більш низьким ступенем перетворення (в разі каталітичного крекінгу дистилятної сировини – 67 ... 70%) і великим необхідним обсягом каталізатора (при каталітичному крекінгу – в 6 ... 10 разів), ніж процеси в нерухомому шарі каталізатора. Сказане стосується як до простих незворотних, так і до оборотних і складних процесів. У випадку складних процесів, якщо цільовими є продукти неповного перетворення реагентів, перемішування знижує селективність через утворення небажаних кінцевих продуктів.

2. Нерівномірність часу перебування в псевдозрідженому шарі частинок твердої фази і очікує агент. Однаково можливе швидке проскакування частинок і їх перебування в шарі довше середньостатистичного часу.

3. Можливість у ряді випадків небажаної зміни властивостей твердих частинок (стирання, розтріскування, коксування, злипання, спікання і т. п.). Помічено, що порошкоподібні матеріали починають агломерування у псевдозрідженому шарі при температурах нижче їх точки плавлення або розм'якшення.

4. Необхідність установки потужних пиловловлюючих апаратів на виході газів з псевдозрідженого шару, особливо при широкому гранулометричному складі твердої фази.

5. Ерозія апаратури в зоні псевдозрідженого шару, особливо значна у разі використання частинок з високими абразивними властивостями.

6. Обмеженість робочих швидкостей чекає агент межами, відповідними початку псевдозрідження твердої фази та її виносу з шару.

7. Виникнення значних зарядів статичної електрики при псевдозрідженні частинок діелектричних матеріалів (вибухонебезпечність системи) [1].

2.3 Характеристики псевдозрідженого шару

2.3.1 Порізність шару сипкого матеріалу

Порізність шару ε (частка пустот, відносний вільний об'єм) зернистого матеріалу визначається за формулою [2]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\gamma_{ш}}{\gamma_m} \quad (2.1)$$

де $\gamma_{ш}$ – вагова концентрація зернистого матеріалу в шарі (об'ємна вага шару)

У випадку нерухомого зернистого шару:

$$\varepsilon_o = 1 - \frac{\gamma_o}{\gamma_m} \quad (2.2)$$

де γ_o – насипна вага матеріалу.

Величина ε_o залежить від форми частинок, від гранулометричного складу, а також від діаметру апарату D_A . При цьому біля стінок апарату локальне значення ε_o більше ніж у ядрі шару.

Порізність нерухомого шару значно залежить від способу засипки матеріалу в апарат. Механічний вплив на шар (постукування по апарату, утрамбування и т.п.) призводить до зменшення порізності; с іншого боку,

достатньо інтенсивна вібрація може привести до розпушування шару.

Зміна порізності характеризує розширення шару при псевдозрідженні, оскільки його об'єм дорівнює:

$$V = \frac{V_m}{1 - \varepsilon} \quad (2.3)$$

Сумарний об'єм твердих частинок, які складають нерухомий шар, менше об'єму, який займає шар. Величина, що характеризує об'єм порожнеч між твердими частинками, називається порізністю шару. Якщо позначити V_1 – об'єм, займаний шаром, а об'єм твердих частинок V_2 , то

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1} \quad (2.4)$$

Порізність шару твердих кулястих частинок однакового розміру залежить не від їх діаметру, а від кута, отриманого висями, з'єднуючими центри сусідніх шарів. Теоретична порізність нерухомого шару кулястих частинок може змінюватись в межах від 0,476 до 0,259 [3].

2.3.2 Перепад тиску в шарі

Основною гідродинамічною характеристикою зваженого шару (при незмінній кількості матеріалу в ньому) є постійність $\Delta p_{ш}$ [6]:

$$\Delta p_{ш} = G_{ш} / S = const \quad (2.5)$$

де $G_{ш}$ - вага матеріалу в шарі, Н; S - площа поперечного перерізу, м².

Розглянемо падіння тиску в потоці через шар твердих частинок. На рис. 2.3 представлена типова крива зміни перепаду тиску в монодисперсному шарі частинок піску. При відносно низьких швидкостях потоку в щільному шарі падіння тиску приблизно пропорційне швидкості газу. Максимальний перепад тиску Δp_{\max} , трохи вище, ніж статичний тиск шару[7].

По мірі подальшого збільшення швидкості газу щільний шар раптово «розпушується». При швидкостях газу, що перевищують швидкість мінімального псевдозрідження, шар розширюється, утворюються газові бульбашки, які можна спостерігати візуально, і в результаті має місце неоднорідне псевдозрідження.

Незважаючи на збільшену швидкість газу, падіння тиску залишається практично незмінним. Для пояснення цієї сталості падіння тиску відзначимо, що щільна фаза системи газ-тверде добре аерується і може легко деформуватися без помітного опору. За гідродинамічними властивостями щільну фазу системи можна порівняти з рідиною.

Графік зміни перепаду тиску в залежності від швидкості зручний як наближена характеристика якості псевдозрідження, особливо в тих випадках, коли візуальні спостереження неможливі. Так, шар з хорошим псевдозрідженим буде вести себе, як показано на рис. 2.3.

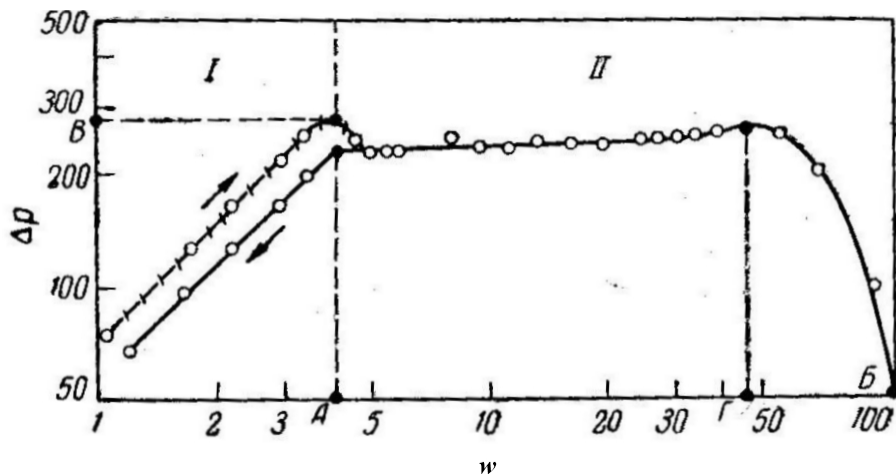


Рисунок 2.3 – Залежність $\Delta p_{ш}$ в шарі частинок піску однакового розміру від швидкості w , потоку повітря:

I – зона щільного нерухомого шару; II – зона псевдозрідженого шару; А – початок псевдозрідження; Б – винесення частинок; В – пік тиску при переході нерухомого шару до псевдозрідженому станом; Г – початок винесення частинок, перехід від нерухомого стану до псевдозрідженого.

2.3.3 Швидкість початку псевдозрідження

Швидкість потоку, при якій опір шару стає рівним вазі шару, що припадає на одиницю площі поперечного перерізу, і при якій частки нерухомого шару переходять у завислий стан, називається критичною швидкістю або швидкість псевдозрідження [6].

Швидкість зріджуючого агенту ω'_o в початковий момент псевдозрідження шару зернистого матеріалу (швидкість початку псевдозрідження) є важливою характеристикою цього матеріалу, яка відіграє велику роль в інженерних розрахунках та наукових дослідженнях.

Прирівнюючи гідравлічний опір до втрати напору при русі потоку через шар, отримаємо рівняння для визначення критичної швидкості псевдозрідження [5]:

$$\text{Re}_{кр} = \frac{Ar}{150 \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} + \sqrt{\frac{1,75 \cdot Ar}{\varepsilon^3}}} \quad (2.6)$$

При безладній засипці шару можна в середньому прийняти $\varepsilon = 0,4$.
Тоді:

$$\text{Re}_{кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (2.7)$$

Зручною характеристикою діапазону існування зваженого шару може служити співвідношення

$$\frac{\omega_{вит}}{\omega_{кр}} = K_{макс} \quad (2.8)$$

Для встановлення безпосередньої залежності $K_{макс}$ від критерію Архімеда Ar можна скористатися рівняннями для визначення швидкостей початку псевдозрідження і витання. Враховуючи, що $\frac{\omega_{вит}}{\omega_{кр}} = \frac{\text{Re}_{вит}}{\text{Re}_{кр}}$,
отримуємо:

$$K_{макс} = \frac{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (2.9)$$

При цьому в області ламінарного режиму (для дрібних частинок) величина невелика Ar і

$$K_{макс} \rightarrow 1400 / 18 = 77,7 \quad (2.10)$$

В області розвиненого турбулентного режиму

$$K_{\text{макс}} \rightarrow 5,22 / 0,61 = 8,56 \quad (2.11)$$

Цей аналіз стосується лише монодисперсних систем або сумішей вузького гранулометричного складу. У разі широких фракцій дрібні частинки впливають на великі, що призводить до зниження значення $\omega_{кр}$, що визначається для найбільш великих часток. Тому формули, за якими розраховуються швидкість витання і критична швидкість, не можуть бути використані для встановлення гранично допустимого відношення розмірів найбільшою і найменшою частинок в суміші $(d_{\text{макс}} / d_{\text{мін}})_{пр}$, вище якого дрібні частинки будуть винесені із шару раніше, ніж великі перейдуть в псевдозріджений стан, – так званого максимального числа полідисперсності $D_{\text{макс}}$.

Для знаходження слід скористатися функціональною залежністю між критеріями Архімеда Ar і Лященко Ly (рис. 2.4).

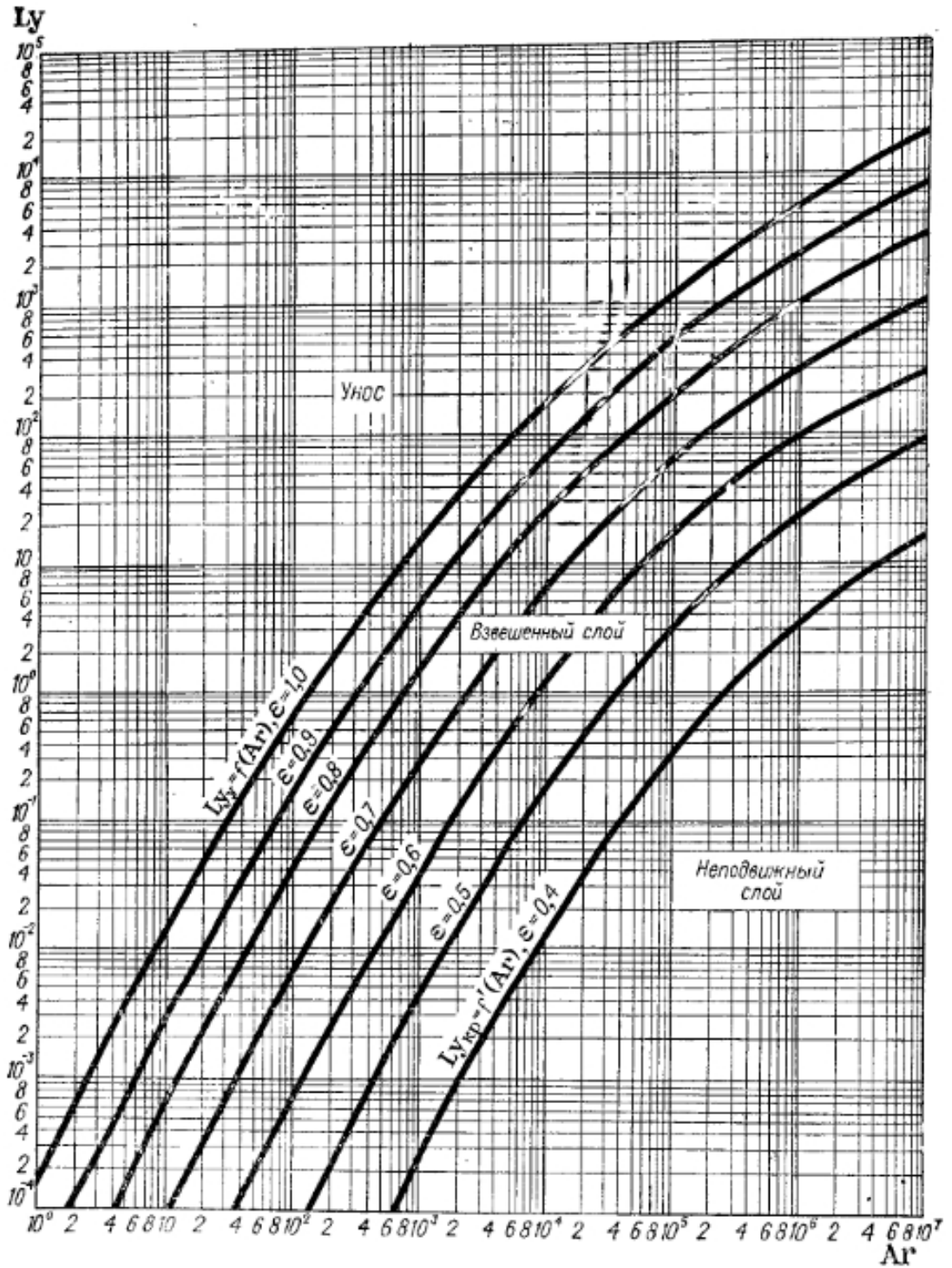


Рисунок 2.4. – Залежність $Ly = f(Ar, \epsilon)$

По рис. 2.4 при заданому значенні Ar можна визначити $Ly_{\text{вит}}$ і $Ly_{\text{кр}}$, а по ним – діапазон псевдозрідженого стану для частинок даного розміру:

$$K_{\text{макс}} = \sqrt[3]{Ly_{\text{вит}} / Ly_{\text{кр}}} \quad (2.12)$$

Рис. 2.4 може бути використаний для визначення $D_{\max} = f(Ly)$. Оскільки криві 1 і 2 можна розглядати стосовно до полідисперсної системи в якості залежностей $Ar_{кр} = f(Ly)$ та $Ar_{вит} = f(Ly)$, то величина D_{\max} , яка відповідає даному значенню Ly :

$$D_{\max} = (d_{\max} / d_{\min})_{пр} = \sqrt[3]{Ar_{кр} / Ar_{вит}} \quad (2.13)$$

2.3.4 Розмір частинок

Параметрами, які описують вичерпне геометрію шару з сферичних частинок однакового розміру, є діаметр частинок і щільність їх упаковки. Проте в промисловій практиці значно частіше доводиться мати справу із сумішами, складеними з частинок різного розміру. У цих випадках доводиться говорити про гранулометричний склад суміші, тобто про розподіл часток за розмірами. За даними ситового аналізу (визначення вагової частки фракції в суміші) або безпосереднього виміру великого числа частинок, гранулометричний склад суміші задається у формі таблиць або графіків. При цьому зазвичай аргументом є розмір часток, а функцією – ваговий відсоток частинок цього розміру.

Розрахункові формули базуються зазвичай на якомусь визначаючому розмірі часток, обчислюваному по гранулометричному складу суміші.

Якщо суміш сипкого матеріалу представляє собою вузьку фракцію, то визначальний розмір часток – їх еквівалентний діаметр d_e , рекомендується прийняти рівним середньому геометричному з розмірів комірок суміжних сит:

$$d_e = \sqrt{d_{\max} \cdot d_{\min}} \quad (2.14)$$

Зауважимо, що для вузької фракції середньгеометричний і середньоарифметичний визначальні розміри досить близькі.

У випадку досить широкої фракції рекомендується обчислювати визначальний розмір часток за формулою для середньгармонічної величини:

$$d_e = \frac{1}{\sum \frac{\Delta i}{d_i}} \quad (2.14')$$

де Δi – вагова частка в суміші частинок розміру d_i .

У практиці псевдозрідження найчастіше зустрічаються широкі фракції частинок довільної форми. В цьому випадку для визначення розрахункового значення d_e , широку фракцію розділяють на ряд вузьких (наприклад, шляхом розсіву). Після цього визначають розмір кожної вузької фракції d_i , а потім еквівалентний діаметр частинок d_e , за формулою (2.14'). Розмір d_i , в разі округлих частинок, цілком допустимо визначати за формулою (2.6). Для більш точної оцінки цієї величини, а також у разі, коли форма частинок значно відрізняється від сферичної, її визначають як діаметр кулі, за обсягом рівновеликої частки:

$$d_i = \sqrt[3]{6V_q / \pi} \quad (2.14')$$

де V_q - середньоарифметичне значення об'єму однієї частки в даній фракції [1].

2.3.5 Форма частинок

Ряд параметрів шару (наприклад, гідравлічний опір) залежить від форми і величини поверхні частинок. Величина поверхні сферичних частинок однозначно визначається по їх діаметру. Поверхня несферичної частинки завжди більше поверхні рівної за обсягом кулі. Для зазначення цієї відмінності вводиться поняття про фактор форми Φ_s , який представляє собою функцію відношення поверхонь рівновеликої кулі і частинки (S_0)

$$\Phi_s = \sqrt{\frac{\pi d^2}{S_0}} \quad (2.15)$$

Необхідно розрізняти геометричний фактор форми частинок, який визначається по рівнянню (2.15), і гідродинамічний фактор форми шару, який визначається за перепаду тиску, і слід сказати, що залежить від ступеня розширення шару [1].

2.3.6 Газорозподільні пристрої в апаратах з псевдозріджуючим шаром

Інтенсивність і стійкість процесів (тепло- і масообмін, хімічні перетворення), що здійснюються в апаратах з псевдозрідженим шаром, визначаються не тільки фізико-хімічними умовами, а й гідродинамічної обстановкою, яка в свою чергу залежить від ряду конструктивних чинників. Серед останніх найважливішу роль відіграють розподільники зріджуючого агенту по перетину апарату, часто є опорними пристроями для псевдозрідженого шару. Від конструкцій розподільників в значній мірі

залежать характер і розміри виникаючих каналів, газових пазирів і застійних зон в псевдозрідженому шарі, а значить і якість псевдозрідження.

Як відомо, формування псевдозрідженого шару і диспергування зріджуючого агенту відбуваються в зоні, безпосередньо примикаючій до розподільного пристрою (активна зона). Саме тут в основному завершуються процеси тепло- і масообміну, а в ряді випадків – і хімічні реакції, так що ефективність технологічного процесу в цілому багато в чому залежить від конструкції газорозподільного пристрою, що визначає гідродинамічну обстановку в активній зоні.

В апаратах з псевдозрідженим шаром застосовують різноманітні типи газорозподільних пристроїв, для правильного вибору та розрахунку яких необхідно враховувати як конструктивні особливості апарату (розміри, форма), так і технологічні характеристики процесу (температура, схильність частинок до агломерації, розмір часток, робоча швидкість газу, запиленість і забрудненість його сторонніми домішками) [1].

На рис. 2.5 наведені деякі конструкції решіток і розподільників.

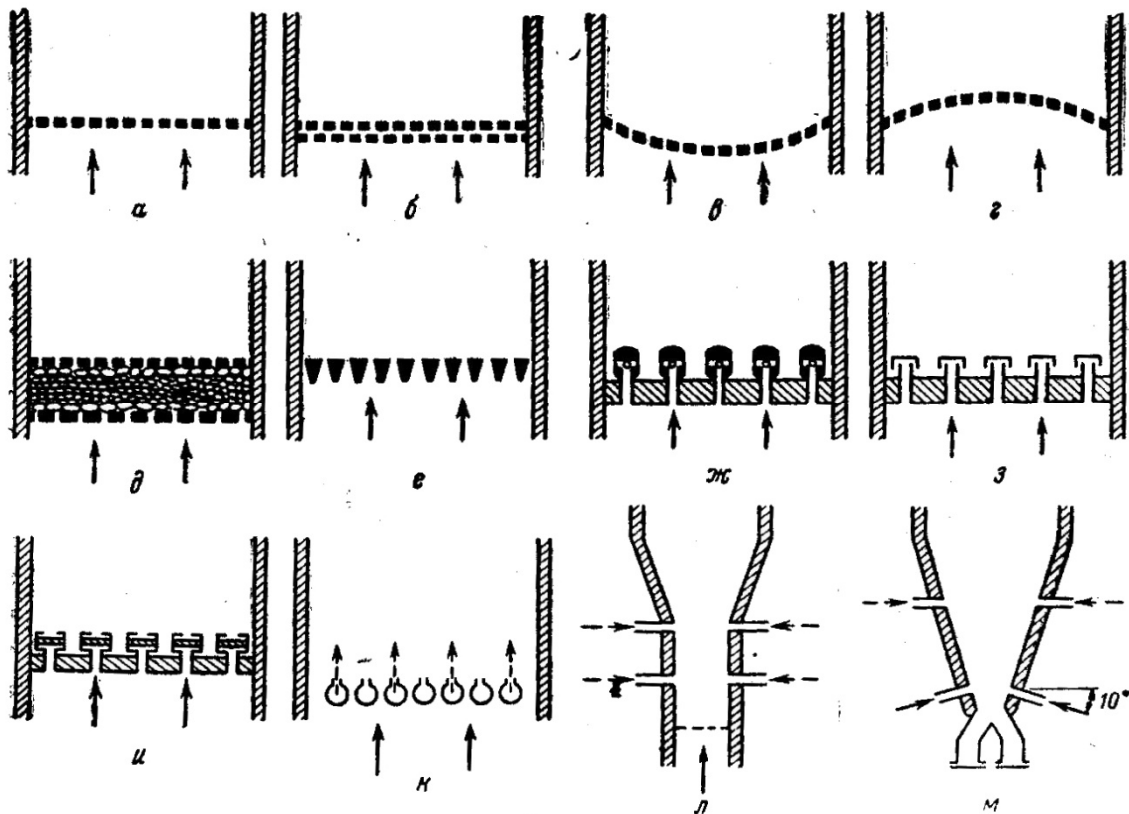


Рисунок 2.5 – Типи газорозподільних пристроїв:

а - одинарна перфорована пластина; б - те ж, спарена; в, г - те ж, увігнута або опукла; д - багат шарова нерухома засипка; е - колосникові ґрати; ж - сопла; з - ковпачки, и - багат шарові фільтри; к - трубчаста ґрати; л, м - безрешітчасті конструкції з бічними змішувальними соплами.

Тип *а* – плоска перфорована пластина або дротова сітка, зазвичай використовується на установках лабораторного типу; її недолік полягає в тому, що з припиненням подачі газу під решітку дрібні частинки провалюються через отвори. Цього можна уникнути, застосовуючи спарені перфоровані пластини (тип *б*), у яких отвори зрушені один щодо одного. Така газорозподільна решітка придатна для промислових установок, оскільки вона має переваги окремої пластини – простота розрахунку та конструктивного виконання, в поєднанні з хорошим газорозподілом.

В багатотоннажних процесах при великих діаметрах апаратів плоскі пластини неприйнятні, тому застосовуються склепінчасті газорозподільники типу *в* і *г*. Вони витримують великі навантаження і добре протистоять термічним впливам.

Проскакування пазирів і каналоутворення мають місце переважно в центральній осьовій області шару; протистояти цій тенденції допомагає конструкція типу *в*. Газорозподільник типу *г* може забезпечити гарне контактування тільки тоді, коли по периферії отвори будуть мати більші розміри, ніж у центральній частині, що викликає конструктивні ускладнення при виготовленні. Втім, для будь-якої перфорованої пластини поєднання вимог хорошого газорозподілу і низького опору обумовлює необхідність в ретельному розрахунку і нерівномірному за площею розташуванні отворів при виготовленні.

Коли потік бажано звільнити від твердих частинок, використовують щільний шар гранульованого матеріалу, укладений між двома перфорованими пластинами (тип *д*), який є хорошим розподільником, а крім того, чудовим термічним ізолятором підтримуючої решітки від гарячого шару. Більш того, така нерухома засипка може бути використана для змішування подаваних в шар газів.

Пристрій типу *е*, що складається з щілин між колосниками, має приблизно ті ж характеристики, що й плоска перфорована пластина, але трохи меншу рівномірність газорозподілу.

Сопла (тип *ж*) й ковпачки (тип *з*) застосовуються для запобігання провалу твердих частинок через решітки. Незважаючи на ускладненість конструкції, вони не забезпечують кращого газорозподілу в порівнянні з типами *б* і *д*, крім того, тверді частинки схильні втрачати свою рухливість і залежуватися на плоскій поверхні днища.

Багатошарові пластинчасті фільтри типу *и* забезпечують кращий розподіл газу в порівнянні з типами *ж* і *з*, однак, при їх застосуванні можуть знадобитися особливі заходи обережності, щоб уникнути забивання вхідних

отворів газорозподільників матеріалом фільтра. Розподільники такого типу з фільтрувальними пластинами діаметром 5,1 см були застосовані у виробництві фталевого ангідриду.

Іноді для поліпшення аеродинаміки потоку в псевдозрідженому шарі газ вводиться через сопла, розташовані в бокових стінках (тип *л*). Цей спосіб був використаний в печах для випалу гранульованої цинкової обманки.

У новому проекті газогенератора Вінклера газ вводиться в шар через шість бічних сопл типу *м*. Це дає істотну перевагу в порівнянні з механічними решітками оскільки останні призводять до високих експлуатаційних витрат.

Перераховані приклади ілюструють деякі з чисельних можливостей конструювання розподільників, але в кожному конкретному випадку тільки практика виносить остаточний вирок про придатність тієї чи іншої модифікації або комбінації різних типів газорозподілу [7].

2.4 Методи виготовлення елементів апаратів під тиском

Незалежно від наявності специфічних пристроїв переважна більшість технологічних посудин і апаратів мають такі типові елементи: корпус, днище (днища), накривку, штуцери, люки, опори, зварні й фланцеві з'єднання та деталі, виготовлені з труб.

Основним елементом будь-якого апарата (посудини) є корпус, який складається з однієї або кількох обичайок.

Виготовлення обичайок

Обичайка – це оболонка замкнутого профілю, відкрита з торців. Незважаючи на те, що в хімічному апаратобудуванні застосовують обичайки

не круглого поперечного перерізу (еліптичного, прямокутного, квадратного зі закругленими кутами та ін.), найбільшого поширення щодо міцності, жорсткості, уніфікації та матеріаломісткості набули циліндричні обичайки.

Циліндричні обичайки

Обичайка це деталь циліндричної форми з незаглушеними торцями. Поперечний переріз обичайки найчастіше представляє собою кільце, або в окремих випадках розтин може мати квадратну, трикутну, лекальну форму. Ми здійснюємо виробництво обичайок, як методом холодного вальцювання, так і з попереднім підігрівом матеріалу («нагорячо»). За індивідуальним замовленням ми готові зробити обичайки за допомогою лиття полуобичаек з їх наступним зварюванням.

Конічні обичайки

Конічна обичайка представляє собою деталь форми усіченого конуса з незаглушеними торцями. Поперечний переріз обичайки найчастіше представляє собою кільце, або в окремих випадках розтин може мати квадратну, трикутну, лекальну форму. Ми здійснюємо виробництво конічних обичайок методом холодного вальцювання, гарячої вальцювання, холодного штампування. За індивідуальним замовленням ми готові зробити обичайки за допомогою лиття полуобичаек з їх наступним зварюванням.

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].

Застосовується повітря при температурі 20 [°C] з 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 наведена схема моделі трубчатого реактора.

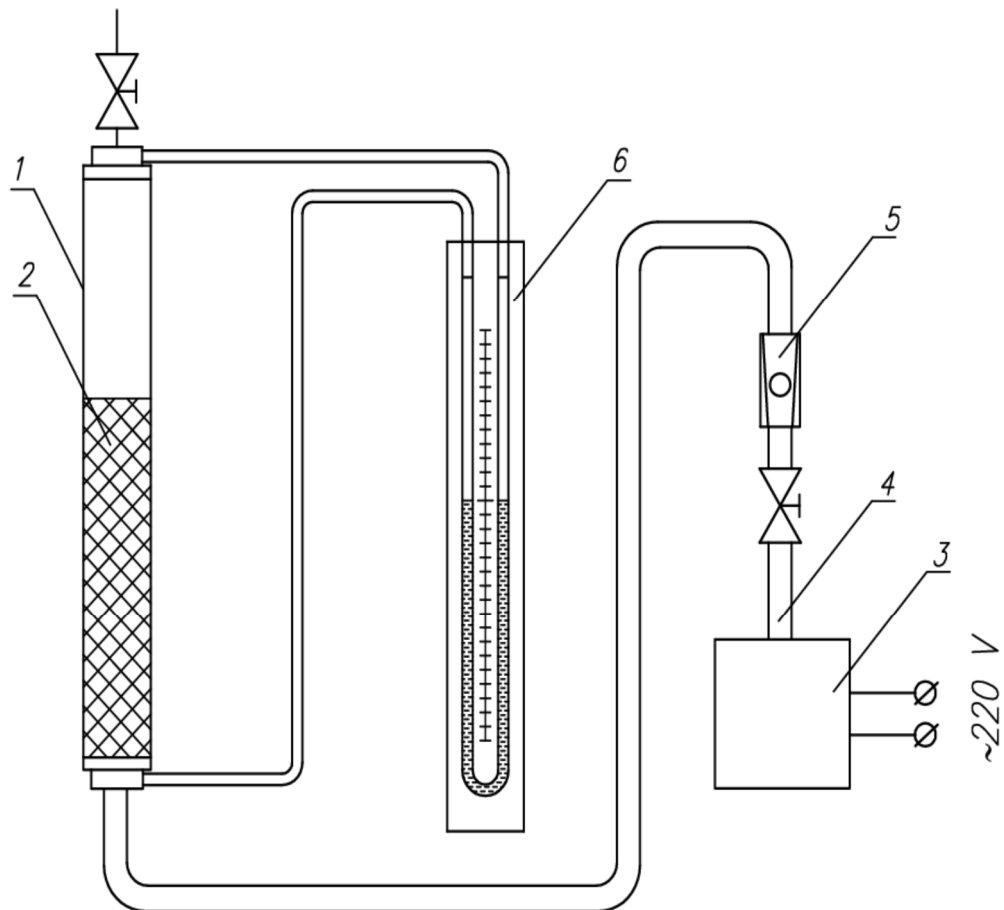


Рисунок 4.1 – Модель трубчатого реактора

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

Повітря забирається газодувкою (3), проходить через ротаметр (5), надходить у нижню частину реакторної колонки (1) і рухається вгору через сипкий матеріал (2), перепад тиску визначається водяним дифманометром (6).

Фотографії експериментальної установки представлені на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Фотографії експериментальної установки

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

5 ПЛАН И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ

Опис проведення експерименту

Витрату повітря змінювали в межах від -2 мм і до 78 мм за шкалою ротаметра. Градування ротаметра наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Шкала градування ротаметра

1	Шкала ротаметра	Скорість газу, м/с	Об'ємний расход, м ³ /с
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

Вентилем встановлювали витрату, що дорівнює приблизно однієї десятої діапазону змін. Для кожного значення витрат вимірювали значення

перепаду тиску за допомогою водяного дифманометра. Результати вимірювань записували в таблицю.

Експеримент проводили як при збільшенні витрати від мінімальної до максимальної, так і при зменшенні витрати від максимальної до мінімальної.

Максимальне значення витрати встановлювалося до початку виносу сипучого матеріалу з колонки.

Результати проведених експериментів заносять у таблицю.

6 ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Планування, проведення експериментальної частини роботи

Розрахунок необхідної кількості експериментів

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 їхній обсяг 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 повітрорудки – від 0 до 16 [діл. шк.].

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

Для заданого G^* і k у таблиці критерію Кохрена [8] 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

Були проведені 14 серій експериментів, вони наведені в таблиці [додаток А]. Всі експерименти зводяться в єдину таблицю, упорядковуються відповідно до збільшення витрати газу і розбиваються на інтервали за величиною витрати газу.

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.

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.

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 [8].

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).

Результати обробки даних за r критерієм надано у додатку В.

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.

$$T_1 = T_2 = 500 \text{ [°C];}$$

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

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

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 $S_{\text{Па}}$ – площа поперечного перерізу промислового апарату.

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

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

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].

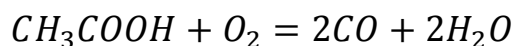
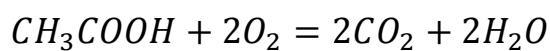
$$F_{\text{вхід}}^{\text{об}} = \frac{F_{\text{Па}}^{\text{мас}}}{\rho_{\text{вхід}}} = \frac{0.1546}{1.205} = 0.128 \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right].$$

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.

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 термокаталітичного 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 уведене 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) [11].

10.2 Опис технологічної схеми пілотної установки

На рис. 10.1 наведена технологічна схема пілотної установки із реактором окиснення органічних відходів

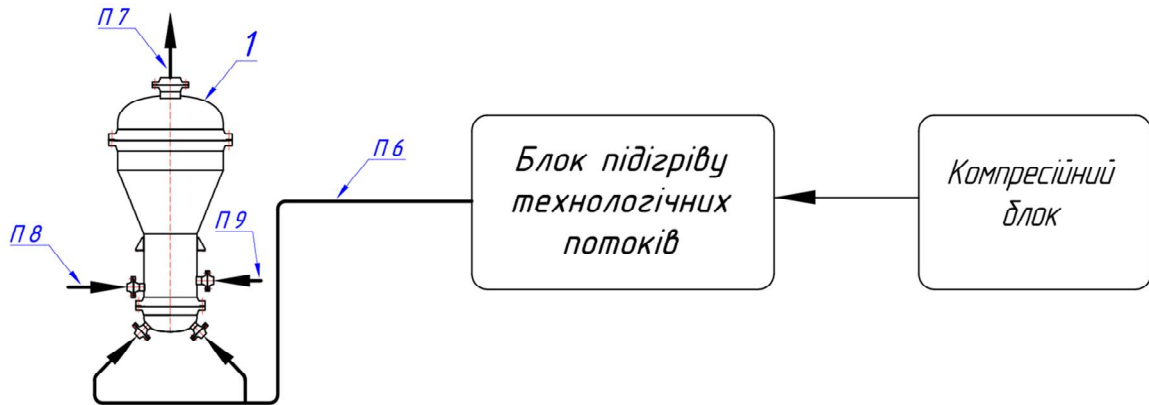


Рисунок 10.1 – Технологічна схема пілотної установки із реактором окиснення органічних відходів

Технологічні потоки схеми установки з реактором окиснення органічних відходів наведено у таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Технологічні потоки схеми

Технологічні потоки:		
П6	–	повітря з виходу підігрівача повітря на вхід реактора;
П7	–	вихід продукту з реактора;
П8	–	подача рідкого агента в реактор;
П9	–	подача каталізатора в реактор.

Попереднє стиснений до 1 [МПа] та нагрітий до температури початку реакції 430 [°C] газ подається до реактора (1). У реактор також подаються каталізатор та рідкий агент – водний розчин органічних відходів. Реакція глибокого окиснення відбувається у реакторі в режимі псевдозрідження.

11 РОЗРАХУНОК НА МІЦНІСТЬ, ЖОРСТКІСТЬ І СТІЙКІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ РЕАКТОРА

11.1 Розрахунок на міцність, жорсткість і стійкість

11.1.1 Визначення розрахункових параметрів

Приймаємо розрахункову температуру в апараті рівній робочій температурі:

$$t_{\text{раб}} = t = 500 \text{ }^\circ\text{C}.$$

11.1.2 Напруги, що допускаються

Матеріал для апарату - сталь 12Х18Н10Т:

$$[\sigma]_{20} = 184 \text{ МПа}; [\sigma]_{500} = 127 \text{ МПа};$$

11.1.3 Розрахунковий, робочий і пробний тиск в апараті

1. Тиск спрацьовування запобіжного клапана.

$$P_k = 1.15 \cdot P_{\text{раб}} \quad (11.1)$$

де $P_{\text{раб}}$ – робочий тиск;

$$P_k = 1,15 \cdot 1 = 1,15 \text{ МПа}$$

2. Розрахунковий тиск без урахування гідростатичного

$$P_p = 0,9 \cdot P_k \quad (11.2)$$

$$P_p = 0,9 \cdot 1,15 = 1,035 \text{ МПа}$$

3. Гідростатичний тиск середовища:

$$P_\Gamma = \rho_c \cdot g \cdot H_c \cdot 10^{-6}, \text{ МПа} \quad (11.3)$$

де ρ_c – густина середовища;

g – прискорення вільного падіння;

H_c – висота середовища в апараті;

$$H_c = 2,5 \text{ м}$$

$$P_\Gamma = \rho_c \cdot g \cdot H_c \cdot 10^{-6} = 1596 \cdot 9,81 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 0,039 \text{ МПа}$$

$$\text{Перевіряємо умову } P_\Gamma < 5\% P_{\text{раб}}, \quad P_\Gamma = 0,039 < P_{\text{раб}} = 0,05 \cdot 1 = 0,05 \text{ МПа}$$

Оскільки P_Γ складає менше 5% от $P_{\text{раб}}$, то в подальших розрахунках воно не враховується.

Приймаємо розрахунковий тиск $P = 1.035$ МПа

11.1.4 Гідростатичний тиск води в умовах випробування

Пробний тиск:

$$P_{пр} = 1,25 \cdot P \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \text{ МПа} \quad (11.4)$$

$$P_{пр} = 1,25 \cdot 1,035 \cdot \frac{184}{127} = 1,87 \text{ МПа}$$

Гідростатичний тиск води :

$$P_B = \rho_B \cdot g \cdot H_B = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0,0294 \text{ МПа.}$$

Перевіряємо умову $P_B > 0,05P_{пр}$. $P_B = 0,0294 < P_{пр} = 0,05 \cdot 1,87 = 0,0935$ МПа

Оскільки P_B складає менше 5% від $P_{пр}$, то в подальших розрахунках воно не враховується.

Розрахунковий тиск в умовах випробування:

$$P_B = P_{пр} = 1,87 \text{ МПа.}$$

Перевіряємо умову

$$P_B < 1,35 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \quad (11.5)$$

$$1,87 < 1,35 \cdot 1,035 \cdot (184/127) = 2,027 \text{ МПа}$$

Умова виконується, отже, немає необхідності надалі проводити розрахунок на міцність в умовах випробування.

11.1.5 Коефіцієнт міцності зварних швів, група апарату

При розрахунку на міцність зварних елементів посудин і апаратів в розрахункові формули слід вводити коефіцієнт міцності зварних з'єднань ϕ .

Для визначення коефіцієнта міцності зварних з'єднань необхідно встановити групу посудини залежно від розрахункового тиску, температури стінки і характеру робочого середовища. По [13] приймаю 2 групу посудини згідно середовищу в апараті.

Об'єм контролю зварних з'єднань посудин і їх елементів радіографічним методом або ультразвуковою дефектоскопією приймаю виходячи з групи посудини по [13] не менше 100%. Згідно величині об'єму

контролю зварних з'єднань визначаю коефіцієнт міцності зварного шва по [13] $\varphi = 1$.

11.1.6 Розрахунок товщини обичайки корпусу

11.1.6.1 Розрахунок товщини стінки обичайки для робочих умов

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - P}, \quad (11.6)$$

де P розрахунковий внутрішній надмірний тиск, МПа;

D – внутрішній діаметр обичайки, мм.

$$S_p = \frac{1,035 \cdot 400}{2 \cdot 127 \cdot 1 - 1,035} = 1,63 \text{ мм.}$$

11.1.6.2 Розрахунок товщини стінки обичайки в умовах випробування

$$S_p = \frac{P_B \cdot D}{2 \cdot [\sigma]_B \cdot \varphi - P_B}, \quad (11.7)$$

де P_B – тиск випробування, МПа;

D – внутрішній діаметр обичайки, мм.

$$S_p = \frac{1,87 \cdot 400}{2 \cdot 250,91 \cdot 1 - 1,87} = 1,5 \text{ мм.}$$

За розрахункову товщину стінки обечайки прийнята більша величина.

Добавку C_1 визначаємо, виходячи з максимально допустимої швидкості корозії $\pi = 0,1$ мм/рік, розрахункового терміну служби апарата $\tau = 20$ років і приймаючи добавку для компенсації ерозії рівною нулю

$$C_1 = \pi \cdot \tau + C_e \quad (11.8)$$

$$C_1 = 0,1 \cdot 20 + 0 = 2 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки обичайки без урахування добавки для компенсації мінусового допуску дорівнює

$$S \geq S_p + C_1 \quad (11.9)$$

$$S \geq 1,64 + 2 = 3,64 \text{ мм}$$

Виконавчу товщину стінки циліндричної обичайки визначаємо з урахуванням добавки на мінусовий допуск $C_2 = 0,4$ мм для листа товщиною 4 мм

$$S \geq S_p + C_1 + C_2 \quad (11.10)$$

$$S \geq 1,63 + 2 + 0,4 = 4,03 \text{ мм}$$

Приймаємо виконавчу товщину стінки обичайки рівною $S = 5$ мм. Перевіряємо необхідність урахування добавки для компенсації мінусового допуску сталевих листа товщиною 5 мм

$$C_2 = 0,4 > 0,05 \cdot S = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ мм} \quad (11.11)$$

$$C_2 = 0,4 > 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ мм}$$

Добавку враховуємо, тому що вона складає понад 5 % від товщини листа.

Сума добавок

$$C = C_1 + C_2 \quad (11.12)$$

$$C = 2 + 0,4 = 2,4 \text{ мм}$$

дорівнює попередньо прийнятій.

11.1.6.3 Розрахунок внутрішнього тиску, що допускається

Внутрішній тиск, що допускається, розраховую по формулі:

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S - C)}{D + (S - C)} \quad (11.13)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 127 \cdot 1 \cdot (5 - 2,4)}{400 + (5 - 2,4)} = 1,64 \text{ МПа}$$

Умова міцності $P < [P]$, $P = 1,035 < [P] = 1,64$ МПа виконується.

11.2 Розрахунок нижнього еліптичного днища

11.2.1 Розрахунок товщини днища

$$S_{2P} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot P} \quad (11.14)$$

$$S_{2P} = \frac{1,035 \cdot 400}{2 \cdot 127 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1,035} = 1,64 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки еліптичного днища:

$$S_2 \geq S_{2p} + C_1 \quad (11.15)$$

$$S_2 \geq 1,64 + 2 = 3,64 \text{ мм}$$

Виконавчу товщину стінки визначаємо з урахуванням добавки на мінусовий допуск

$$C_2 = 0,4 \text{ мм для листа товщиною 4 мм}$$

$$S \geq S_p + C_1 + C_2 \quad (11.16)$$

$$S \geq 1,64 + 2 + 0,4 = 4,04 \text{ мм}$$

Приймаємо виконавчу товщину стінки рівною $S = 5$ мм. Перевіряємо необхідність урахування добавки для компенсації мінусового допуску сталевого листа товщиною 6 мм

$$C_2 = 0,4 > 0,05 \cdot S = 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ мм} \quad (11.17)$$

$$C_2 = 0,4 > 0,05 \cdot 5 = 0,25 \text{ мм}$$

Добавку враховуємо, тому що вона складає понад 5 % від товщини листа.

Сума добавок

$$C = C_1 + C_2 \quad (11.18)$$

$$C = 2 + 0,4 = 2,4 \text{ мм}$$

дорівнює попередньо прийнятій.

11.2.2 Розрахунок внутрішнього тиску, що допускається

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S - C)}{D + (S - C)} \quad (11.19)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot (5 - 2,4) \cdot 1 \cdot 127}{400 + 0,5 \cdot (5 - 2,4)} = 1,64 \text{ МПа}$$

Умова міцності $P \leq [P]$ $P = 1,035 < [P] = 1,64 \text{ МПа}$ - виконується.

11.3 Розрахунок кінчного переходу

Приймаємо половину кута при вершині кінчного переходу рівною $\alpha = 22,5^\circ$. Розрахункову довжину перехідної частини з'єднання без тороїдального переходу визначаємо, приймаючи для попереднього розрахунку товщину стінки перехідної частини кінчного переходу:

$$\alpha_1 = 0,7 \sqrt{\frac{D}{\cos \alpha} (S_1 - C)} \quad (11.20)$$

$$\alpha_1 = 0,7 \sqrt{\frac{800}{\cos 22,5^\circ} (6 - 2,4)} = 39,08 \text{ мм}$$

Визначаємо розрахунковий діаметр гладкої конічної обичайки:

$$D_k = D - 1,4 \alpha_1 \cdot \sin \alpha \quad (11.21)$$

$$D_k = 800 - 1,4 \cdot 39,08 \cdot \sin 22,5^\circ = 779,05 \text{ мм}$$

Допустима напружиння по [12] матеріалу стінки конічної обичайки при розрахунковій температурі $t = 500^\circ \text{C}$ дорівнює:

$$[\sigma]_{500} = 127 \text{ МПа}$$

Розрахункова товщина стінки конічної обичайки:

$$S_{кр} = \frac{P \cdot D_k}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - P} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (11.22)$$

$$S_{кр} = \frac{1,035 \cdot 779,04}{2 \cdot 127 \cdot 1 - 1,035} \cdot \frac{1}{\cos 15^\circ} = 3,45 \text{ мм}$$

Виконавча товщина конічної обичайки:

$$S_k \geq S_{кр} + C_1 \quad (11.23)$$

$$S_k \geq 3,45 + 2,4 = 5,85 \text{ мм}$$

приймаємо рівною $S_k = 8 \text{ мм}$

Отримана в результаті розрахунку товщина стінки конічного переходу не збігається з попередньо прийнятою. А отже прийнята більша величина.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск:

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S_k - C)}{\frac{D_k}{\cos \alpha} + (S_k - C)} \quad (11.24)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 127 \cdot 1 \cdot (8 - 2,4)}{\frac{779,04}{\cos 22,5^\circ} + (8 - 2,4)} = 1,68 \text{ МПа}$$

Умова міцності $P \leq [P]$ $P = 1,035 < [P] = 1,68 \text{ МПа}$ - виконується.

Умови застосування формул:

$$\alpha = 22,5^\circ < 70^\circ$$

$$a_{1D} = \frac{D - (D_m + 2S_m)}{2 \cdot \sin \alpha} \quad (11.25)$$

$$a_{1D} = \frac{800 - (400 + 2 \cdot 8)}{2 \cdot \sin 22,5^\circ} = 741,3 > \alpha_1 = 38,22 \text{ мм},$$

виконуються.

Товщини стінок перехідних частин конічної S_1 і циліндричної S_2 обичайок розраховуємо методом послідовних наближень, попередньо прийнявши $S_1 = S_\kappa = 8 \text{ мм}$ і $S_2 = S_m = 5 \text{ мм}$.

Визначаємо коефіцієнт χ :

$$\chi = \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} \quad (11.26)$$

$$\chi = \frac{127}{127} = 1$$

Для визначення розрахункової товщини стінки перехідної частини циліндричної обичайки визначаємо значення коефіцієнтів β :

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{D}{S_2 - C}} \cdot \frac{\text{tg} \alpha}{1 + \sqrt{\frac{1 + \chi \left(\frac{S_1 - C}{S_2 - C}\right)^2}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \chi \cdot \frac{S_1 - C}{S_2 - C}}} - 0,25 \quad (11.27)$$

$$\beta = 0,4 \sqrt{\frac{800}{5 - 2,4}} \cdot \frac{\text{tg} 22,5^\circ}{1 + \sqrt{\frac{1 + 1 \cdot \left(\frac{8 - 2,4}{5 - 2,4}\right)^2}{2 \cdot \cos 22,5^\circ} \cdot 1 \cdot \frac{8 - 2,4}{5 - 2,4}}} - 0,25 = 0,566$$

$$\beta_1 = \max\{0,5; \beta\} = \max\{0,5; 0,566\} = 0,566$$

Розрахунковий коефіцієнт міцності зварних з'єднань при дії внутрішнього надлишкового тиску для з'єднання без тороїдального переходу по [12]:

$$\varphi_R = \sqrt{\varphi_T} = \sqrt{1} = 1$$

Визначаємо розрахункову товщину стінки перехідної частини циліндричної обичайки визначаємо:

$$S_{2p} = \frac{P \cdot D \cdot \beta_1}{2 \cdot [\sigma]_2 \cdot \varphi_R - P} \quad (11.28)$$

$$S_{2p} = \frac{1,035 \cdot 800 \cdot 0,566}{2 \cdot 127 \cdot 1 - 1,035} = 1,85 \text{ мм}$$

Визначаємо виконавчу товщину стінки перехідної частини циліндричної обичайки:

$$S_2 \geq S_{2p} + C \quad (11.29)$$

$$S_2 \geq 1,85 + 2,4 = 4,25 \text{ мм}$$

Приймаємо товщину стінки перехідної частини циліндричної обичайки рівною товщині стінки циліндричної обичайки $S_2 = 5 \text{ мм}$. Отримана в результаті розрахунку виконавча товщина стінки перехідної частини збігається з попередньо прийнятою.

Розраховуємо товщину стінки конічної перехідної частини невідбортованого переходу:

$$S_1 \geq \frac{S_1 - C}{S_2 - C} \cdot S_{2p} + C \quad (11.30)$$

$$S_1 \geq \frac{8 - 2,4}{5 - 2,4} \cdot 1,85 + 2,4 = 6,38 \text{ мм}$$

Приймаємо товщину стінки конічної перехідної частини невідбортованого переходу рівною

$$S_1 = S_k = 8 \text{ мм}.$$

Умова застосування формул

$$S_1 - C = 8 - 2,4 = 5,6 > S_2 - C = 5 - 2,4 = 2,6 \text{ мм}$$

виконується.

Визначаємо допустимий внутрішній надлишковий тиск за умови міцності конічної перехідної частини:

$$[P] = \frac{2[\sigma]_2 \cdot \varphi_p \cdot (S_2 - C)}{D \cdot \beta_1 + (S_2 - C)} \quad (11.31)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 127 \cdot 1 \cdot (5 - 2,4)}{800 \cdot 0,566 + (5 - 2,4)} = 1,45 \text{ МПа}$$

Умова міцності $P \leq [P]$ $P = 1,035 < [P] = 1,45 \text{ МПа}$ - виконується.

Умова застосування розрахункових формул

$$0,001 < \frac{S_1 \cdot \cos \alpha}{D} = \frac{8 \cdot \cos 22,5^\circ}{800} = 0,00924 < 0,05$$

виконується.

11.4 Розрахунок верхнього еліптичного днища

11.4.1 Розрахунок товщини днища

$$S_{2p} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5 \cdot P} \quad (11.32)$$

$$S_{2p} = \frac{1,035 \cdot 800}{2 \cdot 127 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1,035} = 3,27 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки еліптичного днища:

$$S_2 \geq S_{2p} + C_1 \quad (11.33)$$

$$S_2 \geq 3,27 + 2 = 5,27 \text{ мм}$$

Виконавчу товщину стінки циліндричної обичайки визначаємо з урахуванням добавки на мінусовий допуск $C_2 = 0,6$ мм для листа товщиною 8 мм

$$S \geq S_p + C_1 + C_2 \quad (11.34)$$

$$S \geq 3,27 + 2 + 0,6 = 5,87 \text{ мм}$$

Приймаємо виконавчу товщину стінки обичайки рівною $S = 8$ мм. Перевіряємо необхідність урахування добавки для компенсації мінусового допуску сталевих листа товщиною 8 мм

$$C_2 = 0,6 > 0,05 \cdot S = 0,05 \cdot 8 = 0,4 \text{ мм} \quad (11.35)$$

$$C_2 = 0,6 > 0,05 \cdot 8 = 0,4 \text{ мм}$$

Добавку враховуємо, тому що вона складає понад 5 % від товщини листа.

Сума добавок

$$C = C_1 + C_2 \quad (11.36)$$

$$C = 2 + 0,6 = 2,6 \text{ мм}$$

дорівнює попередньо прийнятій.

11.4.2 Розрахунок внутрішнього тиску, що допускається

$$[P] = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S-C)}{D+(S-C)} \quad (11.37)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot (8-2,6) \cdot 1 \cdot 127}{800+0,5 \cdot (8-2,6)} = 1,71 \text{ МПа}$$

Умова міцності $P \leq [P]$ $P = 1,035 < [P] = 1,71 \text{ МПа}$ - виконується.

11.5 Розрахунок фланцевого з'єднання апарату

11.5.1 Визначаємо розрахункові температури фланця і болтів

$$t_\phi = t = 500 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_\delta = 0,97 t = 0,97 \cdot 500 = 485 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По стандарту [10] при заданих розрахункових параметрах для фланців, виготовлених зі сталі марки 12X18H10T, в якості матеріалу болтів приймаємо сталь марки 10X17H13M3T.

Допустима напруження матеріалу болтів $[\sigma]_\delta$, МПа, при розрахунковій температурі $t_\delta = 485 \text{ }^\circ\text{C}$ визначаємо методом лінійної інтерполяції $[\sigma]_\delta = 128,5 \text{ МПа}$.

Допустиме напруження для сталі марки 12X18H10T при розрахунковій температурі $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ по стандарту [12] приймаємо рівним $[\sigma] = 127 \text{ МПа}$, при температурі $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ – $[\sigma]_{20} = 184 \text{ МПа}$.

Мінімальне значення межі текучості для сталі марки 12X18H10T при розрахунковій температурі $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ приймаємо рівним $R_{p0,2} = 170 \text{ МПа}$; при температурі $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ – $R_{p0,2}^{20} = 240 \text{ МПа}$. Мінімальне значення тимчасового опору при розрахунковій температурі $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ приймаємо рівним $R_m = 420 \text{ МПа}$, при температурі $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ – $R_m^{20} = 540 \text{ МПа}$.

На рис. 11.1 наведено фланцеве з'єднання.

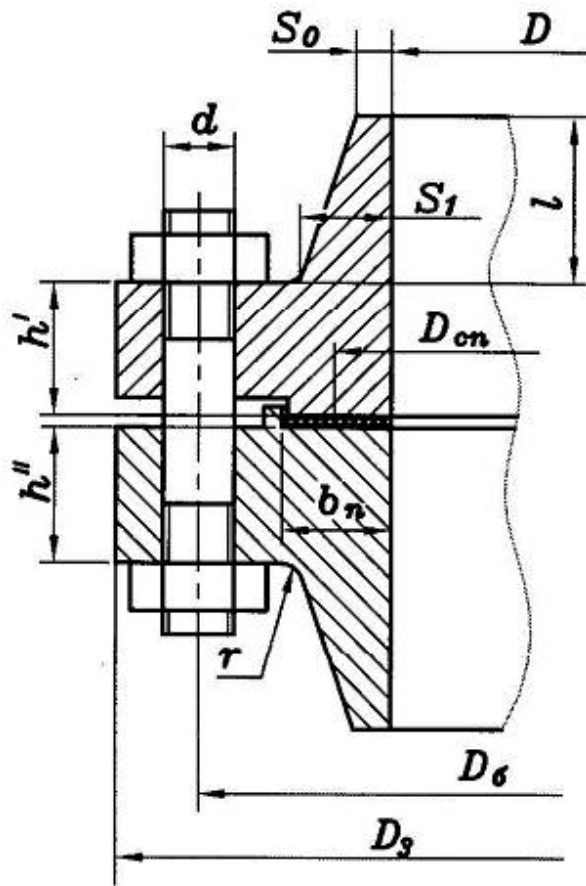


Рис 11.1 – Фланцеве з'єднання з приварними встик фланцями та ущільнювальною поверхнею типу „виступ-западина”

Визначаємо допустимі напруження для матеріалу приварних встик фланців в перерізі S_1 :

– в робочих умовах за формулою:

$$[\sigma]_{S1} = 1,5 [\sigma]; \quad (11.38)$$

$$[\sigma]_{S1} = 1,5 \cdot 127 = 190,5 \text{ МПа};$$

– в умовах затягування фланцевого з'єднання за формулою:

$$[\sigma]_{S1}^{20} = 1,5 [\sigma]^{20}; \quad (11.39)$$

$$[\sigma]_{S1}^{20} = 1,5 \cdot 184 = 276 \text{ МПа};$$

– в умовах випробування за формулою:

$$[\sigma]_{S1}^e = 2,0 [\sigma]^{20} \quad (11.40)$$

$$[\sigma]_{S1}^e = 2,0 \cdot 184 = 368 \text{ МПа.}$$

Визначаємо допустимі напруження для матеріалу приварних встик фланців в перерізі S_0 :

– в робочих умовах за формулою:

$$[\sigma]_{S0} = \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{p0,2}}{R_m} \right) \cdot [\sigma]; \quad (11.41)$$

$$[\sigma]_{S0} = \left(4,5 - 2,0 \cdot \frac{170}{420} \right) \cdot 127 = 468,69 \text{ МПа;}$$

– в умовах затягування фланцевого з'єднання за формулою:

$$[\sigma]_{S0}^{20} = \left(4,5 - 2,0 \frac{R_{p0,2}^{20}}{R_m^{20}} \right) \cdot [\sigma]^{20}; \quad (11.42)$$

$$[\sigma]_{S0}^{20} = \left(4,5 - 2,0 \cdot \frac{240}{540} \right) \cdot 184 = 664,4 \text{ МПа;}$$

– в умовах випробування за формулою:

$$[\sigma]_{S0}^e = \left(6,0 - 2,7 \frac{R_{p0,2}^{20}}{R_m^{20}} \right) \cdot [\sigma]^{20}, \quad (11.43)$$

$$[\sigma]_{S0}^e = \left(6,0 - 2,7 \cdot \frac{240}{540} \right) \cdot 184 = 883,2 \text{ МПа.}$$

Так як розрахунковий тиск P в робочих умовах, помножений на величину $1,35[\sigma]_{20}/[\sigma]$,

$$P_e = 1,87 < 1,35 P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 1,035 \cdot \frac{184}{127} = 2,024 \text{ МПа}$$

більше розрахункового P_e в умовах випробування, розрахунок фланцевого з'єднання для умов випробувань не проводимо [10].

11.5.2 Розрахунок допоміжних величин

Згідно з малюнком 8.1 виконавча ширина прокладки дорівнює $b_{n1} = 29$ мм, $b_{n2} = 38$ мм, середній діаметр прокладки – $D_{cn1} = 429$ мм, $D_{cn2} = 833$ мм

Ефективну ширину прокладки визначаємо за формулою:

$$b_0 = 0,25 b_n. \quad (11.44)$$

$$b_{01} = 0,25 \cdot 29 = 7,25 \text{ мм.}$$

$$b_{02} = 0,25 \cdot 38 = 9,5 \text{ мм.}$$

Відстань між фланцями δ визначаємо відповідно розмірам фланця по стандарту [10] і прокладки по стандарту [14], $\delta = 10$ мм

Відстань між опорними поверхнями гайок $l_{\delta 0}$ визначаємо за формулою:

$$l_{\delta 0} = 2 h + \delta \quad (11.45)$$

$$l_{\delta 01} = 2 h + \delta = 2 \cdot 35 + 10 = 80 \text{ мм.}$$

$$l_{\delta 02} = 2 h + \delta = 2 \cdot 45 + 10 = 100 \text{ мм.}$$

Розрахункову довжину болта визначаємо за формулою:

$$l_{\delta} = l_{\delta 0} + 0,56 d \quad (11.46)$$

$$l_{\delta 1} = 80 + 0,56 \cdot 23 = 92,9 \text{ мм.}$$

$$l_{\delta 2} = 100 + 0,56 \cdot 23 = 112,9 \text{ мм.}$$

Площа поперечного перерізу болта по внутрішньому діаметру різьби $f_{\delta} = 225 \text{ мм}^2$. Модуль поздовжньої пружності матеріалу гайок (сталь марки 10X17H13M3T) при температурі $t = 20^\circ \text{C}$ визначаємо по стандарту [12] $E_{\delta}^{20} = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Податливість болтів визначаємо за формулою:

$$y_{uu} = \frac{l_{\delta}}{E_{\delta}^{20} \cdot f_{\delta} \cdot n}, \quad (11.47)$$

$$y_{\delta 1} = \frac{92,9}{2 \cdot 10^5 \cdot 225 \cdot 20} = 10,322 \cdot 10^{-8} \text{ 1/Н} \cdot \text{мм.}$$

$$y_{\delta 2} = \frac{112,9}{2 \cdot 10^5 \cdot 225 \cdot 40} = 6,272 \cdot 10^{-8} \text{ 1/Н} \cdot \text{мм.}$$

Розміри конічної втулки у відповідності зі стандартом [10] складають:

– товщина в місці з'єднання з обичайкою

$$S_{01} = 6 \text{ мм};$$

$$S_{02} = 9 \text{ мм};$$

– товщина в місці з'єднання з фланцем

$$S_{11} = 18 \text{ мм};$$

$$S_{12} = 23 \text{ мм};$$

– довжина конічної втулки

$$l_1 = 35 \text{ мм.}$$

$$l_2 = 40 \text{ мм.}$$

Коефіцієнти β , X , K_1 визначаємо по формулам (11.48)–(11.50):

$$K_1 = 1 + (\beta - 1) \cdot \frac{X}{X + 0,25(1 + \beta)}. \quad (11.48)$$

$$\beta = S_1 / S_0, \quad (11.49)$$

$$\beta_1 = \frac{18}{6} = 3;$$

$$\beta_2 = \frac{23}{9} = 2,56;$$

$$X = l / \sqrt{D \cdot S_0}, \quad (11.50)$$

$$X_1 = \frac{35}{\sqrt{400 \cdot 6}} = 0,714;$$

$$X_2 = \frac{40}{\sqrt{800 \cdot 9}} = 0,471;$$

$$K_1 = 1 + (3 - 1) \cdot \frac{0,714}{0,714 + 0,25(1 + 3)} = 1,833.$$

$$K_2 = 1 + (2,56 - 1) \cdot \frac{0,471}{0,471 + 0,25(1 + 2,56)} = 1,54.$$

Еквівалентну товщину втулки приварного встик фланця визначаємо за формулою:

$$S_s = K_1 \cdot S_0, \quad (11.51)$$

$$S_{s1} = 1,833 \cdot 6 = 10,998 \text{ мм.}$$

$$S_{32} = 1,54 \cdot 9 = 13,86 \text{ мм.}$$

Значення коефіцієнтів j , ψ_1 , ψ_2 , λ , ω визначаємо за формулами (11.52)–(11.56):

$$j = h/S_0 . \quad (11.52)$$

$$j_1 = \frac{35}{6} = 5,83;$$

$$j_2 = \frac{40}{9} = 4,44;$$

$$\psi_1 = 1,28 \lg(D_n/D), \quad (11.53)$$

$$\psi_{11} = 1,28 \cdot \lg\left(\frac{535}{400}\right) = 0,162;$$

$$\psi_{12} = 1,28 \cdot \lg\left(\frac{945}{800}\right) = 0,093;$$

$$\psi_2 = \frac{D_n + D}{D_n - D} \quad (11.54)$$

$$\psi_{21} = \frac{535 + 400}{535 - 400} = 6,926;$$

$$\psi_{22} = \frac{945 + 800}{945 - 800} = 12,03;$$

$$\lambda = h/\sqrt{D \cdot S_0} . \quad (11.55)$$

$$\lambda_1 = \frac{35}{\sqrt{400 \cdot 6}} = 0,714;$$

$$\lambda_2 = \frac{40}{\sqrt{800 \cdot 9}} = 0,53;$$

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,9 \lambda \cdot (1 + \psi_1 \cdot j^2)} , \quad (11.56)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,714 \cdot (1 + 0,162 \cdot 5,83^2)} = 0,193.$$

$$\omega_2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,53 \cdot (1 + 0,093 \cdot 4,44^2)} = 0,333.$$

Модуль поздовжньої пружності для матеріалу фланця при температурі $t = 20^\circ\text{C}$ визначаємо по стандарту [12],

$$E^{20} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Кутову податливість фланця визначаємо за формулою:

$$y_{\phi} = \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9 \lambda)] \cdot \psi_2}{E^{20} \cdot h^3}, \quad (11.57)$$

$$y_{\phi 1} = \frac{[1 - 0,193 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,714)] \cdot 6,926}{2 \cdot 10^5 \cdot 35^3} = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ 1/H} \cdot \text{мм.}$$

$$y_{\phi 2} = \frac{[1 - 0,33 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,53)] \cdot 12,03}{2 \cdot 10^5 \cdot 45^3} = 3,38 \cdot 10^{-10} \text{ 1/H} \cdot \text{мм.}$$

Плечі моментів сил визначаємо за формулами (11.58) та (11.59):

$$b = 0,5 (D_{\bar{o}} - D_{cn}); \quad (11.58)$$

$$b_1 = 0,5 \cdot (495 - 429) = 33 \text{ мм};$$

$$b_2 = 0,5 \cdot (905 - 833) = 36 \text{ мм};$$

$$e = 0,5 (D_{cn} - D - S_s), \quad (11.59)$$

$$e_1 = 0,5 \cdot (429 - 400 - 10,998) = 9 \text{ мм.}$$

$$e_2 = 0,5 \cdot (833 - 800 - 13,86) = 9,57 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання з прокладкою становить $J = 1$.

11.5.3 Розрахунок навантажень, що діють у фланцевому з'єднанні

Рівнодіючу внутрішнього надлишкового тиску визначаємо за формулою:

$$Q_o = 0,785 D_{cn}^2 \cdot P, \quad (11.60)$$

$$Q_{o1} = 0,785 \cdot 429^2 \cdot 1,035 = 0,15 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

$$Q_{o2} = 0,785 \cdot 833^2 \cdot 1,035 = 0,56 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Реакцію прокладки в робочих умови обчислюємо за формулою (11.61), визначивши коефіцієнт питомого тиску на прокладку, $m = 2,5$:

$$R_n = \pi \cdot D_{cn} \cdot b_o \cdot m \cdot |P|, \quad (11.61)$$

$$R_{n1} = 3,14 \cdot 429 \cdot 7,25 \cdot 2,5 \cdot 1,035 = 2,52 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

$$R_{n2} = 3,14 \cdot 833 \cdot 9,5 \cdot 2,5 \cdot 1,035 = 6,43 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Коефіцієнти лінійного розширення матеріалу фланців і болтів визначаємо по [10]:

$$\alpha_{\phi} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C};$$

$$\alpha_{\delta} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}.$$

Модулі поздовжньої пружності матеріалів фланця і болта при розрахунковій температурі визначаємо за стандартом [12]:

$$E_{\phi} = 1,67 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$E_{\delta} = 1,67 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт η_l визначаємо за формулою:

$$\eta_l = y_n + y_{\delta} \cdot \frac{E_{\delta}^{20}}{E_{\delta}} + 2y_{\phi} \cdot \frac{E^{20}}{E} \cdot b^2. \quad (11.62)$$

$$\eta_{11} = 0 + 10,322 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2 \cdot 10^5}{1,67 \cdot 10^5} + 2 \cdot 5,5 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{2 \cdot 10^5}{1,67 \cdot 10^5} \cdot 33^2 = 1,56 \cdot 10^{-6}$$

$$\eta_{12} = 0 + 6,272 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{2 \cdot 10^5}{1,67 \cdot 10^5} + 2 \cdot 3,38 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{2 \cdot 10^5}{1,67 \cdot 10^5} \cdot 36^2 = 1,12 \cdot 10^{-6}$$

Навантаження Q_t , що виникає від температурних деформацій фланцевого з'єднання, визначаємо за формулою:

$$Q_t = \frac{1}{\eta_l} \cdot [2 \alpha_{\phi} \cdot h \cdot (t_{\phi} - 20) - \alpha_{\delta} \cdot l_{\delta 0} \cdot (t_{\delta} - 20)], \quad (11.63)$$

$$Q_{t1} = \frac{1}{1,56 \cdot 10^{-6}} \cdot (2 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 35 \cdot (500 - 20) - 18 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot (485 - 20)) = 1,38 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

$$Q_{t2} = \frac{1}{1,12 \cdot 10^{-6}} \cdot (2 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 45 \cdot (500 - 20) - 18 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot (485 - 20)) = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Болтове навантаження $P_{\delta 1}$ визначаємо за формулою (8.64), при цьому температурне навантаження не враховуємо, оскільки $Q_t > 0$:

$$P_{\delta 1} = J \cdot Q_{\delta} + R_n - Q_t. \quad (11.64)$$

$$P_{\delta 11} = 1 \cdot 0,15 \cdot 10^6 + 2,52 \cdot 10^4 - 0 = 0,175 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

$$P_{\delta 12} = 1 \cdot 0,56 \cdot 10^6 + 6,43 \cdot 10^4 - 0 = 0,624 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Болтове навантаження $P_{\delta 2}$, необхідну для початкового зминання прокладки, визначаємо за формулою (11.65), прийнявши по [10] питомий тиск обтиску прокладки $q_{обж} = 20$ МПа.

$$P_{\delta 2} = 0,5 \pi \cdot D_{cn} \cdot b_0 \cdot q_{обж}. \quad (11.65)$$

$$P_{\delta 21} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 429 \cdot 7,25 \cdot 20 = 0,977 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

$$P_{\delta 22} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 833 \cdot 9,5 \cdot 20 = 2,48 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Болтове навантаження $P_{\delta 3}$ з умови забезпечення міцності болтів визначаємо за формулою:

$$P_{\delta 3} = 0,4 [\sigma]_{\delta}^{20} \cdot n \cdot f_{\delta}, \quad (11.66)$$

$$P_{\delta 31} = 0,4 \cdot 184 \cdot 20 \cdot 225 = 0,331 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

$$P_{\delta 32} = 0,4 \cdot 184 \cdot 40 \cdot 225 = 0,662 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Болтове навантаження в умовах монтажу P_{δ} визначаємо за формулою:

$$P_{\delta} = \max \{ P_{\delta 1}; P_{\delta 2}; P_{\delta 3} \}, \quad (11.67)$$

$$P_{\delta 1} = \{ 0,175 \cdot 10^6; 0,977 \cdot 10^5; 0,331 \cdot 10^6 \} = 0,331 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

$$P_{\delta 2} = \{ 0,624 \cdot 10^6; 0,248 \cdot 10^6; 0,662 \cdot 10^6 \} = 0,662 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

11.5.4 Розрахунок болтів

Умова міцності болтів в умовах монтажу:

$$\sigma_{\delta 1} = \frac{P_{\delta}}{n \cdot f_{\delta}} \leq [\sigma]_{\delta}^{20}; \quad (11.68)$$

$$\sigma_{\delta 11} = \frac{0,331 \cdot 10^6}{20 \cdot 225} = 73,56 < [\sigma]_{\delta}^{20} = 184 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\delta 12} = \frac{0,662 \cdot 10^6}{40 \cdot 225} = 73,55 < [\sigma]_{\delta}^{20} = 184 \text{ МПа}$$

виконується.

Прирощення болтового навантаження ΔP_{δ} визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{\delta} = (1 - J) \cdot Q_d + Q_t. \quad (11.69)$$

$$\Delta P_{\delta 1} = (1 - 1) \cdot 0,15 \cdot 10^6 + 1,38 \cdot 10^4 = 1,38 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

$$\Delta P_{\delta 2} = (1-1) \cdot 0,56 \cdot 10^6 + 2,4 \cdot 10^5 = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Н.}$$

Умова міцності болтів в робочих умовах:

$$\sigma_{\delta 2} = \frac{P_{\delta 1} + \Delta P_{\delta}}{n \cdot f_{\delta}} \leq [\sigma]_{\delta}, \quad (11.70)$$

$$\sigma_{\delta 21} = \frac{0,331 \cdot 10^6 + 1,38 \cdot 10^4}{20 \cdot 225} = 76,62 \text{ МПа} < [\sigma]_{\delta} = 127 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\delta 22} = \frac{0,662 \cdot 10^6 + 2,4 \cdot 10^5}{40 \cdot 225} = 100,22 \text{ МПа} < [\sigma]_{\delta} = 127 \text{ МПа}$$

виконується.

11.5.5 Розрахунок фланця на міцність

Згинальний момент від болтового навантаження обчислюємо за формулою:

$$M_{01} = P_{\delta} \cdot b. \quad (11.71)$$

$$M_{011} = 0,331 \cdot 10^6 \cdot 33 = 1,092 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

$$M_{012} = 0,662 \cdot 10^6 \cdot 36 = 2,38 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

Кут повороту фланця при затягуванні з'єднання обчислюємо за формулою:

$$\Theta = M_{01} \cdot \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9) \cdot \lambda] \cdot \psi_2}{E^{20} \cdot h^3}, \quad (11.72)$$

$$\Theta_1 = 1,092 \cdot 10^7 \cdot \frac{[1 - 0,193 \cdot (1 + 0,9) \cdot 0,714] \cdot 6,926}{2 \cdot 10^5 \cdot 35^3} = 6,51 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$$

$$\Theta_2 = 2,38 \cdot 10^7 \cdot \frac{[1 - 0,33 \cdot (1 + 0,9) \cdot 0,53] \cdot 12,03}{2 \cdot 10^5 \cdot 45^3} = 10,49 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$$

Прирощення згинального моменту від болтового навантаження ΔM_{01} визначаємо за формулою:

$$\Delta M_{01} = \Delta P_{\delta} \cdot b + Q_{\delta} \cdot e. \quad (11.73)$$

$$\Delta M_{011} = 1,38 \cdot 10^4 \cdot 33 + 0,15 \cdot 10^6 \cdot 9 = 1,81 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

$$\Delta M_{012} = 2,4 \cdot 10^5 \cdot 36 + 0,56 \cdot 10^6 \cdot 9,57 = 14 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм.}$$

Прирощення кута повороту фланця в робочих умовах обчислюємо за формулою:

$$\Delta\Theta = \Delta M_{01} \cdot \frac{[1 - \omega \cdot (1 + 0,9) \cdot \lambda] \cdot \psi_2}{E \cdot h^3}, \quad (11.74)$$

$$\Delta\Theta_1 = 1,81 \cdot 10^6 \cdot \frac{[1 - 0,193 \cdot (1 + 0,9) \cdot 0,714] \cdot 6,926}{1,67 \cdot 10^5 \cdot 35^3} = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

$$\Delta\Theta_2 = 14 \cdot 10^6 \cdot \frac{[1 - 0,333 \cdot (1 + 0,9) \cdot 0,53] \cdot 12,03}{1,67 \cdot 10^5 \cdot 45^3} = 7,36 \cdot 10^{-3} \text{ рад.}$$

Коефіцієнт f визначаємо по [10] при $\beta_1 = S_{11}/S_{01} = 18/3 = 3$,
 $\beta_2 = S_{12}/S_{02} = 23/9 = 2,56$ та $l_1/\sqrt{D_1 \cdot S_{01}} = 35/\sqrt{400 \cdot 6} = 0,715$,
 $l_2/\sqrt{D_2 \cdot S_{02}} = 45/\sqrt{800 \cdot 9} = 0,53$ $f_1 = 1,75$, $f_2 = 1,7$

Розрахунковий діаметр D^* визначаємо за формулою:

$$D^* = D + S_1 \quad (11.75)$$

$$D_1^* = 400 + 18 = 418 \text{ мм.}$$

$$D_2^* = 800 + 23 = 823 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт T визначаємо за формулою:

$$T = \frac{\left(\frac{D_H}{D}\right)^2 \cdot [1 + 8,55 \lg(D_H/D)] - 1}{\left[1,05 + 1,945 \left(\frac{D_H}{D}\right)^2\right] \cdot \left[\left(\frac{D_H}{D}\right) - 1\right]}. \quad (11.76)$$

$$T_1 = \frac{\left(\frac{429}{400}\right)^2 \cdot [1 + 8,55 \cdot \lg\left(\frac{429}{400}\right)] - 1}{\left[1,05 + 1,945 \cdot \left(\frac{429}{400}\right)^2\right] \cdot \left[\left(\frac{429}{400}\right) - 1\right]} = 1,89.$$

$$T_2 = \frac{\left(\frac{833}{800}\right)^2 \cdot [1 + 8,55 \cdot \lg\left(\frac{833}{800}\right)] - 1}{\left[1,05 + 1,945 \cdot \left(\frac{833}{800}\right)^2\right] \cdot \left[\left(\frac{833}{800}\right) - 1\right]} = 1,9.$$

Максимальне напруження згинання σ'_u в перетині товщиною S_1 визначаємо за формулою:

$$\sigma'_u = \frac{T \cdot \omega \cdot M_{01}}{D^* \cdot (S_1 - C_1)^2}, \quad (11.77)$$

$$\sigma'_{u1} = \frac{1,89 \cdot 0,193 \cdot 1,81 \cdot 10^6}{418 \cdot (18 - 2)^2} = 6,17 \text{ МПа.}$$

$$\sigma'_{u2} = \frac{1,9 \cdot 0,333 \cdot 14 \cdot 10^6}{823 \cdot (23 - 2)^2} = 24,4 \text{ МПа.}$$

Меридіональні напруги в перетині S_1 конічної втулки фланця при зтягуванні фланцевого з'єднання складають:

– на зовнішній поверхні втулки

$$\sigma_{111} = \sigma'_{u1} = 6,17 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{112} = \sigma'_{u2} = 24,4 \text{ МПа;}$$

– на внутрішній поверхні втулки

$$\sigma_{121} = -\sigma'_{u2} = -6,17 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{122} = -\sigma'_{u2} = -24,4 \text{ МПа.}$$

Меридіональні напруги в перетині S_0 конічної втулки фланця при зтягуванні фланцевого з'єднання складають:

– на зовнішній поверхні втулки

$$\sigma_{211} = f \cdot \sigma'_{u1} = 1,75 \cdot 6,17 = 10,8 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{212} = f \cdot \sigma'_{u2} = 1,7 \cdot 24,4 = 41,5 \text{ МПа;}$$

– на внутрішній поверхні втулки

$$\sigma_{221} = -f \cdot \sigma'_{u1} = -1,75 \cdot 6,17 = -10,8 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{222} = -f \cdot \sigma'_{u2} = -1,7 \cdot 24,4 = -41,5 \text{ МПа.}$$

Прирошення напруги, що виникає в меридіональному напрямку в перерізі S_7 конічної втулки фланця від дії зовнішніх навантажень в робочих умовах визначаємо

за формулою:

$$\Delta\sigma'_m = \frac{Q_0 + 4M/D_{cn} + F}{\pi \cdot D \cdot (S_1 - C)}; \quad (11.78)$$

$$\Delta\sigma'_{m1} = \frac{0,15 \cdot 10^6 + 4 \cdot 0/429 + 0}{3,14 \cdot 400 \cdot (18 - 2)} = 7,46 \text{ МПа.}$$

$$\Delta\sigma'_{m2} = \frac{0,56 \cdot 10^6 + 4 \cdot 0/833 + 0}{3,14 \cdot 800 \cdot (23 - 2)} = 10,62 \text{ МПа.}$$

Прирощення напруги, що виникає в меридіональному напрямку в перерізі конічної втулки товщиною S_1 від зміни згинального моменту в робочих умовах, визначаємо за формулами:

$$\Delta\sigma'_u = \frac{T \cdot \omega \cdot \Delta M_{01}}{D^* \cdot (S_1 - C)^2}. \quad (11.79)$$

$$\Delta\sigma'_{u1} = \frac{1,89 \cdot 0,193 \cdot 1,81 \cdot 10^6}{418 \cdot (18 - 2)^2} = 6,17 \text{ МПа.}$$

$$\Delta\sigma'_{u2} = \frac{1,9 \cdot 0,333 \cdot 14 \cdot 10^6}{823 \cdot (23 - 2)^2} = 24,4 \text{ МПа.}$$

Прирощення меридіональних напружень в робочих умовах в перерізі S_1 конічної втулки фланця складають:

– на зовнішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{11} = \Delta\sigma'_m + \Delta\sigma'_u; \quad (11.81)$$

$$\Delta\sigma_{111} = 7,46 + 6,17 = 13,63 \text{ МПа;}$$

$$\Delta\sigma_{112} = 10,6 + 24,4 = 35 \text{ МПа;}$$

– на внутрішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{12} = \Delta\sigma'_m - \Delta\sigma'_u, \quad (11.82)$$

$$\Delta\sigma_{121} = 7,46 - 6,17 = 1,29 \text{ МПа.}$$

$$\Delta\sigma_{122} = 10,6 - 24,4 = -13,8 \text{ МПа.}$$

Прирощення напруги, що виникає в меридіональному напрямку в перерізі S_0 конічної втулки фланця від дії зовнішніх навантажень в робочих умовах, визначаємо за формулою:

$$\Delta\sigma''_m = \frac{Q_d + 4M/D_{cn} + F}{\pi \cdot D \cdot (S_0 - C)}. \quad (11.83)$$

$$\Delta\sigma''_{m1} = \frac{0,15 \cdot 10^6 + 4 \cdot 0/429 + 0}{3,14 \cdot 400 \cdot (6 - 2)} = 29,86 \text{ МПа.}$$

$$\Delta\sigma''_{m2} = \frac{0,56 \cdot 10^6 + 4 \cdot 0/833 + 0}{3,14 \cdot 800 \cdot (9 - 2)} = 31,84 \text{ МПа.}$$

Прирошення меридіональних напружень в робочих умовах в перерізі S_0 конічної втулки фланця визначаємо:

– на зовнішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{21} = \Delta\sigma''_m + f \cdot \Delta\sigma'_u; \quad (11.84)$$

$$\Delta\sigma_{211} = 29,86 + 1,75 \cdot 6,17 = 40,66 \text{ МПа;}$$

$$\Delta\sigma_{212} = 31,84 + 1,7 \cdot 24,4 = 73,32 \text{ МПа;}$$

– на внутрішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{22} = \Delta\sigma''_m - f \cdot \Delta\sigma'_u, \quad (11.85)$$

$$\Delta\sigma_{221} = 29,86 - 1,75 \cdot 6,17 = 19,06 \text{ МПа.}$$

$$\Delta\sigma_{222} = 31,84 - 1,7 \cdot 24,4 = -9,64 \text{ МПа.}$$

Окружні напруження в перетині S_1 конічної втулки фланця при з'ягуванні з'єднання визначаємо:

– на зовнішній поверхні втулки за формулою:

$$\sigma_{13} = \frac{E^{20} \cdot h \cdot \Theta}{D} + 0,3 \sigma'_u; \quad (11.86)$$

$$\sigma_{131} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 35 \cdot 6,51 \cdot 10^{-3}}{400} + 0,3 \cdot 6,17 = 133,8 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{132} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 45 \cdot 10,49 \cdot 10^{-3}}{800} + 0,3 \cdot 24,4 = 125,32 \text{ МПа;}$$

– на внутрішній поверхні втулки за формулою:

$$\sigma_{14} = \frac{E^{20} \cdot h \cdot \Theta}{D} - 0,3 \sigma'_u. \quad (11.87)$$

$$\sigma_{141} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 35 \cdot 6,51 \cdot 10^{-3}}{400} - 0,3 \cdot 6,17 = 130,1 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{142} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 45 \cdot 10,49 \cdot 10^{-3}}{800} - 0,3 \cdot 24,4 = 110,68 \text{ МПа.}$$

Окружні напруження в перетині S_0 конічної втулки фланця при зтягуванні з'єднання визначаємо:

– на зовнішній поверхні втулки за формулою:

$$\sigma_{23} = 0,3 f \cdot \sigma'_u; \quad (11.88)$$

$$\sigma_{231} = 0,3 \cdot 1,75 \cdot 6,17 = 3,24 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{232} = 0,3 \cdot 1,7 \cdot 24,4 = 12,44 \text{ МПа},$$

– на внутрішній поверхні втулки за формулою:

$$\sigma_{24} = -0,3 f \cdot \sigma'_u. \quad (11.89)$$

$$\sigma_{241} = -0,3 \cdot 1,75 \cdot 6,17 = -3,24 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_{242} = -0,3 \cdot 1,7 \cdot 24,4 = -12,44 \text{ МПа}.$$

Прирошення окружних напружень в перерізі S_1 конічної втулки фланця в робочих умовах визначаємо:

– на зовнішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{13} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\Theta}{D} + \frac{P \cdot D}{D_u - D} + 0,3 \Delta\sigma'_u; \quad (11.90)$$

$$\Delta\sigma_{131} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 35 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}}{400} + \frac{1,035 \cdot 400}{429 - 400} + 0,3 \cdot 6,17 = 38,88 \text{ МПа},$$

$$\Delta\sigma_{132} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 45 \cdot 7,36 \cdot 10^{-3}}{800} + \frac{1,035 \cdot 800}{833 - 800} + 0,3 \cdot 24,4 = 115,22 \text{ МПа};$$

– внутрішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{14} = \frac{E \cdot h \cdot \Delta\Theta}{D} + \frac{P \cdot D}{D_u - D} - 0,3 \Delta\sigma'_u. \quad (11.91)$$

$$\Delta\sigma_{141} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 35 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3}}{400} + \frac{1,035 \cdot 400}{429 - 400} - 0,3 \cdot 6,17 = 35,18 \text{ МПа}.$$

$$\Delta\sigma_{142} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 45 \cdot 7,36 \cdot 10^{-3}}{800} + \frac{1,035 \cdot 800}{833 - 800} - 0,3 \cdot 24,4 = 100,58 \text{ МПа}.$$

Прирошення окружних напружень в перерізі S_0 конічної втулки фланця в робочих умовах обчислюємо:

– на зовнішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{23} = \frac{P \cdot D}{2(S_0 - C)} + 0,3 f \cdot \Delta\sigma'_u; \quad (11.92)$$

$$\Delta\sigma_{231} = \frac{1,035 \cdot 400}{2 \cdot (6 - 2)} + 0,3 \cdot 6,17 = 53,621 \text{ МПа},$$

$$\Delta\sigma_{232} = \frac{1,035 \cdot 800}{2 \cdot (9 - 2)} + 0,3 \cdot 24,4 = 66,46 \text{ МПа},$$

– внутрішній поверхні втулки за формулою:

$$\Delta\sigma_{24} = \frac{P \cdot D}{2(S_0 - C)} - 0,3 f \cdot \Delta\sigma'_u. \quad (11.93)$$

$$\Delta\sigma_{241} = \frac{1,035 \cdot 400}{2(6 - 2)} - 0,3 \cdot 6,17 = 49,88 \text{ МПа}.$$

$$\Delta\sigma_{242} = \frac{1,035 \cdot 800}{2(9 - 2)} - 0,3 \cdot 24,4 = 51,8 \text{ МПа}.$$

Меридіональні і окружні напруження в перетині S_1 конічної втулки фланця в робочих умовах за формулами (11.94)–(11.97) складають:

$$[\sigma]_{11}^p = \sigma_{11} + \Delta\sigma_{11}; \quad (11.94)$$

$$[\sigma]_{111}^p = 6,17 + 13,63 = 19,8 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{112}^p = 24,4 + 35 = 59,4 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{12}^p = \sigma_{12} + \Delta\sigma_{12}; \quad (11.95)$$

$$[\sigma]_{121}^p = -6,17 + 1,29 = -4,88 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{122}^p = -24,4 + (-13,8) = -38,2 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{13}^p = \sigma_{13} + \Delta\sigma_{13}; \quad (11.96)$$

$$[\sigma]_{131}^p = 133,8 + 38,88 = 172,68 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{132}^p = 125,32 + 115,22 = 240,54 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{14}^p = \sigma_{14} + \Delta\sigma_{14}. \quad (11.97)$$

$$[\sigma]_{141}^p = 13,01 + 35,18 = 48,19 \text{ МПа}.$$

$$[\sigma]_{142}^p = 110,68 + 100,58 = 211,26 \text{ МПа}.$$

Умови статичної міцності фланця в перерізі S_1 , що визначаються:

– при затягуванні з'єднання за формулою:

$$\sigma_{S1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{11} \cdot \sigma_{13}}}{\sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{14}^2 - \sigma_{12} \cdot \sigma_{14}}} \right\} \leq [\sigma]_{S1}^{20}; \quad (11.98)$$

$$\sigma_{S11} = \max \left\{ \frac{\sqrt{6,17^2 + 133,8^2 - 6,17 \cdot 133,8}}{\sqrt{(-6,17)^2 + 13,01^2 - (-6,17) \cdot (13,01)}} \right\} = 130,8 \text{ МПа} < [\sigma]_{S1}^{20} = 276 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{S12} = \max \left\{ \frac{\sqrt{24,4^2 + 125,32^2 - 24,4 \cdot 125,32}}{\sqrt{(-24,4)^2 + 110,68^2 - (-24,4) \cdot (110,68)}} \right\} = 124,68 \text{ МПа} < [\sigma]_{S1}^{20} = 276 \text{ МПа}$$

– в робочих умовах за формулою:

$$\sigma_{S1} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(\sigma_{11}^p)^2 + (\sigma_{13}^p)^2 - \sigma_{11}^p \cdot \sigma_{13}^p}}{\sqrt{(\sigma_{12}^p)^2 + (\sigma_{14}^p)^2 - \sigma_{12}^p \cdot \sigma_{14}^p}} \right\} \leq [\sigma]_{S1}, \quad (11.99)$$

$$\sigma_{S11} = \max \left\{ \frac{\sqrt{19,8^2 + 172,68^2 - 19,8 \cdot 172,68}}{\sqrt{(-4,88)^2 + (48,19)^2 - (-4,88) \cdot (48,19)}} \right\} = 163,3 \text{ МПа} < [\sigma]_{S1}^6 = 368 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{S12} = \max \left\{ \frac{\sqrt{59,4^2 + 240,54^2 - 59,4 \cdot 240,26}}{\sqrt{(-38,2)^2 + (211,26)^2 - (-38,2) \cdot (211,26)}} \right\} = 232,7 \text{ МПа} < [\sigma]_{S1}^6 = 368 \text{ МПа}$$

виконуються.

Меридіональні і окружні напруження в перетині товщиною S_0 конічної втулки фланця в робочих умовах визначаємо за формулами (11.100)–(11.103):

$$[\sigma]_{21}^p = \sigma_{21} + \Delta\sigma_{21}; \quad (11.100)$$

$$[\sigma]_{211}^p = 6,17 + 40,66 = 46,83 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{212}^p = 24,4 + 73,32 = 97,72 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{22}^p = \sigma_{22} + \Delta\sigma_{22}; \quad (11.101)$$

$$[\sigma]_{221}^p = -10,8 + 19,06 = 8,26 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{222}^p = -41,5 + (-9,64) = -51,14 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{23}^p = \sigma_{23} + \Delta\sigma_{23}; \quad (11.102)$$

$$[\sigma]_{231}^p = 3,24 + 53,621 = 56,861 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{232}^p = 12,44 + 66,4 = 78,84 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{24}^p = \sigma_{24} + \Delta\sigma_{24}. \quad (11.103)$$

$$[\sigma]_{241}^p = -3,24 + 49,88 = 46,64 \text{ МПа};$$

$$[\sigma]_{242}^p = -12,44 + 51,8 = 39,36 \text{ МПа}.$$

Умови статичної міцності приварних встик фланців в перерізі s_0 :

– при затягуванні з'єднання:

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{\sigma_{21}^2 + \sigma_{23}^2 - \sigma_{21} \cdot \sigma_{23}}}{\sqrt{\sigma_{22}^2 + \sigma_{24}^2 - \sigma_{22} \cdot \sigma_{24}}} \right\} \leq [\sigma]_{s0}^{20}; \quad (11.104)$$

$$\sigma_{s01} = \max \left\{ \frac{\sqrt{6,17^2 + 3,24^2 - 6,17 \cdot 3,24}}{\sqrt{(-6,17)^2 + (-3,24)^2 - (-6,17) \cdot (-3,24)}} \right\} = 5,34 \text{ МПа} < [\sigma]_{s0}^{20} = 276 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{s02} = \max \left\{ \frac{\sqrt{24,4^2 + 12,44^2 - 24,4 \cdot 12,44}}{\sqrt{(-24,4)^2 + (-12,44)^2 - (-24,4) \cdot (-12,44)}} \right\} = 21,13 \text{ МПа} < [\sigma]_{s0}^{20} = 276 \text{ МПа}$$

– в робочих умовах:

$$\sigma_{s0} = \max \left\{ \frac{\sqrt{(\sigma_{21}^p)^2 + (\sigma_{23}^p)^2 - \sigma_{21}^p \cdot \sigma_{23}^p}}{\sqrt{(\sigma_{22}^p)^2 + (\sigma_{24}^p)^2 - \sigma_{22}^p \cdot \sigma_{24}^p}} \right\} \leq [\sigma]_{s0}, \quad (11.105)$$

$$\sigma_{s01} = \max \left\{ \frac{\sqrt{46,83^2 + 56,861^2 - 46,83 \cdot 56,861}}{\sqrt{(8,26)^2 + 46,64^2 - (8,26) \cdot 46,64}} \right\} = 52,6 \text{ МПа} \leq [\sigma]_{s0} = 190 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{s02} = \max \left\{ \frac{\sqrt{97,72^2 + 78,84^2 - 97,72 \cdot 78,84}}{\sqrt{(-51,14)^2 + 39,36^2 - (-51,14) \cdot 39,36}} \right\} = 84,7 \text{ МПа} \leq [\sigma]_{s0} = 190 \text{ МПа}$$

виконуються.

Допустимий кут повороту по [10] для приварних встик фланців в робочих умовах при діаметрі $D \leq 2000 \text{ мм}$ становить $[\Theta] = 0,009 \text{ рад}$.

Умова жорсткості фланцевого з'єднання:

$$\Theta + \Delta\Theta \leq [\Theta], \quad (11.106)$$

$$\Theta_1 + \Delta\Theta_1 = 6,51 \cdot 10^{-3} + 1,29 \cdot 10^{-3} = 7,8 \cdot 10^{-3} < [\Theta] = 0,009 \text{ рад}$$

$$\Theta_2 + \Delta\Theta_2 = 7,57 \cdot 10^{-3} + 1,39 \cdot 10^{-3} = 8,9 \cdot 10^{-3} < [\Theta] = 0,009 \text{ рад}$$

виконується.

11.5.6 Розрахунок фланцевого з'єднання на малоциклічну втому

По [10], при відношенні $r/S_1 = 7/15 = 0,467$ визначаємо коефіцієнт $a_\sigma = 1,5$.

Головні напруження для фланців приварних встик визначаємо за формулами (11.107)–(11.110):

$$\sigma_1 = \alpha_\sigma \cdot \sigma_{11}; \quad (11.107)$$

$$\sigma_{11} = 1,5 \cdot 6,17 = 9,22 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{12} = 1,5 \cdot 24,4 = 36,6 \text{ МПа};$$

$$\sigma_2 = \max \{ |\sigma_{21}|; |\sigma_{23}|; |\sigma_{21} - \sigma_{23}| \}; \quad (11.108)$$

$$\sigma_{21} = \max \{ |10,8|; |3,24|; |7,56| \} = 10,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{22} = \max \{ |41,5|; |12,44|; |29,06| \} = 41,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_3 = \max \{ |\sigma_{32}|; |\sigma_{34}|; |\sigma_{32} - \sigma_{34}| \}, \quad (11.109)$$

$$\sigma_{31} = 41,5 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{32} = 41,5 \text{ МПа.}$$

Розрахункову амплітуду наведених умовних пружних напружень при з'ягуванні фланцевого з'єднання визначаємо за формулою:

$$\sigma_a = 0,5 \max \{ \sigma_1; \sigma_2; \sigma_3 \}, \quad (11.110)$$

$$\sigma_{a1} = 0,5 \max \{ 9,22; 10,8; 10 \} = 5,4 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{a2} = 0,5 \max \{ 36,6; 41,5; 41,5 \} = 20,75 \text{ МПа.}$$

Прирощення напружень для фланців приварних встик визначаємо за формулами (11.111)–(11.113):

$$\Delta\sigma_1 = \alpha_\sigma \cdot \Delta\sigma_{11}; \quad (11.111)$$

$$\Delta\sigma_{11} = 1,5 \cdot 13,63 = 20,445 \text{ МПа};$$

$$\Delta\sigma_{12} = 1,5 \cdot 35 = 52,5 \text{ МПа};$$

$$\Delta\sigma_2 = \max \{ |\Delta\sigma_{21}|; |\Delta\sigma_{23}|; |\Delta\sigma_{21} - \Delta\sigma_{23}| \}; \quad (11.112)$$

$$\Delta\sigma_{21} = 40,66 \text{ МПа};$$

$$\Delta\sigma_{22} = 73,32 \text{ МПа};$$

$$\Delta\sigma_3 = \max \{ |\Delta\sigma_{32}|; |\Delta\sigma_{34}|; |\Delta\sigma_{32} - \Delta\sigma_{34}| \}, \quad (11.113)$$

$$\Delta\sigma_{31} = 49,88 \text{ МПа.}$$

$$\Delta\sigma_{32} = 51,8 \text{ МПа.}$$

Розрахункову амплітуду наведених умовних пружних напружень в робочих умовах визначаємо за формулою:

$$\sigma_a^p = 0,5 \max \{ \Delta\sigma_1; \Delta\sigma_2; \Delta\sigma_3 \}. \quad (11.114)$$

$$\sigma_{a1}^p = 0,5 \max \{ 20,445; 40,66; 49,88 \} = 24,94 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_{a2}^p = 0,5 \max \{ 52,5; 73,32; 51,8 \} = 36,66 \text{ МПа.}$$

Характеристики матеріалу А для аустенітної сталі марки 12Х18Н10Т визначаємо по [10], $A = 0,6 \cdot 10^5$ МПа. $B = 270$ МПа.

Коефіцієнт запасу міцності по числу циклів навантаження становить $n_N = 10$; коефіцієнт запасу міцності по напруженнях $n_\sigma = 2$.

Умовну амплітуду напружень при затягуванні фланцевого з'єднання визначаємо за формулою:

$$\bar{\sigma}_a = \max \left\{ \sigma_a; \frac{B}{n_\sigma} \right\}. \quad (11.115)$$

$$\bar{\sigma}_{a1} = \max \left\{ 5,4; \frac{270}{2} \right\} = 135 \text{ МПа}$$

$$\bar{\sigma}_{a2} = \max \left\{ 20,75; \frac{270}{2} \right\} = 135 \text{ МПа}$$

Кількість збірок фланцевого з'єднання за весь термін служби приймаємо $N_c = 1,5 \cdot 10^3$, кількість циклів зміни режимів експлуатації – $N_p = 2 \cdot 10^3$.

Допустима кількість збірок фланцевого з'єднання визначаємо при температурі збірки $t_c = 20^\circ\text{C}$ за формулою:

$$[N]_c = \frac{1}{n_N} \cdot \left(\frac{A}{\bar{\sigma}_a - \frac{B}{n_\sigma}} \cdot \frac{2300 - t}{2300} \right)^2, \quad (11.116)$$

$$[N]_{c1} = [N]_{c2} = \frac{1}{10} \cdot \left(\frac{0,6 \cdot 10^5}{135 - \frac{270}{2}} \cdot \frac{2300 - 20}{2300} \right)^2 = \infty.$$

Умовну амплітуду напружень для робочих умов визначаємо за формулою:

$$\bar{\sigma}_a^p = \max \left\{ \sigma_a^p; \frac{B}{n_\sigma} \right\}. \quad (11.117)$$

$$\bar{\sigma}_{a1}^p = \max \left\{ 24,94; \frac{270}{2} \right\} = 135 \text{ МПа};$$

$$\bar{\sigma}_{a2}^p = \max \left\{ 36,6; \frac{270}{2} \right\} = 135 \text{ МПа};$$

Допустиме число циклів зміни режиму експлуатації визначаємо при розрахунковій температурі за формулою:

$$[N]_p = \frac{1}{n_N} \cdot \left(\frac{A}{\bar{\sigma}_a^p - \frac{B}{n_\sigma}} \cdot \frac{2300 - t}{2300} \right)^2, \quad (11.118)$$

$$[N]_{p1} = [N]_{p2} = \frac{1}{10} \cdot \left(\frac{0,6 \cdot 10^5}{135 - \frac{270}{2}} \cdot \frac{2300 - 115}{2300} \right)^2 = \infty$$

Умова міцності для заданої кількості циклів навантажень:

$$\frac{N_c}{[N]_c} + \frac{N_p}{[N]_p} \leq 1, \quad (11.119)$$

$$\frac{N_c}{[N]_{c1}} + \frac{N_p}{[N]_{p1}} = \frac{N_c}{[N]_{c2}} + \frac{N_p}{[N]_{p2}} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{\infty} + \frac{2 \cdot 10^3}{\infty} = 0 \leq 1$$

виконується.

11.6 Розрахунок опорних вузлів та стропових пристроїв

Вибираю зварні опорні лапи для вертикального апарату, встановленого в отворі перекриття. Кількість опорних лап – 4. Маса апарату, в робочих умовах $m = 1120$ кг, в умовах випробування $m_1 = 621$ кг [11].

Визначаю вага апарату:

- в робочих умовах

$$G = m \cdot g, \quad (11.120)$$

- в умовах випробування

$$G_1 = m_1 \cdot g, \quad (11.121)$$

де - g прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

$$G = 1120 \cdot 9,81 = 10987,2 \text{ Н}$$

$$G_1 = 620 \cdot 9,81 = 6082,2 \text{ Н.}$$

Зусилля, що діє на опорну лапу при забезпеченні рівномірного розподілу навантаження між усіма опорними лапами, визначаємо за формулою:

$$F_1 = \frac{G}{4} + \frac{M}{D + 2(e_1 + S + S_2)}, \quad (11.122)$$

де M – згинальний момент, який діє на обичайку в розрізі, де розташовані опорні лапи.

Для апарату, встановленого в приміщенні на перекритті, згинальний момент $M = 0$. Формула приймає вигляд

$$F_1 = \frac{G}{4}. \quad (11.123)$$

- в робочих умовах

$$F = \frac{10987,2}{4} = 2746,8 \text{ Н}$$

- в умовах випробування

$$F_1 = \frac{6082,2}{4} = 1520,55 \text{ Н.}$$

По [11] приймаємо зварні лапи з найближчим більшим значенням навантаження, яка допускається, на опорну лапу.

Умовне позначення лапи:

Лапа опорная 2-6300 ГОСТ 26296-84.

11.7 Конструкція і загальний вид пілотної моделі апарату аерозольного каталізу з використанням псевдозрідження з імпульсною подачею зріджуючого агента наведена на рис. 11.2

конічного переходу висотою 1 м та циліндричної обичайки діаметром 800 мм і висотою 0,15 м.

На днищі під кутом 45° до осі апарату розміщені два штуцера А та Б номінальним діаметром 50 мм. Перший (А) для вводу зріджуючого агенту з постійною подачею, а другий (Б) – з імпульсною подачею.

Штуцери для вводу каталізатора (В) та оцтової кислоти (Г), номінальним діаметром 50 мм, розміщені на циліндричній обичайці діаметром 400 мм.

На еліптичній кришці розміщений штуцер номінальним діаметром 150 мм для виводу газу та каталізатора з апарату.

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 і 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 – пюпітр, 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 Порушення 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 МОПШ і студентів при роботі на персональному комп'ютері, приладах і другом 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 загальна технологічна схема з пілотною установкою;
- визначили оптимальні параметри пілотної установки реактора із псевдозрідженим шаром каталізатора;
- провели розрахунок на міцність, жорсткість і стійкість елементів реактора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи наукових досліджень: конспект лекцій / укладач Е. В. Колісніченко. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 83 с.
2. Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения: учебник для вузов / В. В. Кузьмин, 2008. - 279 с.
3. Псевдоожигение / Под ред. В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова. - М.: Химия, 1991. - 400 с.
4. Дэвидсон Дж., Харрисон Д. Псевдоожигение: Пер. с англ. - М.: Химия, 1974. - 725 с.
5. Расчеты аппаратов кипящего слоя, под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В.Ф. Фролова, Л., 1986. – 352 с.
6. Реакторы с псевдоожигенным слоем зернистого катализатора. Студопедия [Электронный ресурс]. – <https://studopedia.info/7-93610.html>
7. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б., Основы техники псевдоожигения, М., 1967. – 664 с.
8. Зажигает Л.С., Кишьян А.А., Романенков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., Атомиздат, 1978, 232 с.
9. Обечайки и днища химических производств. Реммашгруп [Электронный ресурс]. – <https://remmg.ru/>
10. Опоры вертикальных и горизонтальных аппаратов: Метод. указ. / Сост. В.Б. Коптева. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005 - 24 с.
11. Конструювання і розрахунків сталевих зварних посудин та апаратів. Обичайки та днища: / Укл. О.І. Барвін, І.М. Генкіна, В.В. Іванченко, Г.В. Тараненко, Ю.М. Штонда. Навч. посібник. – Луганськ: Вид-во Східноукр.

нац. ун-ту імені Володимира Даля, 2005. – 310 с., 56 іл., 42 табл., 33 бібліогр назв.

12. Розрахунок на міцність обичайок і днищ посудин та апаратів від дії опорних навантажень: навчальний посібник/ І. М. Генкіна, В. В. Іванченко, Д. О. Куліков, В. Г. Табунціков, Г. В. Тараненко, Ю. М. Штонда. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – 97 с., 33 іл., 10 бібліогр. назв.

13. Вибір опор вертикальних апаратів. Методичні вказівки до практичних занять, курсового проектування з дисциплін „Розрахунок і конструювання типового устаткування”, „Устаткування підприємств хімічної та нафтопереробної промисловості”, „Обладнання хімічних виробництв” та дипломного проектування (для студентів спеціальностей 6.090220, 7.090220, 8.090220 – обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів)./ Уклад. О.І. Барвін, В.В. Іванченко, І.М. Генкіна, В.Г. Табунціков, Г.В. Тараненко, Ю.М. Штонда. – Сєвєродонецьк, 2007. – 29 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 \bar{Y}_j сеп	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		
3446,39	226890,82	103360,03	0,0681

	44161,27		
	78508,93		
	254368,94		
	78508,93		
	94995,81		
	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		
	397451,47		
	200982,87		
	188617,71		
	200982,87		
	113052,86		
	122670,21		
3978,76	188617,71	187485,37	0,1235
	3140,36		
	188617,71		
	298530,22		
	113052,86		
	200982,87		
	19627,23		
	200982,87		
	415312,25		
	113052,86		
	200982,87		
4258,96	283417,25	222995,56	0,1469
	200982,87		
	530720,38		
	298530,22		

	3140,36		
	63592,24		
	283417,25		
	200982,87		
	113052,86		
	3140,36		
	188617,71		
	254368,94		
	143082,53		
	637688,80		
	452211,45		
	165065,03		
	593723,80		
4497,12	254368,94	263155,90	0,1734
	44161,27		
	94995,81		
	329933,79		
	165065,03		
	143082,53		
	196,27		
	143082,53		
	117812,47		
4756,30	117812,47	156466,79	0,1031
	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 r Табличне значення критерію $r - 2,493$

Номер інтервалу j	Номер точки i	Сортовані значення перепаду тиску Y_{ji} [Па]	Інтервальні середні $Y_{j \text{ сер}} [^{\circ}\text{C}]$	Квадрати різниць	Інтервальні дисперсії S_j^2	Інтервальне середнє квадратичне відхилення S_j	Значення критерію r (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			
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