

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Дослідження процесу псевдозрідження шару сипкого матеріалу з розробкою охолоджувача компримованого повітря»: 83 с., 2 табл., 5 рис., 3 дод., 9 джерел

ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ, ТЕПЛООБМІН, КОЖУХОТРУБЧАСТИЙ ТЕПЛООБМІННИК, 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 проміжного теплообмінника.

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 проміжного теплообмінника;
- ✓ розрахунок одного з апаратів схеми компресії – проміжного теплообмінника.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Мета і задачі роботи.....	7
2 Аналітичний огляд.....	8
2.1 Псевдозрідження.....	8
2.2 Гідродинаміка киплячого шару.....	12
2.3 Теплообмінні апарати.....	20
2.3.1 Вимоги, що пред'являються до теплообмінних апаратів..	21
2.3.2 Класифікація теплообмінних апаратів.....	23
3 Фізико-механічні властивості речовин, що використовуються в роботі.....	24
4 Опис експериментальної установки.....	26
5 План і порядок проведення експериментальних робіт.....	28
6 Визначення необхідної кількості експериментів.....	30
7 Результати проведення експериментальних робіт.....	32
8 Обробка результатів експериментів.....	33
8.1 Попередня обробка даних.....	33
8.2 Перевірка однорідності дисперсій серій експериментів.....	33
8.3 Пошук викидів експериментальних даних.....	35
9 Визначення основних параметрів технологічної установки.....	37
10 Розробка технологічної схеми у частині компресійного блоку (ресивер).....	41
10.1 Процес глибокого окиснення органічних відходів.....	41
10.2 Опис технологічної схеми пілотної установки.....	43
11 Розрахунок проміжного холодильника – апарату зі складу компресійного блоку.....	45
11.1 Оціночний розрахунок параметрів проміжного холодильника	45
11.2 Розрахунок на міцність, жорсткість та стійкість елементів проміжного холодильника.....	47

12 Техніка безпеки під час роботи в лабораторії.....	55
Висновки.....	61
Перелік джерел посилання.....	62
Додаток А.....	63
Додаток Б.....	70
Додаток В.....	77

ВСТУП

Наукове пізнання в сучасних умовах є основною формою пізнання реальної дійсності або навколишнього середовища. Воно відбувається не стихійно, а цілеспрямовано і по суті є науковим дослідженням, яке має певну природу, структуру та особливості. Наукове пізнання націлене насамперед на отримання об'єктивного та істинного знання про досліджуваний об'єкт, явище або процес і не допускає упередженого і тенденційного ставлення до них. Основне завдання наукового пізнання полягає у виявленні об'єктивних законів навколишньої дійсності – природних, соціальних, економічних тощо, а також законів пізнання і мислення [1].

Поряд з цим основною функцією наукового пізнання або дослідження є обслуговування потреб практики. Наука як форма пізнання переважно орієнтована на втілення її досягнень у практику, використання зміни навколишньої дійсності та управління реальними процесами. Зміст наукових досліджень можна виразити такими словами: “Знати, щоб передбачати, передбачати, щоб діяти практично”.

У гносеологічному плані наукове пізнання або дослідження виступає як складний, суперечливий процес відтворення знань, що утворюють струнку систему ідеальних форм і логічних образів, закріплених насамперед у мові – природній або штучній. Наукове пізнання не просто фіксує свої елементи, а й безперервно відтворює їх на власній основі, тобто формує відповідно до власних норм і принципів. Такий процес безперервного оновлення наукою свого концептуального арсеналу є проявом процесів її розвитку.

Наукове пізнання завжди має системний характер, оскільки наука не лише добуває знання і реєструє їх за допомогою різних методів, а й прагне пояснити їх за допомогою гіпотез, законів і теорій. Наукове пізнання або дослідження має систематичний, послідовний і контрольований характер, йому властиві строга доказовість та обґрунтованість отриманих результатів, а також достовірність висновків. Воно, як будь-яке інше соціальне явище, має

власну визначену та складну структуру, що виражається в діалектичній єдності стійких взаємозв'язків її елементів. До основних структурних елементів наукового пізнання належать: суб'єкт пізнання, об'єкт наукового дослідження, його засоби і методи. З іншого боку, в науковому дослідженні можна виокремити такі структурні елементи, як емпіричний і теоретичний рівні дослідження, постановка наукових проблем і вироблення гіпотез, формулювання наукових законів, принципів і теорій.

Наукове дослідження вимагає відповідної особливої підготовки суб'єкта пізнання, під час якої він засвоює основні засоби наукового дослідження, вивчає прийоми і методи їх застосування. Включення суб'єкта пізнання в наукову діяльність передбачає дотримання системи цінностних орієнтацій і цільових установок. Однією з основних цільових установок наукової діяльності є орієнтація дослідника на пошук об'єктивної істини, що сприймається останнім як найвища цінність науки. Не менш важливу роль відіграє установка на постійне зростання наукових знань та отримання нового знання, яка виявляється у нормативних вимогах до наукової творчості.

Накопичення наукових фактів у процесі наукового пізнання – це завжди творчий процес, в основі якого лежить певний задум, ідея.

Ідеї народжуються з практики, спостереження навколишнього світу і потреб життя. В їх основі лежать реальні факти і події. Життя висуває конкретні завдання, але не завжди відразу знаходяться продуктивні ідеї для їх вирішення. Тоді на допомогу приходить спроможність дослідника пропонувати новий, зовсім незвичайний аспект розгляду завдання.

1 МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

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

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 проміжного теплообмінника;
7. Розрахунок одного з апаратів схеми компресії – проміжного теплообмінника;
8. Формулювання висновків.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

2.1 Псевдозрідження

Псевдозрідженням твердого зернистого матеріалу називають приведення його в такий стан, при якому його властивості за багатьма показниками наближаються до властивостей рідини; такий стан досягається в результаті пропущення через шар вільно лежачого твердого зернистого матеріалу висхідного потоку газу або рідини. Псевдозріджений шар приймає форму апарата, що вміщає його, поверхня матеріалу горизонтальна. Виявляються й інші властивості, що притаманні рідинам – плинність, «в'язкість» і поверхневий натяг. Тіла, що мають меншу питому вагу, чім псевдозріджений шар, підіймаються до гори, а більший – тонуть.

Широке застосування техніка псевдозрідження знайшла у зв'язку з рядом важливих переваг. Твердий зернистий матеріал у псевдозрідженому стані внаслідок плинності можна переміщати по трубах. Це дозволяє багато періодичних процесів здійснювати безупинно. Завдяки інтенсивному перемішуванню твердих часток у псевдозрідженому шарі вирівнюється поле температур, усувається можливість значних локальних перегрівів, хоча при цьому відбувається зменшення рушійної сили процесу [2].

Процеси, у яких псевдозрідження широко застосовується:

- 1) Хімічні: каталітичний крекінг нафтопродуктів, гетерогенні каталітичні реакції, газифікація палива, випал сульфідних руд і т.і.
- 2) Фізичні й фізико-хімічні: сушіння дрібнозернистих, пастоподібних і рідких матеріалів, адсорбційне очищення газів, нагрів й охолодження газів і ін.
- 3) Механічні: збагачення, класифікація, гранулювання, змішання й транспортування зернистих матеріалів.

Гідродинамічна сутність процесу псевдозрідження полягає в наступному. Якщо через шар зернистого матеріалу, розташованого на підтримуючих перфорованих ґратах апарата, проходить потік псевдозріджуючого агента (газу або рідини), то стан шару виявляється різним залежно від швидкості цього потоку.

При плавному збільшенні швидкості від нуля до деякого першого критичного значення відбувається звичайний процес фільтрування, при якому тверді частки нерухливі (рис. 2.1,а). На графіку процесу псевдозрідження (рис. 2.2), називаному кривій псевдозрідження, що й виражає залежність перепаду статичного тиску в шарі зернистого матеріалу від швидкості псевдозріджуючого агента, процесу фільтрації відповідає висхідна галузка ОА.

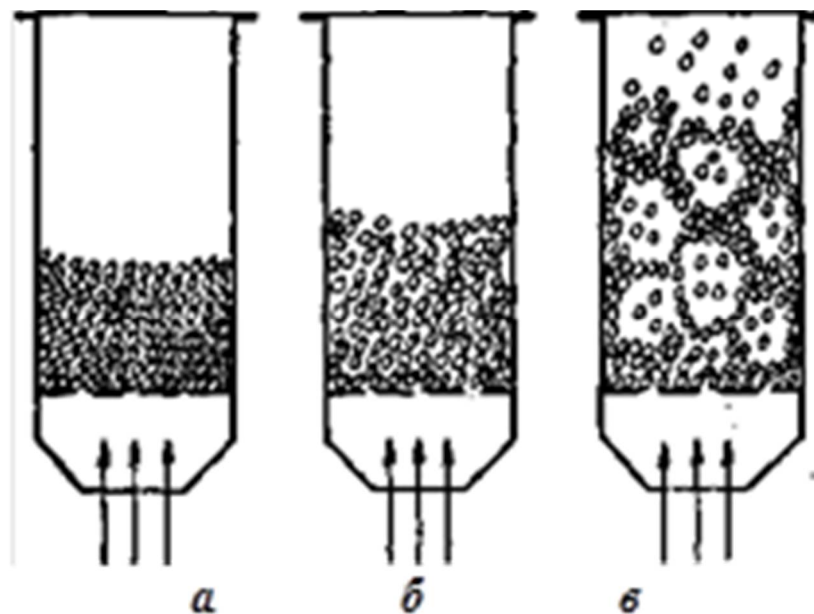


Рисунок 2.1 – Різні стани шару зернистого матеріалу при проходженні через нього потоку газу (рідини):

а – нерухливий шар (режим фільтрації); б – однорідний псевдозріджений шар; в – неоднорідний псевдозріджений шар

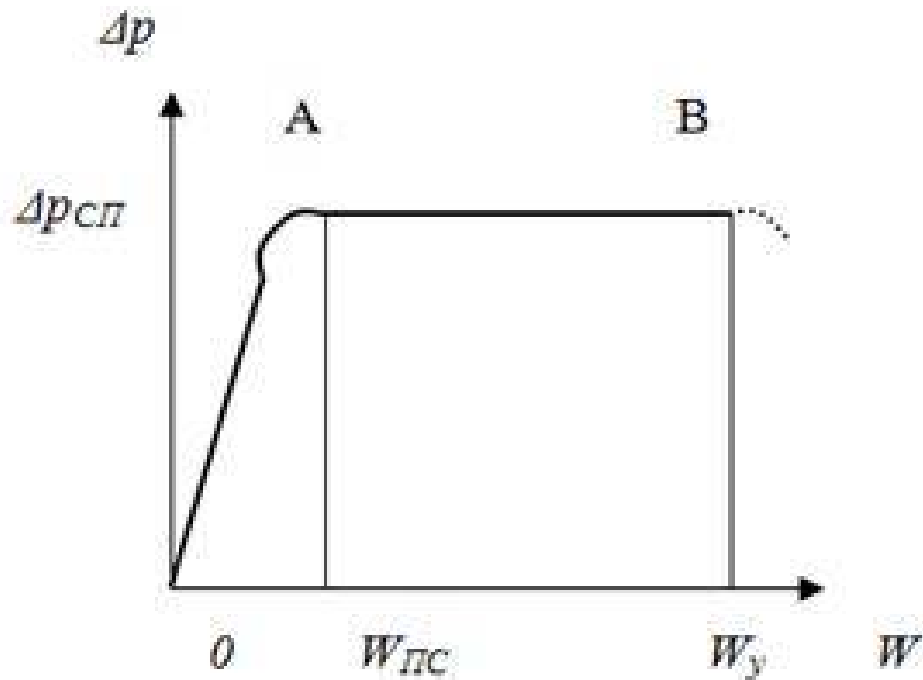


Рисунок 2.2 – Зміна перепаду тиску залежно від швидкості потоку, що проходить через шар (крива ідеального псевдозрідження)

Перехід від режиму фільтрації до стану псевдозрідження відповідає на кривій псевдозрідження критичній швидкості псевдозріджуючого агента $W_{пс}$ (точка А, рис. 2.2), називану швидкістю початку псевдозрідження.

Починаючи зі швидкості псевдозрідження й вище опір шару $D_{рсп}$ зберігає практично постійне значення й залежність $DP = f(W)$ виражається прямою АВ, паралельною осі абсцис. Це пояснюється тим, що з ростом швидкості псевдозріджуючого агента контакт між частками зменшується й вони одержують більшу можливість хаотичного перемішування в усіх напрямках. При цьому зростає середня відстань (просвіти) між частками, тобто збільшується порізність шару, а отже його висота h . Порізність нерухливого шару ε_0 – це відношення

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0 - V}{V_0},$$

де V і V_0 – об'єм нерухливого шару й об'єм часток.

Залежно від властивостей псевдозріджуючого потоку і його швидкості можна спостерігати кілька стадій процесу псевдозрідження. При швидкостях псевдозріджуючого агенту, незначно перевищують критичну швидкість $W_{\text{пс}}$, тобто при $W \geq W_{\text{пс}}$, спостерігається так зване однорідне («спокійне») псевдозрідження (рис. 2.1, б).

У міру зростання швидкості при псевдозрідженні газів в шарі виникають компактні маси газу («бульбашки», «каверни»), що інтенсивне турбулізують тверді частинки і утворюють сплески зернистого матеріалу на поверхні. При цьому спостерігаються значні пульсації статичного і динамічного напору псевдозріджуючого агенту. Такий характер гідродинаміки шару називається неоднорідним псевдозрідженням (рис. 2.1, в).

Нарешті, при досягненні деякого другого критичного значення швидкості W_y , яка зветься швидкістю виносу, тверді частинки починають виноситися з шару і їх кількість в апарату зменшується. Порізність такого шару прагне до 1, і опір шару правіше точки В (рис. 2.2) також падає.

Розглянутий графік називають кривою ідеального псевдозрідження.

На практиці дійсна крива псевдозрідження відрізняється від ідеальної кривої (крутизною висхідній гілки і сплеском тиску при початку псевдозрідження, що визначаються, в основному, щільністю упаковки твердих частинок).

В даний час у зв'язку з величезною важливістю процесів псевдозрідження розробляються все нові і нові апарати, що враховують специфічні особливості взаємодіючих речовин.

Поряд зі звичайними циліндричними апаратами знайшли широке застосування конічні апарати. Значна швидкість псевдозріджувачого агенту внизу апарату дає можливість працювати без підтримуючої решітки, що особливо важливо для високотемпературних процесів, агресивних середовищ, а також при використанні матеріалів, що грудкують і злипаються [3].

Апарати з псевдозрідженим шаром, як і всі інші технологічні апарати, можуть бути періодичної і безперервної дії. В періодично діючих апаратах тверді частки не виводяться до свого повного відпрацювання.

В апаратах безперервної дії здійснюється протитечія зернистого матеріалу, тобто відбувається постійний витік відпрацьованих твердих частинок їх заміна їх свіжим зернистим матеріалом.

У тих випадках, коли потрібно отримати протитечію зернистого матеріалу і псевдозрідженого агенту, в апаратах безперервної дії застосовується послідовне секціонування на каскад послідовно розташованих шарів. У таких секціях відбувається перехід твердої фази з верхніх шарів на нижні під дією сили тяжіння, або через спеціальні перетоки, або через отвори в провальних тарілках, живий перетин яких становить 15...30%.

2.2 Гідродинаміка киплячого шару

Гідродинамічна картина псевдозрідження складається з ряду особливостей, які визначаються витратою і швидкістю протікає через шар газу [4]:

- При малих витратах і швидкості газу процес проходження газу через шар нагадує фільтрацію. При малому розмірі часток і порівняно невисоких швидкостей газу режим руху в шарі ламінарний (однорідний псевдозріджений шар).
- При великому розмірі частинок і порівняно високих швидкостей газу режим руху в шарі перехідний і турбулентний (неоднорідний псевдозріджений шар).
- При значних швидкостях газу і малому розмірі часток – винесення продукту.

Залежно від геометрії апарату мають місце різні фізичні картини псевдозрідження:

- При співвідношенні діаметра апарату (газової решітки) і його висоти 1:1 має місце однорідний псевдозріджений шар;
- При кінчному перерізу апарату, або при площі газової решітки менш площі перерізу апарату має місце фонтануючий шар, коли чітко помітна нерівномірність швидкості переміщення частинок матеріалу по подовжньому перерізу апарату;
- При співвідношенні висоти і діаметра апарату більш одиниці має місце толокоутворення;
- При співвідношенні висоти і діаметра апарату менш одиниці має місце каналоутворення.

Фізичні картини, що мають місце під час псевдозрідження шару сипкого матеріалу, наведено на рис. 2.3.

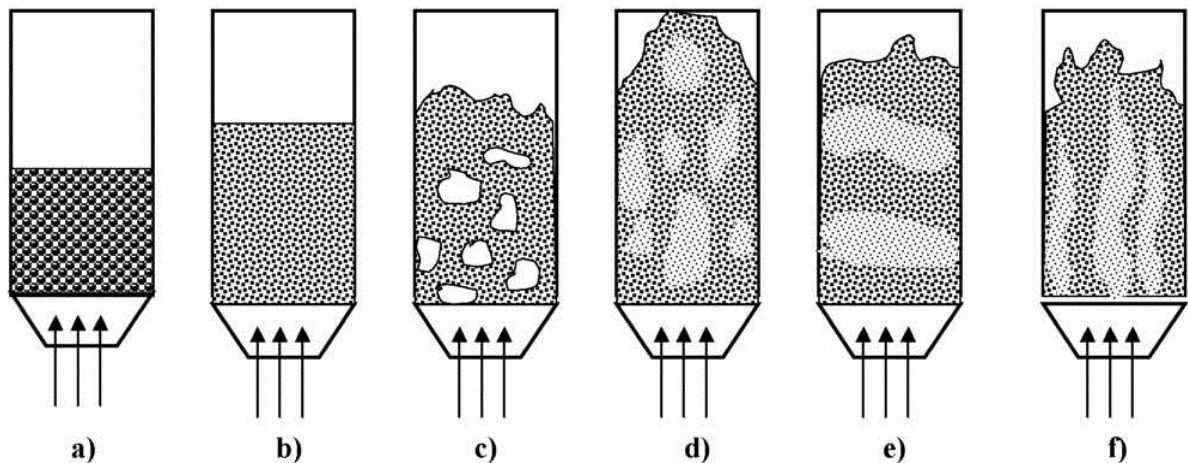


Рисунок 2.3 – Стан шару зернистого матеріалу при продувці газом:

- a) нерухомий шар (режим фільтрації);
- b) однорідний псевдозріджений шар;
- c) неоднорідний псевдозріджений шар;
- d) винесення частинок;
- e) псевдозріджений шар із толокоутворенням;
- f) псевдозріджений шар із каналоутворенням.

Особливості псевдозрідженого шару:

Позитивні особливості:

1. інтенсивне перемішування твердих часток;
2. незалежність опору шару від швидкості псевдозріджуючого агенту;
3. вирівнювання полів концентрацій і температур.

Негативні особливості:

1. можливість проскакування значних кількостей газу без достатнього контакту із продуктом;
2. зношування стінок і продукту в результаті тертя;
3. виникнення значних зарядів статичної електрики;

4. необхідність установки потужних систем пиловловлення й аспірації.

Позитивні особливості знаходять застосування в різних основних процесах:

1. хімічних (каталіз, випал, нагрівання й ін.);
2. масообмінних (сушіння зернистих матеріалів у шарі, сушіння рідких продуктів на твердих інертних носіях);
3. механічних (гранулювання, змішування, транспортування та ін.).

Негативні ефекти можуть бути погашені раціональними конструкторськими рішеннями.

Гідродинаміка псевдозрідження може бути описана залежностями опору шару Δp від швидкості газу, що протікає W (рис. 2.4).

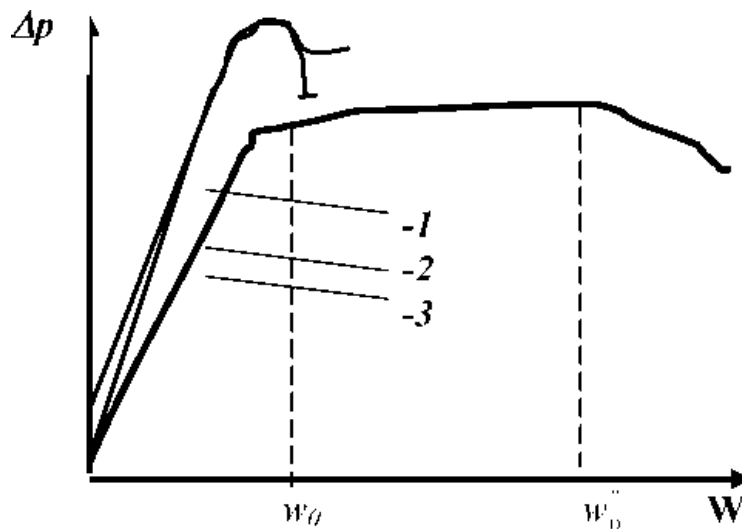


Рисунок 2.4 – Крива реального псевдозрідження:

1. щільне впакування зернистого матеріалу;
2. пухке впакування зернистого матеріалу;
3. при зменшенні швидкості газу зберігається пухке впакування зернистого матеріалу.

У момент початку псевдозрідження вага матеріалу врівноважується гідродинамічним опором шару. Опір киплячого шару дорівнює ваги твердих часток у шарі $G_{\text{ТВ}}$, діленому на площу перерізу апарата S .

Об'єм, займаний шаром, рівний $S \cdot h_0$, де h_0 – висота шару [м].

Порізність нерухливого шару (відносний об'єм порожнеч) у нерухливому шарі ε_0 визначається як

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0 - V}{V_0},$$

де V_0, V – відповідно, об'єм нерухливого шару й об'єм часток.

Тоді об'єм твердих часток у шарі дорівнює $S \cdot h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0)$, а вага часток із урахуванням піднімальної сили середовища становить:

$$G_{\text{ТВ}} = S \cdot h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{Г}}) \cdot g,$$

$$\Delta p = \frac{G_{\text{ТВ}}}{S}.$$

З урахуванням сил Архімеда

$$\Delta p = h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{Г}}) \cdot g,$$

тут $G_{\text{ТВ}}$ – вага шару h_0 ;

S – поперечний переріз апарата, [м²];

h_0 – висота нерухливого шару;

$\rho_{\text{ТВ}}, \rho_{\text{Г}}$ – відповідно, густина твердих часток і газу;

ε_0 – порізність нерухливого шару (відносний об'єм порожнеч у нерухливому шарі).

При збільшенні фіктивної швидкості потоку зростають як висота шару h , так і його порізність ε . При цьому $(1 - \varepsilon)$ зменшується, а величина

$h \cdot (1 - \varepsilon)$ залишається постійної, оскільки опір псевдозрідженого шару не залежить від швидкості середовища. Отже, можна записати наступну рівність

$$h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) = h \cdot (1 - \varepsilon).$$

Звідси порізність киплячого шару

$$\varepsilon = 1 - \frac{h}{h_0} \cdot (1 - \varepsilon_0) = 1 - \frac{1 - \varepsilon_0}{K},$$

де $K = \frac{h}{h_0}$ —називається коефіцієнтом розширення шару.

Швидкість псевдозрідження w_0 можна знайти, дорівнявши рівняння опору псевдоожиженого шару опору зернистого шару.

$$h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\Gamma}) \cdot g = \frac{3}{4} \cdot \lambda \cdot \frac{h \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_{\Gamma} \cdot w_0^2}{d \cdot \Phi \cdot \varepsilon_0^3},$$

де d – діаметр часток;

Φ – фактор форми, для часток неправильної форми $\Phi < 1$, наприклад, 0.9.

Після перетворень одержимо наступні розрахункові рівняння:

$$\lambda \cdot (\text{Re}_0)^2 = \frac{4}{3} \cdot \Phi \cdot \varepsilon_0^3 \cdot \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\Gamma}) \cdot \Phi^3 \cdot \varepsilon_0^3}{\mu_{\Gamma}^2},$$

де Re_0 – модифікований критерій Рейнольдса.

Re'_0 – модифікований критерій Рейнольдса, який відповідає швидкості псевдоожиження w_0 .

Re''_0 – модифікований критерій Рейнольдса, який відповідає швидкості віднесення.

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\Gamma})}{\mu_{\Gamma}^2} - \text{критерий Архимеда.}$$

$$\psi = \frac{\Phi^3 \cdot \varepsilon_0^3}{(1 - \varepsilon_0)^2}.$$

$$Re'_0 = \frac{0.00404 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{\Phi} \cdot (\psi \cdot Ar) \quad \text{при } \psi \cdot Ar < 18\,500.$$

$$Re'_0 = \frac{0.275 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{\Phi} \cdot (\psi \cdot Ar)^{0.57} \quad \text{при } \psi \cdot Ar = 18\,500 \dots 1.1 \cdot 10^8.$$

$$Re'_0 = \frac{1.03 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{\Phi} \cdot (\psi \cdot Ar)^{0.5} \quad \text{при } \psi \cdot Ar > 1.1 \cdot 10^8.$$

Швидкість витання Re_{vit} можна приблизно визначити по напівемпіричній залежності Аерова – Тодеса

$$Re_{\text{vit}} = \frac{Ar}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar}}.$$

При $\varepsilon = 1$

$$Re_{\text{vit}} = \frac{w_{\text{vit}} \cdot d \cdot \rho_c}{\mu_c}.$$

Узагальненням дослідних даних при проміжних значеннях порозности ε була отримана формула

$$Re_{\text{vit}} = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4.75}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4.75}}}.$$

По цій формулі можна обчислити швидкість, необхідну для досягнення заданої частки вільного об'єму шару.

Для розрахунків ε при даному значенні швидкості вираження приводиться до вигляду:

$$\varepsilon = \left(\frac{18 \cdot \text{Re}_{\text{vit}} + 0.36 \cdot \text{Re}_{\text{vit}}^2}{\text{Ar}} \right)^{0.21}.$$

При розрахунках необхідно привести параметри середовища до робочих умов процесу. Застосовується залежність, що наведена на рис. 2.5.

$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$

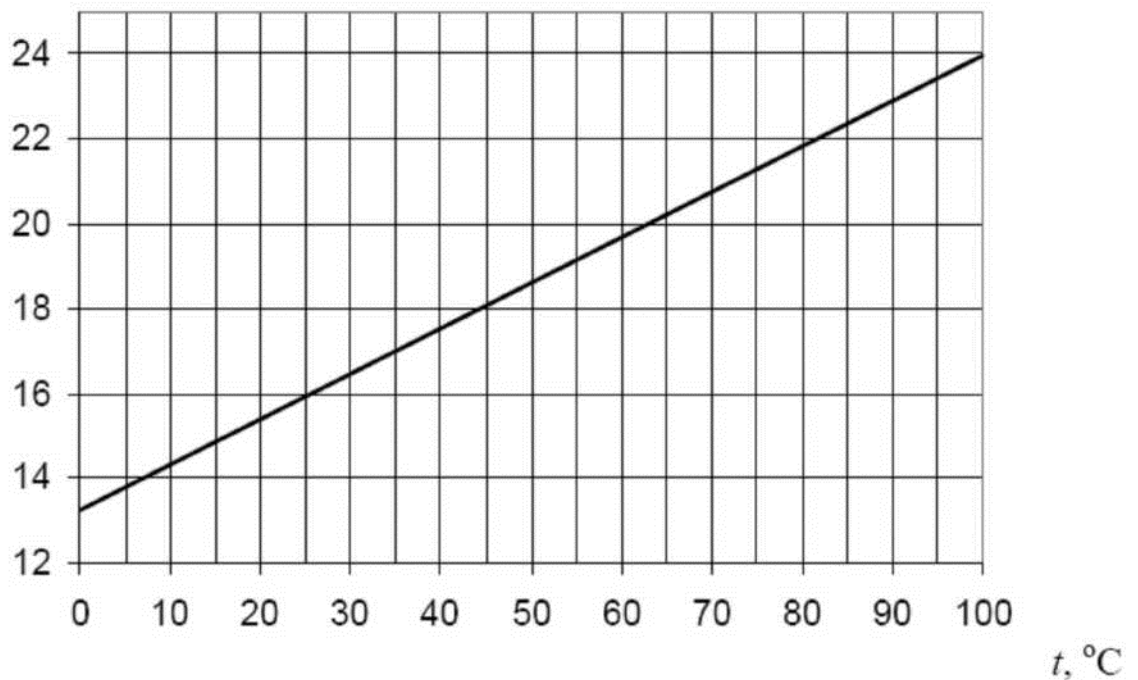


Рисунок 2.5 – Залежність кінематичної в'язкості повітря від температури

Можна розв'язати й зворотнє завдання визначення по заданій критичній швидкості псевдозрідження необхідний діаметр частки. Для цього за знайденим значенням w_0 обчислюють критерій Лященко $\text{Lu}_{\text{кр}}$:

$$Lu = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{w_0^3 \cdot \rho_c}{(\rho_{ТВ} - \rho_c) \cdot v_c \cdot g} = \frac{w_0^3 \cdot \rho_c^2}{(\rho_{ТВ} - \rho_c) \cdot \mu_c \cdot g}$$

де v_c – динамічна в'язкість;

μ_c – кінематична в'язкість.

Початкову порізність приймаємо рівною $\varepsilon_0 = 0.4$.

За графічною залежністю $Lu = f(Ar, \varepsilon)$ для знайденого значення $Lu_{кр}$ і порізності $\varepsilon_0 = 0.4$ визначається значення критерію Ar і з нього обчислюється діаметр часток матеріалу.

$$d = \sqrt[3]{\frac{Ar \cdot \rho_c \cdot v_c}{(\rho_{ТВ} - \rho_c) \cdot g}}$$

2.3 Теплообмінні апарати

Процеси теплообміну – нагрів, охолодження, конденсація і випарювання рідких, газових, парових середовищ та їх сумішей – знаходять широке розповсюдження в хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій та інших галузях промисловості [5].

Апарати, призначені для проведення теплообмінних процесів, називають теплообмінними. Ці апарати мають різноманітне конструктивне оформлення, яке залежить від характеру процесів, котрі протікають в них та умов їхнього проведення. Умови проведення процесів теплообміну в промислових апаратах надзвичайно різноманітні. Їх застосовують для робочих середовищ із різним агрегатним станом у широкому діапазоні тисків, температур та фізико-хімічних властивостей.

Передача тепла в теплообмінних апаратах здійснюється від середовища, що має більш високу температуру, до середовища з більш

низькою температурою. Рушійною силою процесу теплообміну є різниця температур середовищ.

2.3.1 Вимоги, що пред'являються до теплообмінних апаратів

Враховуючи широкий діапазон тисків та температур робочих середовищ, а також різноманітність їхніх властивостей, до сучасних теплообмінних апаратів пред'являються такі основні вимоги:

– конструкція апарата має бути технологічною, надійною протягом передбаченого технічною документацією строку служби, забезпечувати безпеку при виготовленні, монтажі та експлуатації, передбачати можливість огляду (у тому числі внутрішньої поверхні), очистки, промивки, продувки та ремонту, а також забезпечувати можливість термообробки, передбаченої креслеником;

– застосування конкретного типорозміру апарата повинно забезпечувати передачу потрібної кількості тепла від одного середовища до іншого з отриманням необхідних кінцевих температур кожного робочого середовища при заданому рівні гідравлічних опорів.

Кожухотрубчасті теплообмінники. Найпоширеніші в промисловості, дають можливість створювати значні поверхні теплообміну в одному апараті, прості у виготовленні і надійні в експлуатації.

Незважаючи на те, що теплообмінні апарати розрізняють за принципом дії, будовою, типом теплоносіїв і призначенням, можна сформулювати ще й основні вимоги теплового, гідродинамічного, експлуатаційного, конструктивного і технічного характеру, які треба враховувати при виборі типу, розрахунку і конструктивній розробці теплообмінної апаратури.

Основна вимога, з точки зору теплопередачі та гідродинаміки, є досягнення в теплообміннику максимального коефіцієнта теплопередачі при мінімальному гідравлічному опорі. Підвищення коефіцієнта теплопередачі дає можливість зменшити габарити, вагу, вартість теплообмінників та витрати металу. Зменшення гідравлічного опору апарата призводить до зниження витрат енергії на прокачування теплоносіїв. Проте обидві ці вимоги звичайно перебувають у взаємній суперечності. Тому, конструюючи теплообмінники, доводиться шукати оптимальне розв'язання цієї суперечливості.

При виборі типу теплообмінного апарата і конструюванні його окремих вузлів часто вирішальним фактором служать експлуатаційні вимоги:

- а) мала забрудненість поверхні теплообміну, зручність очищення, огляду і ремонту;
- б) герметичність поверхні теплообміну, що дає можливість уникнути змішування обох теплоносіїв;
- в) надійність у роботі.

Конструктивні вимоги до теплообмінних апаратів:

- а) надійна компенсація неоднакових температурних навантажень корпусу і поводжень корпусу і поверхні теплообміну;
- б) компактність, що визначає його масові і геометричні дані (компактність характеризується відношенням поверхні теплообміну до об'єму теплообмінного апарата); чим більше це відношення, тим компактніший апарат).
- в) загальна простота і технологічність конструкції теплообмінного апарата.

2.3.2 Класифікація теплообмінних апаратів

Теплообмінні апарати класифікуються за такими основними ознаками:

- за конструкцією – апарати з поверхнею теплообміну, виготовлюваною з труб (кожухотрубчасті, “труба в трубі”, зрошувальні, повітряного охолодження, занурювальні змійовикові); апарати, поверхня теплообміну яких виконується з листового прокату (пластинчасті, спіральні) та апарати, що виготовляються з неметалевих матеріалів;
- за призначенням – теплообмінники, холодильники, конденсатори та випарники;
- за взаємним напрямом робочих середовищ – прототечийні, протитечийні та змішаного току.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати класифікуються наступним чином:

- за призначенням – теплообмінники (Т), холодильники (Х), конденсатори (К) та випарники (И);
- за конструкцією – апарати з нерухомими трубними решітками (тип Н), температурним компенсатором на кожусі (тип К), з розширником на кожусі (з нерухомими трубними решітками і температурним компенсатором на кожусі), з плаваючою головкою (тип П), U-подібними трубами (тип У) та для підвищених тисків і температур (тип ПК);
- за розташуванням у просторі – вертикальні (В) і горизонтальні (Г);
- за числом ходів у трубному просторі – одноходові та багатходові;
- за компонованням – одинарні та здвоєні;
- за матеріальним виконанням – основні вузли і деталі з вуглецевої, низьколегованої, корозійностійкої сталі, латуні та титану.

3 ФІЗИКО – МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕЧОВИН, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РОБОТІ

Зернистий матеріал – синій поліетилен у вигляді луски еліптичної форми.

Густина поліетилену – 914 [кг/м³].

Насипна густина розраховується як

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

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

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

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

За розмірами гранули зернистого матеріалу можна поділити на три фракції:

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

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

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

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

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

середня (67%), розміри $d = 4.9$ [мм], $h = 1.5$ [мм];

дрібна (28%), розміри $d = 4.2$ [мм], $h = 1.4$ [мм].

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

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

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

велика (5%), розміри $S_B = 77.4$ [мм²], $V_B = 44.1$ [мм³];

середня (67%), розміри $S_C = 60.8$ [мм²], $V_C = 28.3$ [мм³];

дрібна (28%), розміри $S_D = 46.2$ [мм²], $V_D = 19.4$ [мм³].

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 наведено схему моделі трубчатого реактора.

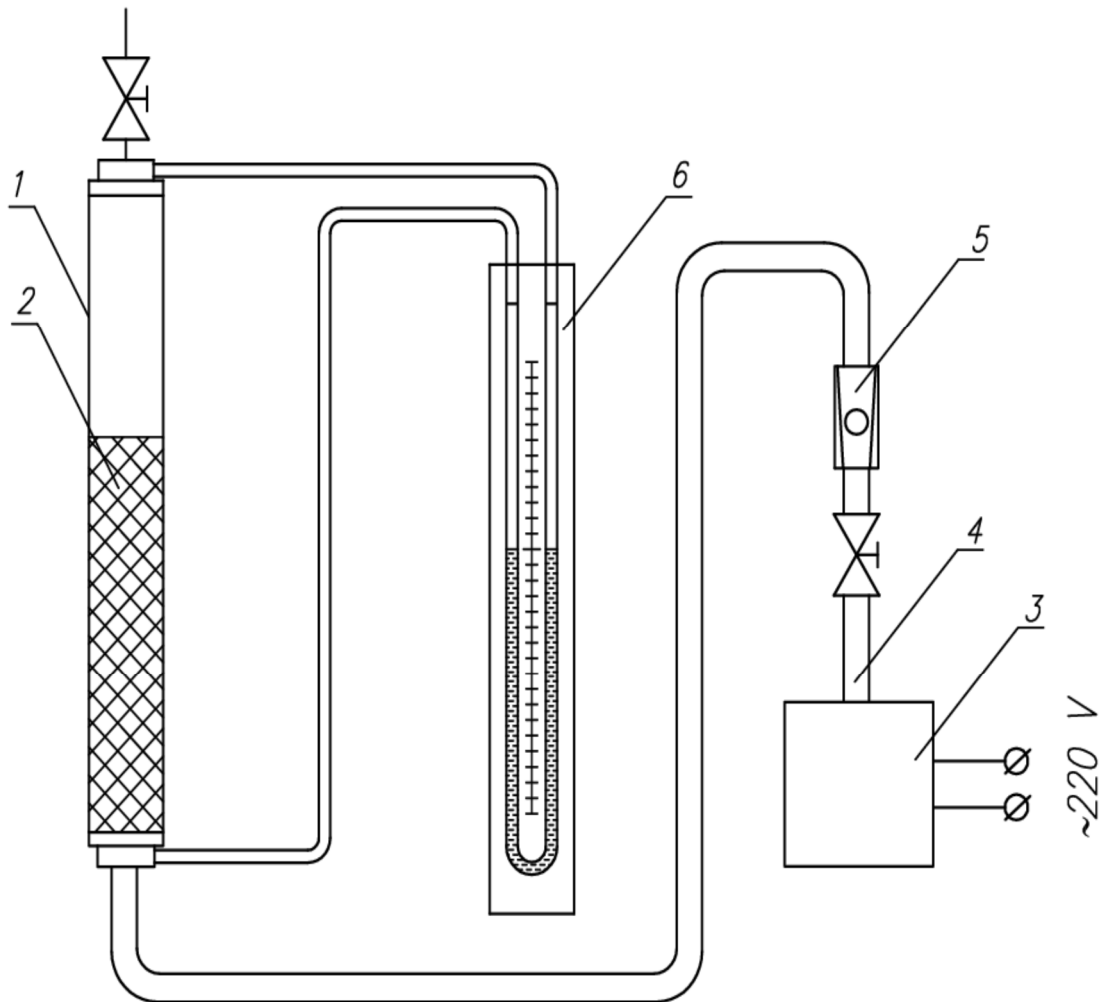


Рисунок 4.1 – Модель трубчатого реактора

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

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

Вентилям встановлювали витрату, що дорівнює приблизно одній десятій 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 повітродувки – від 0 до 16 [діл. шк.].

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

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

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

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

7 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РОБІТ

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 [6].

Все точки, що потрапили в інтервал Δx_j , відносять до його середини x_j .

Після цього підраховують часткові середні \bar{u}_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_j :

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

де j – номер вибірки;

k – кількість вибірок (інтервалів розбиття діапазону x).

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

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

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

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

8.3 Пошук викидів експериментальних даних.

Статистична перевірка гіпотез при оцінці членів вибірки, що різко виділяються

Критерій типу r .

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

Для перевірки статистичних показників розрахуємо для експериментальних значень характеристику r :

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

де

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

В таблиці [6] 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 апарату:	3.5916 $\left[\frac{\text{М}}{\text{С}}\right]$

Висхідні 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.

$$T_1 = T_2 = 500 \text{ [°C]};$$

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

$P_2 = 10^6$ [Па] – робочий тиск в апараті.

Звідси знаходимо

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

Оскільки температура не змінюється, рівняння набуде вигляду

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

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

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

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

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

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

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

Зважаючи на умови в апарату, 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].

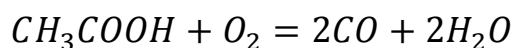
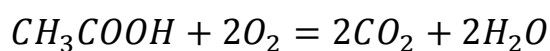
$$F_{\text{Вхід}}^{\text{об}} = \frac{F_{\text{Па}}^{\text{мас}}}{\rho_{\text{Вхід}}} = \frac{0.1546}{1.205} = 0.128 \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right].$$

10 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ У ЧАСТИНІ КОМПРЕСІЙНОГО БЛОКУ (ПРОМІЖНИЙ ХОЛОДИЛЬНИК)

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

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

Для зіставлення активності ряду каталітичних систем при окисненні різних класів органічних сполук уведено поняття граничного навантаження по вуглецю. Граничне навантаження – це величина, що забезпечує концентрацію монооксиду вуглецю в газах, що відходять, до 20 [мг/м³] (ПДК робочої зони) [7].

10.2 Опис технологічної схеми пілотної установки

На рис. 10.1 наведено запропоновану технологічну схему пілотної установки з відділенням компресії зріджуючого агента (апарат – проміжний холодильник).

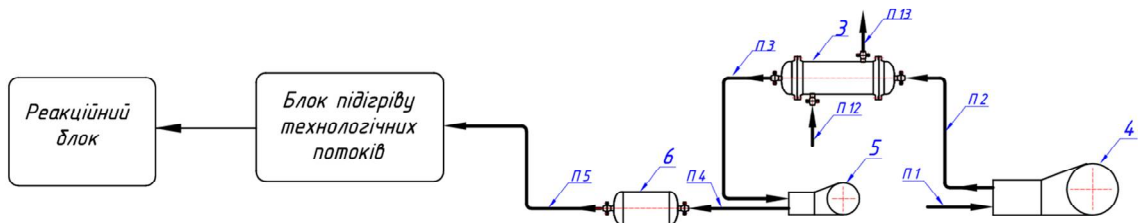


Рисунок 10.1 – Технологічна схема пілотної установки з відділенням компресії зріджуючого агента (апарат – проміжний холодильник)

Технологічні апарати та потоки схеми установки з відділенням компресії зріджуючого агента (апарат – проміжний холодильник) наведено у таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Технологічні апарати та потоки схеми

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

П4	–	повітря з виходу другого ступеня компресора на вхід ресивера;
П5	–	повітря з виходу ресивера на вхід підігрівача повітря;
П12	–	вхід охолоджувальної води в проміжний холодильник;
П13	–	вихід охолоджувальної води з проміжного холодильника.

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

11 РОЗРАХУНОК ПРОМІЖНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА – АПАРАТУ ЗІ СКЛАДУ КОМПРЕСІЙНОГО БЛОКУ

11.1 Оціночний розрахунок параметрів проміжного холодильника

Вихідні дані для розрахунку проміжного холодильника:

Трубний простір – повітря.

Температура газу на вході – $T_{t1} = 125^{\circ}\text{C}$ (398.15 K).

Температура газу на виході – $T_{t2} = 100^{\circ}\text{C}$ (373.15 K).

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

Міжтрубний простір – охолоджувальна вода.

Температура води на вході – $T_{x1} = 20$ [°C] (293.15 [K]).

Температура води на виході – $T_{x2} = 40$ [°C] (313.15 [K]).

У проміжному холодильнику відбувається ізобарне (при постійному тиску) охолодження стислого повітря. Розраховуємо кількість тепла, що відводиться від повітря за формулою [8]

$$Q = F_{\text{мас } t} \cdot c_{p \text{ п}} \cdot (T_{t1} - T_{t2}), \quad (11.1)$$

де $c_{p \text{ п}}$ – ізобарна теплоємність повітря [Дж/(кг · К)].

По таблиці визначаємо величину ізобарна теплоємність повітря при середній температурі теплоносія $T_{\text{сер}} = 110^{\circ}\text{C}$ (383.15 K), $c_{p \text{ п}} = 1009$ [Дж/(кг · К)].

Після підстановки даних у формулу (11.1), отримуємо

$$Q_t = 0.1546 \cdot 1009 \cdot (398.15 - 373.15) = 3899.8 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт} \right].$$

Виходячи з теплового балансу $Q_t = Q_x$, розраховуємо витрати охолоджувальної води.

З довідникових даних ізобарна теплоємність води для $T_{\text{сер}} = 30^{\circ}\text{C}$ (303.15 K) становить $c_{p \text{ х}} = 4174$ [Дж/(кг · К)]

$$3899.8 = F_{\text{мас х}} \cdot 4174 \cdot (313.15 - 293.15) .$$

Звідси знаходимо масові витрати води для охолодження у проміжному теплообміннику стислого в компресорі повітря

$$F_{\text{мас х}} = \frac{3899.8}{4174 \cdot (313.15 - 293.15)} = 0.047 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right] .$$

Для вибору теплообмінника необхідне визначити площу поверхні теплообміну. Будемо виходити з основного рівняння теплопередачі

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta t_{\text{сер}} , \quad (11.2)$$

де Q – кількість теплоти, що передається через поверхню теплообміну, [Вт];

K – коефіцієнт теплопередачі, [Вт/(м² · К)];

S – площа поверхні теплообміну, [м²];

$\Delta t_{\text{сер}}$ – середня різниця температур гарячого та холодного теплоносіїв, [К].

Для оціночного розрахунку площі поверхні теплообміну, необхідно обрати коефіцієнт теплопередачі. З літератури визначаємо [8]

$$K_{\text{орієнт}} = 33 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right] .$$

Вважаємо, що теплоносії рухаються протитоком. З урахуванням початкових умов, визначаємо

$$\Delta t_{\text{більш}} = 398.15 - 313.15 = 85 \text{ [К]} ,$$

$$\Delta t_{\text{менш}} = 373.15 - 293.15 = 80 \text{ [К]} .$$

Оскільки $\Delta t_{\text{більш}}/\Delta t_{\text{менш}} < 2$, середню різницю температур знаходимо як

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{\Delta t_{\text{більш}} + \Delta t_{\text{менш}}}{2} = \frac{85 + 80}{2} = 82.5 \text{ [К]} .$$

Виходячи з рівняння (11.2), одержимо

$$S = \frac{Q}{K_{\text{орієнт}} \cdot \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{3899.8}{33 \cdot 82.5} = 1.43 \text{ [м}^2\text{]}.$$

11.2 Розрахунок на міцність, жорсткість та стійкість елементів проміжного холодильника

Вихідні дані

Тип апарата – холодильник 159 ТНГ-1.6-М12/20-1.5-1-У	ТУ 26-02-1105-89
Внутрішній діаметр кожуха D , [мм]	159
Довжина теплообмінних труб l , [мм]	1500
Зовнішній діаметр теплообмінної труби d_T , [мм]	20
Товщина стінки труби S_T , [мм]	2
Число ходів по трубах	1
Розрахунковий тиск у трубному просторі P_T , [МПа]	1
Розрахунковий тиск у міжтрубному просторі P_K , [МПа]	0.5
Розрахункова температура труб t_T , [°C]	115
Розрахункова температура кожуха t_K , [°C]	30
Матеріал кожуха	СтЗсп
Матеріал розподільної камери, кришки, трубної решітки та теплообмінних труб	Ст20
Середовище в трубному просторі за ГОСТ 12.1.007–76	4 кл.
Середовище в міжтрубному просторі за ГОСТ 12.1.007–76	4 кл.
Група теплообмінника по трубному простору	4
Група теплообмінника по міжтрубному простору	4
Загальне число циклів навантаження N	1000
Термін використання [років]	10

На рис. 11.1 наведено загальний вигляд горизонтального кожухотрубчастого теплообмінника

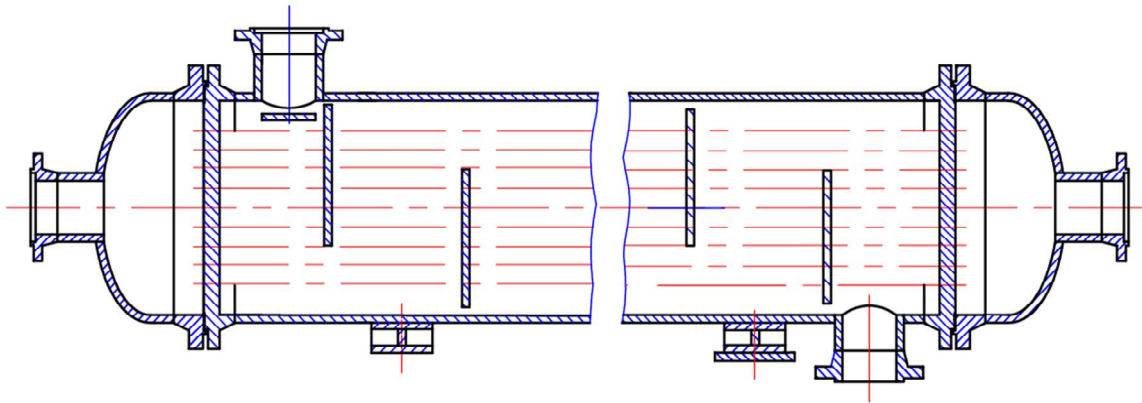


Рисунок 11.1 – Горизонтальний кожухотрубчастий теплообмінник

Розрахункова температура

Розрахункову температуру розподільної камери $t_{\text{кам}}$ [°C] визначаємо за формулою

$$t_{\text{кам}} = 2 \cdot t_{\text{Т}} - t_{\text{к}} = 2 \cdot 115 - 30 = 200 \text{ [}^{\circ}\text{C]} .$$

Розрахункову температуру ізованих апаратних фланців та фланців штуцерів розподільної камери теплообмінника приймаємо рівною температурі розподільної камери, тобто [9]

$$t_{\text{ф}} = t_{\text{кам}} = 200 \text{ [}^{\circ}\text{C]} .$$

Розрахункову температуру ізованих фланців штуцерів кожуха приймаємо рівною температурі середовища міжтрубного простору, тобто

$$t_{\text{ф}} = t_{\text{к}} = 30 \text{ [}^{\circ}\text{C]} .$$

Розрахункова температура болтів фланцевих з'єднань корпусів та фланців штуцерів розподільної камери розраховується як

$$t_{\text{б}} = 0.97 \cdot t_{\text{кам}} = 0.97 \cdot 200 = 194 \text{ [}^{\circ}\text{C]} .$$

Розрахункова температура болтів фланцевих з'єднань штуцерів міжтрубного простору

$$t_{\text{б}} = 0.97 \cdot t_{\text{к}} = 0.97 \cdot 30 = 29 \text{ [}^{\circ}\text{C]} .$$

Допустимі напружини

Допустимі напружини $[\sigma]$ [МПа] при розрахунковій температурі і при температурі 20 $^{\circ}\text{C}$ – $[\sigma]_{20}$, для матеріалів елементів апарата наведені в [5].

Пробний тиск, при якому проводиться випробування апарата, визначаємо за формулою

$$P_{\text{пр}} = 1.25 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} .$$

Відношення $[\sigma]_{20}/[\sigma]$ приймаємо для елементів кожної порожнини апарата із тих матеріалів, для яких воно є найменшим.

Для трубного простору при мінімальному відношенні допустимих напружин $[\sigma]_{20}/[\sigma] = 1.07$ пробний тиск складає

$$P_{\text{пр т}} = 1.25 \cdot P_{\text{т}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.25 \cdot 1 \cdot 1.07 = 1.338 \text{ [МПа]} .$$

Гідростатичний тиск при випробуванні трубного простору теплообмінника складає

$$P_{Г\text{тр}} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot H_{\text{с}} \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9.81 \cdot 1.12 \cdot 10^{-6} = 0.011 \text{ [МПа]},$$

де $H_{\text{с}}$ – висота стовпа води у трубному просторі (відстань між фланцями штуцерів у розподільній камері).

Гідростатичний тиск при випробуванні трубного простору

$$P_{Г\text{тр}} = 0.011 \leq 0.05 \cdot P_{\text{пр т}} = 0.05 \cdot 1.338 = 0.0669 \text{ [МПа]}$$

$P_{Г\text{тр}}$ складає менше 5% від пробного, тому за розрахунковий тиск в умовах випробувань приймаємо пробний

$$P_{\text{і т}} = P_{\text{пр т}} = 1.338 \text{ [МПа]} .$$

Умова

$$P_{\text{і т}} = 1.338 \text{ [МПа]} \leq 1.35 \cdot P_{\text{т}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 1 \cdot 1.07 = 1.44 \text{ [МПа]} .$$

виконується, тому розрахунок елементів трубного простору в умовах гідравлічних випробувань проводити не потрібно.

Для міжтрубного простору (кожуха) при відношенні допустимих напружин $[\sigma]_{20}/[\sigma] = 1.003$ пробний тиск складає

$$P_{\text{пр к}} = 1.25 \cdot P_{\text{к}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.25 \cdot 0.5 \cdot 1.003 = 0.627 \text{ [МПа]} .$$

Гідростатичний тиск при випробуванні міжтрубного простору

$$P_{Г\text{к}} = \rho_{\text{в}} \cdot g \cdot H_{\text{к}} \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9.81 \cdot 1.2 \cdot 10^{-6} = 0.012 \text{ [МПа]},$$

$$P_{Гк} = 0.012 \text{ [МПа]} \leq 0.05 \cdot P_{прк} = 0.05 \cdot 0.627 = 0.0314 \text{ [МПа]} .$$

$P_{Гк}$ складає менше 5% від пробного, тому за розрахунковий тиск в умовах випробувань приймаємо пробний

$$P_{ік} = P_{прк} = 0.627 \text{ [МПа]} .$$

Умова

$$P_{ік} = 0.627 \text{ [МПа]} \leq 1.35 \cdot P_k \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1.35 \cdot 0.5 \cdot 1.07 = 0.722 \text{ [МПа]}$$

виконується, тому розрахунок елементів міжтрубного простору в умовах гідравлічних випробувань проводити не потрібно.

Коефіцієнти міцності зварних швів

Трубний та міжтрубний простори теплообмінника за розрахунковим тиском, температурою та характером робочого середовища відноситься до 4 групи посудин, для якої довжина контрольованих швів складає не менш 25 % від їх загальної довжини кожного шва. Для стикових швів з двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичним зваренням, коефіцієнт міцності зварних швів приймаємо рівним $\varphi_p = 0.9$.

Для стикових (кільцевих) швів, які доступні зваренню лише з одного боку та мають в процесі зварення металеву підкладку з боку кореня шва, котра прилягає по всій довжині шва до основного металу, при контрольованій довжині швів 100 %, коефіцієнт міцності зварних кільцевих швів кожуха приймаємо рівним $\varphi_T = 0.8$.

Добавки до розрахункових величин

Суми добавок до розрахункових величин визначаємо за формулою

$$C = C_1 + C_2 ,$$

де C_1 – добавка для компенсації корозії та ерозії, [мм];

C_2 – добавка для компенсації мінусового допуску, [мм].

Добавку для компенсації корозії та ерозії C_1 розраховуємо за формулою

$$C_1 = П \cdot \tau + C_e \text{ [мм]},$$

де $П$ – швидкість проникнення корозії, [мм/рік];

τ – розрахунковий строк служби теплообмінника, [років];

C_e – добавка для компенсації ерозії, [мм].

Добавку для компенсації ерозії не враховуємо, приймаючи, що теплообмінник працює з чистими рідкими середовищами (без твердих абразивних частинок).

Швидкість проникнення корозії для матеріалу міжтрубного простору приймаємо $П_k = 0.05$ [мм/рік], а трубного – $П_t = 0$ [мм/рік].

Добавка для компенсації корозії складає:

– для труб з боку трубного та міжтрубного просторів

$$C_{1t} = 0 \text{ [мм]};$$

– для кожуха

$$C_{1k} = П_k \cdot \tau = 0.05 \cdot 10 = 0.5 \text{ [мм]}.$$

Добавку для компенсації мінусового допуску C_2 [мм], приймаємо за стандартом.

Розрахунок товщини стінки циліндричної обичайки кожуха теплообмінника

Розрахункову товщину стінки кожуха від дії внутрішнього тиску визначаємо за формулою

$$S_{p\kappa} = \frac{P_{\kappa} \cdot D}{2 \cdot [\sigma]_{\kappa} \cdot \varphi_p - P_{\kappa}},$$

де P_{κ} – розрахунковий тиск у міжтрубному просторі теплообмінника при розрахунковій температурі, [МПа];

D – внутрішній діаметр обичайки кожуха, [мм];

φ_p – коефіцієнт міцності подовжніх зварних швів.

$$S_{p\kappa} = \frac{0.5 \cdot 159}{2 \cdot 153 \cdot 0.9 - 0.5} = 0.289 \text{ [мм]}.$$

Відповідно до галузевого стандарту виконавчу товщину стінки кожуха приймаємо рівною $S_p = 8$ [мм].

Виконавчу товщину стінки кожуха визначаємо за формулою

$$S_{\kappa} \geq S_{p\kappa} + C_{\kappa} = 0.3 + 0.5 = 0.8 \text{ [мм]}.$$

Остаточну приймаємо виконавчу товщину стінки кожуха рівною $S_{\kappa} = 8$ [мм].

Допустимий внутрішній надлишковий тиск в кожусі визначаємо за формулою

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S - C)}{D + (S - C)} = \frac{2 \cdot 153 \cdot 0.9 \cdot (8 - 0.5)}{159 + (8 - 0.5)} = 12.4 \text{ [МПа]}.$$

Умова міцності

$$P_k = 0.5 \leq [P]_k = 12.4 \text{ [МПа]}$$

виконується.

Умова застосування розрахункових формул

$$\frac{S - C}{D} = \frac{8 - 0.5}{159} = 0.05 \leq 0.1$$

виконується.

12 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ В ЛАБОРАТОРІЇ

Правила з безпеки життєдіяльності при роботі у комп'ютерних лабораторіях

12.1 Загальні положення

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

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

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

12.1.4 Дотримання цієї інструкції обов'язково.

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

12.1.6 Вимоги до приміщення:

а) приміщення, обладнане комп'ютерною технікою, має мати підлоги з поверхнею, пристосованої до вологого прибирання;

б) вікна повинні мати регульовані жалюзі або штори.

12.1.7 Вимоги до освітлення приміщень та робочих місць:

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

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

12.1.8 Вимоги до мікроклімату:

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

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

12.1.9 Вимоги до обладнання та організації робочого місця:

а) основним обладнанням робочого місця з персональним комп'ютером є монітор, клавіатура, стілець (крісло), робочий стіл, допоміжним – 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 МОПП і студентів при роботі на персональному комп'ютері, приладах і другим 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 частина загальної технологічної схеми, а саме, схеми підключення проміжного теплообмінника;
- визначили оптимальні параметри проміжного теплообмінника.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Основи наукових досліджень: конспект лекцій / укладач Е.В. Колісніченко. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 83 с.
2. Псевдооживление / Под ред. В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова. - М.: Химия, 1991. - 400 с.
3. Дэвидсон Дж., Харрисон Д. Псевдооживление: Пер. с англ. - М.: Химия, 1974. - 725 с.
4. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления, М., 1967. – 664 с.
5. Конструювання та розрахунків кожухотрубчастих теплообмінних апаратів /Укл. В.В. Іванченко, О.І Барвін, Ю.М Штонда: – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 2006. – 208 с.
6. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романенков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М., Атомиздат, 1978, 232 с.
7. Гликин М.А. Гетерогенный газофазный аэрозольный нанокатализ: монография / М.А. Гликин, И.М. Гликина. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХП»», 2015.–472 с.
8. Теплопередача в машинах и аппаратах химических производств (ТП МАХП): Методические указания выполнению контрольной работы «тепловой расчет кожухотрубчатых теплообменных аппаратов» для студентов специальности 7.090220 (второе электронное издание) /Сост. В.Б.Модестов. - Северодонецк: Издательство ТИ, 2010. – 55 с.
9. ГОСТ 28759.1-90 – ГОСТ 28759.8-90. Фланцы сосудов и аппаратов и прокладки к ним. Конструкция и размеры. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1991. – 97 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 сер	Квадрати різниць	Інтервальні дисперсії S_j^2	Інтервальна відносна дисперсія G_j	Табличне значення критерія Кохрена
2605,81	19627,23	49883,37	0,0329	0,2171
	19627,23			
	113052,86			
	63592,24			
	63592,24			
	63592,24			
	113052,86			
	3140,36			
	3140,36			
	63592,24			
	19627,23			
	19627,23			
	19627,23			
	63592,24			
2893,01	60108,40	67691,31	0,0446	
	2404,34			
	117812,47			
	194751,22			
	2404,34			
	117812,47			

	117812,47		
	60108,40		
	117812,47		
	21639,02		
	2404,34		
	2404,34		
	2404,34		
	60108,40		
	137832,24		
	441,61		
	137832,24		
	170806,00		
	441,61		
	170806,00		
3159,19	137832,24	77202,97	0,0509
	441,61		
	74632,55		
	47154,43		
	30667,55		
	47154,43		
	441,61		
	47154,43		
	226890,82		
3446,39	44161,27	103360,03	0,0681
	78508,93		

	254368,94		
	78508,93		
	94995,81		
	143082,53		
	196,27		
	143082,53		
	44161,27		
	33170,02		
	94995,81		
	12561,43		
	94995,81		
	371396,32		
	137832,24		
	170806,00		
	137832,24		
	47154,43		
	137832,24		
3705,57	170806,00	133427,44	0,0879
	441,61		
	99362,87		
	137832,24		
	47154,43		
	137832,24		
	441,61		
	137832,24		

3978,76	397451,47	187485,37	0,1235
	200982,87		
	188617,71		
	200982,87		
	113052,86		
	122670,21		
	188617,71		
	3140,36		
	188617,71		
	298530,22		
	113052,86		
	200982,87		
	19627,23		
	200982,87		
	4258,96		
113052,86			
200982,87			
283417,25			
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		
	117812,47		
	117812,47		
4756,30	406332,79	156466,79	0,1031
	117812,47		
	194751,22		
	290924,66		
	117812,47		

	21639,02		
	290924,66		
	117812,47		
	60108,40		
	2404,34		
	60108,40		
	74632,55		
	14180,68		
	14180,68		
	261483,81		
	74632,55		
	99362,87		
5022,49	442839,45	160060,09	0,1055
	442839,45		
	5937,24		
	500543,51		
	30667,55		
	99362,87		
	5937,24		
	14180,68		
	78508,93		
	78508,93		
5407,75	254368,94	95962,07	0,0632
	254368,94		
	196,27		

	196,27		
	226890,82		
	226890,82		
	44161,27		
	44161,27		
	12561,43		
	12561,43		
	7065,80		
	7065,80		

ДОДАТОК В

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

Табличне значення критерію г – 2,493

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