НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»

ІНЖЕНЕРНО - ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
«___» _____20_ р

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»

з спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: Автоматизація процесу конверсії окису вуглецю в низькотемпературному конверторі

Виконав: студент **4** курсу, групи **ЛА-01**

Кучеренко Максим Вікторович _____

Керівник: доцент, к.т.н., доцент Абрамова Алла Олександрівна _____

Консультант з охорони праці к.т.н., ст. вик. Ковтун А. І. _____

Рецензент: доцент, к.т.н. , доцент Джигирей Ірина Миколаївна _____

Засвідчую, що в цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань
Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо - професійна програма «Технічні та програмні засоби автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Віталій ЦАПАР
«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту
Кучеренку Максиму Вікторовичу

1. Тема проекту Автоматизація процесу конверсії окису вуглецю в низькотемпературному конверторі,

керівник проекту Абрамова Алла Олександрівна, к.т.н., доцент,

затверджені наказом по університету від «17»квітня 2024 р. №1993-с

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту _____
_____
_____
_____

4. Зміст пояснювальної записки _____
_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____
_____
_____

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Ковтун А. І., ст. викл., к.т.н		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання на дипломний проект	12.02	Виконано
2	Розробка календарного плану та сіткового графіка виконання дипломного проекту.	04.03	Виконано
3	Ознайомлення з технологічним процесом конверсії окису вуглецю на низькотемпературному конверторі. Вивчення допоміжної літератури.	11.03	Виконано
4	Розрахунок матеріального балансу процесу конверсії окису вуглецю	04.04	Виконано
5	Розроблення та проектування автоматизації технологічного процесу. Креслення ФСА.	16.04	Виконано
6	Математичне моделювання процесу та синтез системи керування.	22.05	Виконано
7	Розробка програмного забезпечення в середовищі PyCharm.	27.05	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки.	04.06	Виконано
9	Попередній захист.	10.06	Виконано

Студент _____ Максим КУЧЕРЕНКО

Керівник проєкту _____ Алла АБРАМОВА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 67 с., 19 рисунків, 4 таблиці, 4 додатки, 20 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП’ЮТЕРНИЙ РОЗРАХУНОК, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ПРОГРАМНИЙ ЗАСТОСУНОК, КОНВЕРСІЯ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ, КОНТРОЛЬ, НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИЙ КОНВЕРТОР, СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, ОБ’ЄКТ КЕРУВАННЯ, ОХОРОНА ПРАЦІ.

Мета роботи – проведення дослідження та автоматизації процесу конверсії окису вуглецю в низькотемпературному конверторі.

Виконано проект конверсії оксиду вуглецю в низькотемпературному конверторі.

В проекті наведена технологічна схема та її опис. Виконано комп’ютерний розрахунок матеріальних балансів процесу. Проведене математичне моделювання та синтез системи керування технологічного процесу. Виконана автоматизація технологічного процесу конверсії окису вуглецю та підібрана контрольно-вимірювальна апаратура. Досліджено питання безпеки охорони праці.

SUMMARY

The explanatory note contains 67 pages, 19 figures, 4 tables, 4 appendices, and 20 references.

AUTOMATION, COMPUTER CALCULATION, MATHEMATICAL MODEL, SOFTWARE APPLICATION, CARBON MONOXIDE CONVERSION, CONTROL MANAGEMENT, LOW-TEMPERATURE CONVERTER, AUTOMATION SCHEME, CONTROL OBJECT, OCCUPATIONAL SAFETY

The aim of the work is to study and automate the process of carbon monoxide conversion in a low-temperature converter.

A project for the conversion of carbon monoxide in a low-temperature converter has been developed.

The project contains a technological scheme and its description. A computer calculation of the material balances of the process was performed. The mathematical modeling and synthesis of the process control system was carried out. Automation of the technological process of carbon monoxide conversion was performed and control and measuring equipment was selected. The issue of labor protection safety was investigated.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ 8
ВСТУП 9
1 ОПИС ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ПРОЦЕСУ КОНВЕРСІЇ ОКИСУ ВУГЛЕЦЮ 11
1.1 Фізико-хімічні основи та термодинаміка процесу 11
1.2 Технологічна схема та опис процесу конверсії оксиду вуглецю 12
2. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КОНВЕРСІЇ ОКИСУ ВУГЛЕЦЮ НА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КОНВЕРТОРІ 14
2.1 Аналіз технологічної схеми конверсії оксиду вуглецю 14
2.2 Розробка схеми автоматизації 17
2.3 Опис схеми автоматизації 19
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНВЕРСІЇ ОКИСУ ВУГЛЕЦЮ НА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КОНВЕРТОРІ 23
3.1 Теоретичні засади розрахунку матеріального балансу 23
3.2 Розрахунок матеріального балансу процесу конверсії окису вуглецю в низьтемпературному конверторі в ChemCAD 25
3.3 Моделювання процесу конверсії окису вуглецю в MathCad 27
4 СИНСТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB-SIMULINK 35
5. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОНВЕРТОРА 38
6.ОХОРОНА ПРАЦІ 42
6.1 Виявлення та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів. ... 42
6.2 Захист від виробничого шуму та вібрацій 44
6.3 Електробезпека 45
6.4 Пожежна небезпека 46
ВИСНОВКИ 48

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 49
ДОДАТОК А. 51
ДОДАТОК Б. 54
ДОДАТОК В. 59
ДОДАТОК Г 66

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

CO – оксид вуглецю;

R – стала газова константа;

U – об'ємна швидкість;

k1 – константа швидкості реакції;

T – температура в реакторі;

P – загальний тиск в реакторі;

P_{CO} – парціальний тиск оксиду вуглецю;

P_{H_2} – парціальний тиск водню;

P_{H_20} – парціальний тиск води;

τ – час перебування потоку в реакторі;

h – крок інтегрування;

ГДК – гранично допустима концентрація речовини;

C – фактична концентрація речовин в атмосферному повітрі;

КНП – коефіцієнт небезпечності підприємства.

ВСТУП

Технологічний газ, придатний для синтезу аміаку, метанолу або інших промислових потреб, можна отримати з різноманітної вуглеводневої сировини, такої як природний газ, попутні гази нафтодобування, гази переробки нафти, кам'яне та буре вугілля, а також з води.

Однак не кожен хімічний процес, що утворює водень, може бути використаний для промислового виробництва. Економічність методу визначається доступністю та низькою вартістю сировини, можливістю її переробки з високим виходом продукту потрібної якості без утворення відходів.

Серед промислових хімічних методів отримання водню знаходяться залізопаровий метод, конверсія оксиду вуглецю (II) з водяною парою та конверсія вуглеводнів з різними окислювачами (O2, H2O, CO2) [1].

На сьогодні процес конверсії оксиду вуглецю є надзвичайно важливим. Він застосовується для отримання чистого водню та азото-водневої суміші, метанолу, рідких вуглеводнів. Метанол, як відомо, потрібен промисловості в мільйонах тонн та може стати основним джерелом бензину. Водень як невід’ємний елемент виготовлення аміаку.

У довгостроковій перспективі діоксид вуглецю, за наявності потужних джерел дешевого водню, може стати основним, а можливо й єдиним, сировинним джерелом для промислового органічного синтезу. У цьому випадку, ймовірно, знайдуть застосування як традиційні хімічні та каталітичні процеси, так і фотохімічні й біохімічні методи. Основним компонентом нової системи органічної технології на базі CO_2 є наявність потужної водневої технології.

Синтез на основі метану має величезний практичний і теоретичний інтерес, оскільки дозволяє отримувати цінні органічні сполуки з природного газу без попередньої обробки. Вже сьогодні освоєно промислове виробництво значної кількості важливих продуктів з метану, таких як хлоровмісні розчинники, сірковуглець та синильну кислоту. Під час піролізу метану отримують ацетилен і етилен.

Каталітична конверсія метану з водяною парою є основним методом виробництва водню та синтез-газу (суміш CO і H2 у різних співвідношеннях).

Нові нетрадиційні методи отримання синтез-газу з метану, такі як електрохімічне окислення або конверсія з вуглекислим газом у термодифузійному реакторі, знаходяться на стадії дослідницького вивчення.

1. ОПИС ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ПРОЦЕСУ КОНВЕРСІЇ ОКИСУ ВУГЛЕЦЮ

1.1 Фізико-хімічні основи та термодинаміка процесу

Конверсія газів – це процес переробки газів, основною метою якого є зміна складу початкової газової суміші. Перетворюють в більшості випадків вуглеводні (метан та його гомологи) і окис вуглецю з валентність II з якого добувають водень або його суміші. Ці суміші використовуються для синтезу органічних продуктів, як гази відновники в металургії або проходять далі по виробництву для отримання чистого водню.

Процес конверсії оксиду вуглецю описується рівнянням:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2$$

Конверсія газів у промисловості здійснюється на каталізаторах у температурному інтервалі від 200 до 500 °С під тиском від 0,1 до 3,0 МПа. Процес конверсії оксиду вуглецю (СО) проходить без зміни об'єму, тому до певної межі тиск не впливає на рівноважну ступінь перетворення. Для тиску до 5 МПа під час розрахунку рівноважних вмістів компонентів можуть бути використані значення їх парціальних тисків або концентрацій [1-4].

Рівноважний вміст оксиду вуглецю в конвертованому газі розраховують за значенням константи рівноваги реакції.

$$K_\rho = \rho_{CO2}\,\rho_{H2} \,/\, \rho_{CO}\,\rho_{H2O}$$

де ρ_{CO2}, ρ_{H2}, ρ_{CO}, ρ_{H2O} – рівноважні парціальні тиски відповідних компонентів).

При розрахунках для промислового використання процесу конверсії зазвичай використовують концентрації компонентів у сухому газі, а вміст водяних парів виражають співвідношенням пар:газ (відношення об'ємів водяного пару і сухого газу). Це дозволяє точніше оцінити реакційні умови і результати, оскільки вміст водяних парів може значно впливати на рівноважний стан системи.

1.2 Технологічна схема та опис процесу конверсії оксиду вуглецю

Технологічний процес конверсії оксиду вуглецю з водяною парою проходить у два етапи:

- I – на середньотемпературному залізохромовому каталізаторі;
- II – на низькотемпературному мідьвмісному каталізаторі.

В агрегатах аміаку технологічний газ після казана-утилізатора і підігрівача азотно-водневої суміші, що пройшов конверсію метану при 486 °С, надходить в охолоджувач газу II ступеню. Газ охоловши до температури 375 °С проходить зволожувач перед середньотемпературною конверсією 2 з відношенням

пари/газ = 0,565 та надходить у конвертор 9 оксиду вуглецю I ступеню. На середньотемпературному каталізаторі при об'ємній швидкості 2010 год$^{-1}$ вміст

оскиду вуглецю зменшується з 11-12% на вході до 3,5% на виході. Наступним кроком конвертована парогазова суміш при температурі 436 °С надходить в охолоджувач газу III – ступеню, де прохолоджується до температури 310 °С. Охолоджений газ надходить у зволожувач перед низькотемпературною конверсією 3, де додатково насичується водяною парою до відношення пара/газ=0,63 і охолоджується до 237 °С. Після охолодження газ надходить до конвертора 4 оксиду вуглецю II – ступеню, де на низькотемпературному каталізаторі при об'ємній швидкості 2030 год$^{-1}$ відбувається більш глибока конверсія парогазової суміші. На виході ми отримує газ із вмістом СО не більше 0,4%.

Конвертований газ надходить в охолоджувач де охолоджується до температури 174 °С.

Перед насосом газового конденсату установлений фільтр для очищення конденсату від пилу та інших домішок.

Схема конверсії оксиду вуглецю зображена на рис. 1.1

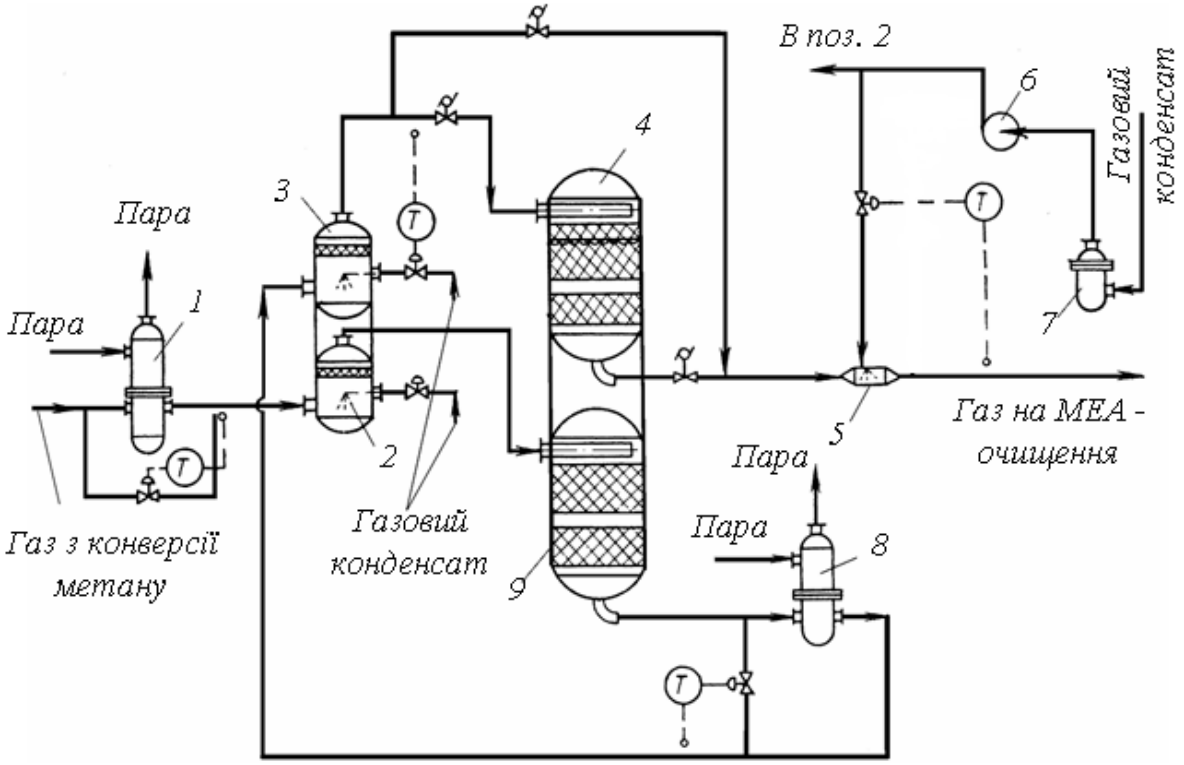


Рисунок 1.1 – Схема конверсії оксиду вуглецю

1 – охолоджувач газу II – ступеню; 2 – зволожувач перед середньотемпературною конверсією; 3 – зволожувач перед низькотемпературною конверсією; 4 – конвертор СО II – ступеню; 5 – охолоджувач конвертованого газу; 6 – відцентровий насос конденсату на впорскування; 7 – фільтр газового конденсату; 8 – охолоджувач газу III – ступеню; 9 – конвертор СО I – ступеню.

2. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КОНВЕРСІЇ ОКИСУ ВУГЛЕЦЮ НА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КОНВЕРТОРІ

2.1 Аналіз технологічної схеми конверсії оксиду вуглецю

Комплексна автоматизація процесів хімічної технології включає не тільки автоматичне підтримання нормального ходу процесів за допомогою різних автоматичних пристроїв (регулювання, контролю), але й автоматичне управління запуском і зупинкою апаратів для монтажних робіт та в інших ситуаціях.

Створення ефективних систем автоматизації вимагає глибокого вивчення технологічного процесу не лише проектувальниками, а й спеціалістами з монтажу, налагодження та експлуатації[5-9].

Проаналізувавши технологічну схему процесу конверсії оксиду вуглецю, критерієм ефективності обрано отримання цільового продукту в заданій кількості з необхідними якісними показниками.

На якість кінцевого продукту впливає температура в апараті низькометпературної конверсії СО I – ступеню, котру необхідно підтримувати в заданих межах. Ця задача вирішується регулюванням температури на виході зі зволожувача газу перед середньотемпературною конверсією конверсією.

Також впливає на процес температура в апараті низькотемпературної конверсії СО II-ступеня, яку потрібно тримати в заданих межах. Дана задача вирішується регулюванням температури на виході зі зволожувача перед низькотемпературною конверсією.

Для якості конвертованого газу необхідно підтримувати температуру в межах,необхідних для якісного протікання роцесу. Це завдання вирішується шляхом регулювання температури на виході з блоку охолодження конвертованого газу.

Для правильного функціонування технологічного процесу конверсії оксиду вуглецю потрібно таке.

- Контролювати витрату газової суміші на вході в процес.

- Контролювати та регулювати температуру газової суміші на виході з теплообмінника 1.
- Контролювати температуру газової суміші в конверторі СО I – ступеню.
- Контролювати концентрацію СО на виході з конвертора СО I – ступеню.
- Контролювати та регулювати температуру газової суміші на виході з теплообмінника 2.
- Контролювати температуру газової суміші в конверторі СО II – ступеню.
- Контролювати концентрацію СО в конвертованому газі на виході з конвертора СО II – ступеню.
- Контролювати тиск в трубопроводі води.
- Контролювати та регулювати витрату H2O на вході в зволожувач 3.
- Контролювати та регулювати витрату H2O на вході в зволожувач 4.
- Контролювати витрату кінцевого продукту на виході з системи.
- Контролювати тиск в конверторі СО I – ступеню.
- Контролювати тиск в конверторі СО II – ступеню.

На основі проведеного аналізу вибрано параметри, їх норми та місце заміру параметрів.

Дані наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри регулювання та контролю виробництва

№ п/п	Місце заміру параметру на технологічному об'єкті	Параметр, що вимірюється або регулюється	Норми технологічного режиму та допустимі відхилення	Вимоги до схеми автоматизації
1	Трубопровід на вході в технологічний процес	витрата	101309,87 м3/год ± 100 м3/год	Контроль, реєстрація
2	Трубопровід на виході з охолоджувача II ступеня	температура	375 °С, ± 3 °С	Контроль, регулювання
3	Трубопровід на виході зі зволожувача 1	температура	365 °С, ± 3 °С	Контроль, регулювання
4	В конверторі СО I - ступеню	температура	436 °С, ± 3 °С	Контроль
5	Трубопровід на виході з конвертора СО I - ступеню	концентрація	3,5%, ± 1 %	Контроль, сигналізація
6	Трубопровід на виході з охолоджувача III ступеня	температура	310 °С, ± 3 °С	Контроль, регулювання
7	Трубопровід на виході зі зволожувача 2	температура	237 °С, ± 3 °С	Контроль, регулювання
8	В конверторі СО II - ступеню	температура	249 °С, ± 3 °С	Контроль
9	Трубопровід на виході з конвертора СО II - ступеню	концентрація	0,4%, ± 1 %	Контроль, сигналізація
10	Трубопровід на виході з охолоджувача конвертованого газу	температура	174 °С, ± 3 °С	Контроль та регулювання
11	Трубопровід на виході з охолоджувача конвертованого газу	Витрата	51205 $м^3$/год ± 100 $м^3$/год	Контроль та реєстрація
12	Трубопровід на вході в зволожувач 2	Витрата	51205 $м^3$/год ± 100 $м^3$/год	Контроль та регулювання
13	Трубопровід на вході в зволожувач 1	Витрата	51205 $м^3$/год ± 100 $м^3$/год	Контроль та регулювання
14	В конверторі СО I - ступеню	Тиск	3,3 МПа ±0,05 МПа	Контроль, сигналізація
15	В конверторі СО II - ступеню	Тиск	3,3 МПа ±0,05 МПа	Контроль, сигналізація
16	Фільтр 1	Перепад тиску	0,6 МПа ±0,05 МПа	Індикація
17	Фільтр 2	Перепад тиску	0,6 МПа ±0,05 МПа	Індикація

2.2 Розробка схеми автоматизації

Функціональні схеми автоматизації є ключовими технічними документами, що описують функціонально-блочну структуру вузлів автоматичного контролю, керування та регулювання технологічного процесу, а також оснащення об’єкта керування приладами та засобами автоматизації. Це включає засоби телемеханіки та обчислювальної техніки. Об'єктами керування в системах автоматизації технологічних процесів є основне та допоміжне устаткування, запірні і регулювальні органи, вмонтовані в нього, а також енергія, сировина та інші матеріали, які визначаються особливостями технології.

При розробці схем автоматизації технологічних процесів необхідно забезпечити:

- збір початкової інформації про стан хімічні властивості технологічного процесу;
- збір початкової інформації про фізичні властивості технологічного процесу та обладнання;
- контроль технологічних параметрів процесу та стану обладнання [6].

Зазначені завдання виконуються на основі аналізу умов експлуатації технологічного устаткування, виявлених законів та критеріїв керування об'єктом, а також вимог до точності контролю і реєстрації технологічних параметрів, якості регулювання та надійності.

Схеми автоматизації зазвичай реалізуються за допомогою різних технічних засобів, зокрема: відбірних пристроїв, засобів збору первинної інформації, засобів перетворення та обробки інформації, засобів подання інформації обслуговуючому персоналу, а також комбінованих, комплектних та допоміжних пристроїв.

Засоби автоматизації підбирають з урахуванням особливостей технологічного режиму та його параметрів. В першу чергу необхідно звернути увагу на пожежну та вибухову небезпеку процесу, агресивність і токсичність середовища, кількість параметрів, які беруть участь в управлінні, їх фізико-хімічні властивості, відстань передачі сигналів і керуючих впливів, необхідну точність і швидкодію.

Ці фактори визначають вибір методів вимірювання технологічних параметрів, необхідні функціональні можливості регуляторів і приладів, діапазони вимірювання, класи точності та вид дистанційної передачі [7].

Для контурів регулювання температури найкраще підходить термопара та перетворювач, оскільки вони мають необхідний діапазон вимірювальних температур і можуть передавати уніфікований сигнал на відстань. Ці прилади призначені для вимірювання температури у рідких, газоподібних та сипучих речовинах і застосовуються у різних галузях промисловості. Основною частиною термопари є чутливий елемент, який складається з двох різнорідних металів, з'єднаних між собою: хромель-алюмель (тип K), мідь-константан (тип T) та залізо-константан (тип J).

Для вимірювання витрат рідин і газів використовуються різні типи витратомірів, зокрема вихрові та електромагнітні витратоміри.

Вихрові витратоміри працюють на принципі утворення вихрів за обтічним тілом, яке розміщується у потоці рідини або газу. Кількість вихрів, що утворюються, пропорційна швидкості потоку, і, відповідно, витраті. Ці прилади можуть використовуватися в різних галузях промисловості для вимірювання витрати рідких і газоподібних середовищ. Вихрові витратоміри характеризуються високою точністю вимірювань, широким діапазоном робочих температур і відсутністю рухомих частин, що зменшує їх потребу в обслуговуванні.

Електромагнітні витратоміри використовують принцип електромагнітної індукції для вимірювання витрати провідних рідин. Коли рідина протікає через магнітне поле, яке створюється котушками, виникає електрорушійна сила, пропорційна швидкості потоку. Ця електрорушійна сила вимірюється електродами, встановленими на внутрішній поверхні труби. Електромагнітні витратоміри не мають рухомих частин і забезпечують високу точність вимірювань. Вони застосовуються для вимірювання витрати різних провідних рідин, включаючи агресивні та забруднені середовища, і використовуються в багатьох галузях промисловості, таких як водопостачання, хімічна та харчова промисловість [8].

Обидва типи витратомірів дозволяють передавати уніфіковані сигнали на відстань, що робить їх зручними для використання в автоматизованих системах керування технологічними процесами.

2.3 Опис схеми автоматизації

2.3.1 Регулювання температури

Для контурів 2, 3, 6, 7, 8, 10, де температура не перевищує 400 градусів, була обрана термопара Endress+Hauser iTHERM ModuLine TM131 PT100 TF з робочим діапазоном температур -50 °C ...400 °C. Даний датчик температури застосовується для важких промислових застосувань за умов підвищених вимог до безпеки. Області застосування: нафтовидобуток, нафтопереробка, газопереробка, хімія та нафтохімія. Термоперетворювач призначений для прямого контакту з процесом або для монтажу з окремою термогільзою для захисту чутливого елемента від механічних та корозійних впливів. Для підвищення надійності вимірювання температури термопара опціонально комплектується нормуючим перетворювачем з різними типами протоколу передачі даних [9].

Для контуру 4, де температура становить 436 градусів була обрана термопара Endress+Hauser iTHERM ModuLine TM131 PT100 TF StrongSens робочим діапазоном температур -50 °C ...500 °C.

В якості регулятора для контурів 2, 3, 6, 7, 10 був обраний електричний регулятор МТП-138 «Мікрол», який передає сигнал на електричний виконавчий механізм.

Для контролю температури був обраний показуючий та реєструючий пристрій ІТМ-310А «Мікрол».

2.3.2 Регулювання витрати

Для контурів 1 та 11 був обраний вихревий витратомір Endress+Hauser, Proline Prowirl F 200 для контролю та реєстрація витрати на вході в процес, а також на виході.

Prowirl F - це багатоваріантний витратомір з вбудованим вимірюванням вологості. Його опція калібрування PremiumCal гарантує відмінну точність вимірювань і найвищу експлуатаційну готовність установки при низьких витратах газу, пари і рідин. Завдяки оригінальній технології живлення від контуру, Prowirl F 200 забезпечує економічно ефективну і безперешкодну інтеграцію в існуючу інфраструктуру. Він забезпечує найвищу експлуатаційну безпеку в небезпечних зонах.

Для контролю та реєстрації витрати в контурі 11 був обраний показуючий та реєструючий пристрій ITM-310A «Мікрол» [10].

Для контурів 12, 13 був обраний електромагнітний витратомір Proline Promag P 10 для контролю та регулювання витрати води на входах у зволожувачі.

Витратоміри серії Promag призначені для всіх основних застосувань у сфері водопостачання. Завдяки простому апаратному і програмному забезпеченню, Promag D 10 спрощує кожен етап життєвого циклу від проектування до обслуговування.

В якості регуляторів для контурів1, 12, 13 був обраний електричний регулятор МТП-138 «Мікрол», який передає сигнал на електричний виконавчий механізм.

2.3.3 Регулювання концентрації

Для контролю, реєстрації та сигналізації концентрації окису вуглецю (відповідно 3,5 та 0,4) в контурах 5 та 9 було обрано програмований концентратомір LCI-KL50KPF, який призначений для безперервного моніторингу питомої елект-

ричної провідності (УЕП) і температури середовищ з подальшим перетворенням в значення концентрації речовини у відповідність із заздалегідь заданою залежністю. Датчик приладу з плоскими електродами, безпосередньо врізається в трубопровід, або стінку судини, не створюючи перешкод потоку рідині. Діапазон вимірювання 0,005 - 20 мг/дм, діапазон встановлення меж ± 2,5%, вихідний сигнал 4-20мА. Сигналізація позначена лампами HL1, HL2, HL3, HL4.

Для контролю та реєстрації концентрації речовин в газовій суміші в контурах 5, 9 був обраний показуючий та реєструючий пристрій ІТМ-310А «Мікрол».

2.3.4 Регулювання тиску

Для контролю та сигналізації тиску контурів 14 та 15 з робочим тиском 3,3 мПа був обраний перетворювач тиску Endress+Hauser Cerabar PMP71B з робочим діапазоном до 40 бар.

Прилад Cerabar нового покоління - надійний перетворювач тиску. Можливе дистанційне керування перетворювачем через додаток SmartBlue і через Bluetooth. Програмне забезпечення розроблено з розрахунком на максимальну простоту використання. Інтуїтивно зрозумілий майстер налаштування допомагає виконати введення в експлуатацію та перевірку приладу.

Для контролю та реєстрації тиску в конверторі в контурах 14, 15 був обраний показуючий та реєструючий пристрій ІТМ-310А «Мікрол».

Для сигналізації були реалізовані лампи HL5, HL6, HL7, HL8.

Для контролю забруднення фільтрів вхідної води використаємо диференційний, показуючий, манометр Deltabar M PMD55.

Перетворювач диференціального тиску Deltabar M PMD55 з тензорезистивним сенсором і звареною металевою мембраною широко використовується у всіх галузях промисловості для безперервного вимірювання перепаду тиску рідин, па-

ри і газів. Меню швидкого налаштування з регульованим діапазоном вимірювання забезпечує просте пусконалагодження, скорочує витрати і економить час.

Широко застосовується для вимірювання рівня, об'єму або маси рідин, моніторинг диференціального тиску, наприклад у фільтрах і насосах, а також вимірювання витрати рідин, парів і газів (об'ємної або масової) у поєднанні зі звужувальними пристроями [5-10].

Розроблена схема автоматизації відповідає вимогам технічного регламенту та забезпечує підтримку основних технологічних параметрів у визначених межах.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНВЕРСІЇ ОКИСУ ВУГЛЕЦЮ НА НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОМУ КОНВЕРТОРІ

3.1 Теоретичні засади розрахунку матеріального балансу

Основу сучасного проектування нових і аналізу роботи існуючих хімічно-технологічних систем складає розрахунок матеріальних і енергетичних балансів в умовах стабільного стаціонарного технологічного режиму.

Основою матеріального балансу є закони збереження маси речовини і стехіометричних співвідношень.

Закон збереження маси речовини стверджує, що маса речовини, яка бере участь у хімічній реакції, залишається незмінною. Маса продуктів реакції завжди дорівнює масі реагентів, що взаємодіють між собою. Це означає, що всі атоми, які беруть участь у реакції, залишаються такими ж і просто перегруповуються для утворення нових сполук.

При побудові системи рівнянь балансів ХТС припускають, що система перебуває в стаціонарному технологічному режимі, а взаємодія між її елементами та навколишнім середовищем відбувається через певне число матеріальних і енергетичних фізичних потоків. У ХТС виділяють фізичні потоки двох видів: технологічні і умовні. Технологічні потоки забезпечують взаємозв'язок елементів між собою та взаємодію системи з навколишнім середовищем, що забезпечує цілеспрямоване функціонування ХТС. Умовні потоки відображають розсіювання (втрати) речовини або енергії ХТС у навколишнє середовище, а також різні матеріальні і енергетичні впливи зовнішнього середовища на функціонування ХТС. Властивості і-го фізичного потоку характеризуються набором наступних параметрів стану:

$$p_i = \{m_i; x_{i1}; x_{i2}; \dots; x_{ik}; P_i; H_i\}$$

де m_i – загальна масова витрата речовини;

x_{ik} – частка k-го хімічного компонента;

t_i – температура;

P_i – тиск;

H_i – витрата тепла.

Для розрахунку матеріальних і теплових навантажень на елементи ХТС необхідно виконати наступні операції [11-16].

1. Вивчити фізико-хімічну сутність технологічних процесів ХТС, а також принципи функціонування системи і її елементів при заданих технологічних умовах, технологічній топології й вхідних змінних системи.
2. Скласти докладну специфікацію величин, що відображають змінні й параметри ХТС, задані технологічні умови й константи, що характеризують фізико-хімічні властивості й стани речовин, що беруть участь у технологічних процесах. Ввести зручні символи для позначення цих величин. Перевести одиниці виміру всіх величин в одну систему.
3. Виразити функціональні зв'язки між змінними й параметрами ХТС у вигляді рівнянь матеріальних і теплових балансів (або рівнянь балансів узагальнених потоків) і рівнянь функціональних зв'язків.
4. Установити незалежність неявних функцій білінійних форм змінних і параметрів ХТС.
5. Виділити з безлічі невідомих, вхідних у систему рівнянь балансів, відповідно до технологічних умов і фізико-хімічною сутністю технологічних процесів підмножини незалежних (вільних) і залежних (базисних) змінних. Математично зазначена операція виділення вільних і базисних змінних збігається з операцією встановлення незалежних неявних функцій.
6. Визначити, відповідно до технологічних умов і фізико хімічної сутності технологічних процесів, чисельні значення вільних змінних.

7. Представити за допомогою спеціальних допущень і перетворень систему рівнянь балансів як сукупність лінійних рівнянь. Скласти програму рішення системи рівнянь на ЕОМ.
8. Оцінити порядок помилок і результати рішення системи рівнянь балансів на ЕОМ [11-14].

Матеріальний баланс може бути поданий у вигляді рівняння. Лівою частиною рівняння є все, що потрапляє на переробку ∑**G**, а права – отримані продукти ∑**G**’ та виробничі витрати ∑$\mathbf{G_{витр.}}$:

$$\sum G = \sum G' + \sum G_{\text{витр.}}$$

Даними для розрахунку матеріального балансу є:

- температура в апараті – 249 °С;
- газова стала – 8,31 Дж/(моль*К);
- об’ємна швидкість в апараті: 2030 $с^{-1}$
- концентрація СО – 0.035 %, Н2О – 0.306 %, СО2 – 0.104 %, Н2 – 0.42%;
- загальний тиск – $3*10^6$ Па.

3.2 Розрахунок матеріального балансу процесу конверсії окису вуглецю в низьтемпературному конверторі в ChemCAD

Для складання матеріального балансу схеми використовуємо дані, отримані в симуляторі ChemCAD. Цей програмний пакет призначений для моделювання в стаціонарному режимі, проектування хіміко-технологічних виробництв, контролю продуктивності обладнання, оптимізації та бізнес-планування в галузі видобутку й переробки вуглеводнів і нафтохімії.

Спочатку необхідно створити схему процесу конверсії оксиду вуглецю, потім задати початкові дані, встановити потрібну температуру та запустити симулятор, який розрахує склад кожного потоку та апарату окремо.

Весь процес моделювання у ChemCAD можна розбити на 5 кроків.

1. Вибір компонентів.
2. Вибір термодинамічних параметрів та хімічних реакцій.
3. Створення схеми.
4. Введення даних по потокам.
5. Запуск моделі.

Результуюча схема для моделювання наведена на рис. 3.1. Для створення схеми потрібно задати склад потоків. Також необхідно визначити для кожного апарату вхідні та вихідні потоки, температуру й тиск.

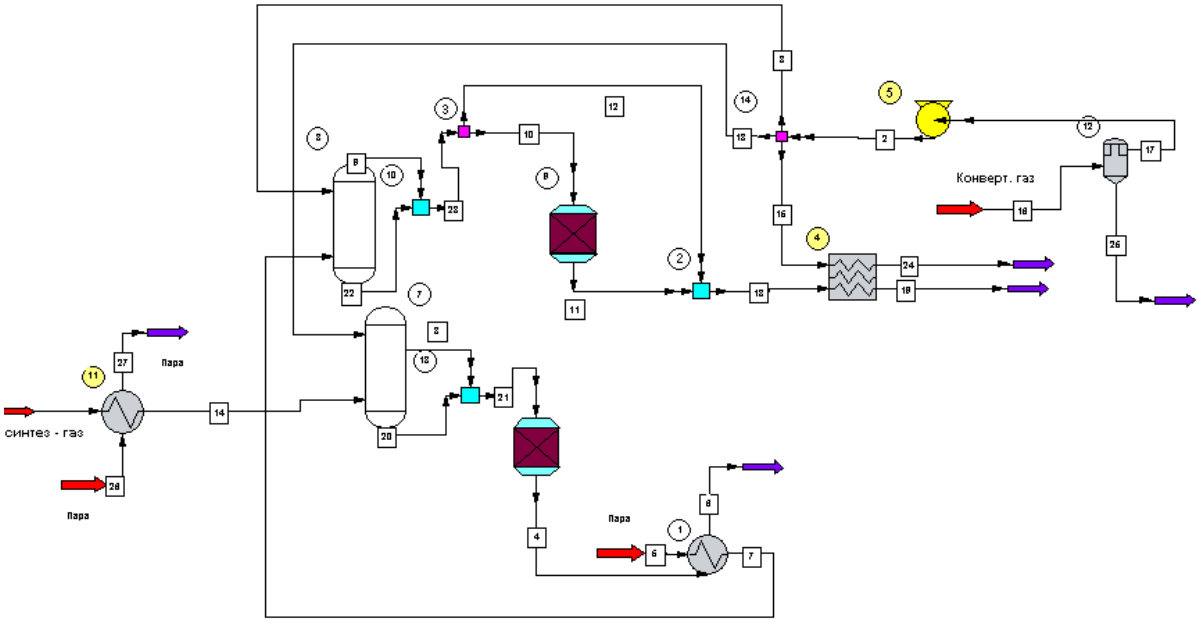


Рисунок 3.1 – Розроблена схема конверсії оксиду вуглецю в Chem CAD

Для запуску режиму симуляції необхідно натиснути кнопку “RUN”

Результати розрахунку матеріального балансу представлено у таблиці 3.2.1

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку матеріального балансу

Середньотемпературний конвертор	Прихід		Витрата	
	$м^3$/год;	%	$м^3$/год;	%
CO_2	6935,707	4,89	14750,79	10,4
CO	11204,93	7,9	3389,845	2,39
H_2	51670,31	36,43	59485,39	41,94
N_2	20282,33	14,3	20282,33	14,3
CH_4	283,669	0,2	283,669	0,2
H_2O	51202,25	36,1	43259,52	30,5
Сума	**141834,5**	**100**	**141834,5**	**100**
Низькотемпературний конвертор	Прихід		Витрата	
	$м^3$/год;	%	$м^3$/год;	%
CO_2	14751,95	10,4	17613,9	12,42
CO	3382,93	2,39	520,97	0,37
H_2	59486,48	41,94	62348,44	43,96
N_2	20282,79	14,3	20282,79	14,3
CH_4	290,01	0,2	290,01	0,2
H_2O	43386,54	30,59	40524,63	28,57
Сума	**141834,5**	**100**	**141834,5**	**100**

В ході виконання даної частини роботи був розрахований матеріальний баланс технологічної схеми. По таблицям вхідних та вихідних потоках матеріального балансу видно, що розрахунки було проведено правильно, тобто кількість речовини на вході та виході рівні.

3.3 Моделювання процесу конверсії окису вуглецю в MathCad

У промислових умовах процес конверсії оксиду вуглецю (II) проводять у два етапи.

На першому етапі використовують оксидний середньотемпературний залізо-хромовий каталізатор, підтримуючи температуру в діапазоні 710-740 К, що забезпечує високу інтенсивність процесу, хоча й неповний рівноважний ступінь перетворення СО. На другому етапі, з низькотемпературним каталізатором при 500-550 К і низькій концентрації СО на вході в конвертор, процес доводять майже до рівноваги. Така схема дозволяє підвищити ступінь перетворення оксиду вуглецю (II), зменшити витрату водяної пари і, таким чином, збільшити вихід основного продукту – водню [11-14].

Для правильного вибору технологічних параметрів процесу, розрахунку і проектування реакційних апаратів необхідно знати умови рівноваги та кінетичні закономірності СО на каталізаторі. Досліди В.І. Атрощенко та Б.Н. Бібра, які вивчали конверсію СО на залізо-хромовому каталізаторі, показали, що швидкість процесу описується рівнянням:

$$-\frac{dP_{CO}}{d\tau} = K\frac{(P - P'_{CO})P_{H2O}^{0.5}}{P_{H2}}$$

де K – константа швидкості реакції c^{-1};

P_{CO}, P_{H2}, P_{H2O}, - парціальні тиски відповідних компонентів, Па;

P – тиск, при якому здійснюється реакція, Па

Залежність константи швидкості реакції від температури визначається рівнянням:

$$K = 4{,}92 * 10^5 e^{-\frac{18450}{RT}} \ (c^{-1})$$

де R – стала газова константа R = 8,31 Дж/моль*К

Знаходимо концентрацію СО після реакції. Для цього переходимо від тиску (Па) до концентрацій (% об), використовуючи наступну залежність:

$$CO = \frac{P}{p}$$

де p – загальний тиск в системі = 3 МПа;

P – тиск CO після реакції, Па.

Концентрацію CO2 після реакції знаходимо за рівнянням:

$$CO_2 = \left(CO_{2\ \text{до реакції}} + CO_{\text{до реакції}}\right) - CO_{\text{після реакції}}$$

Дані про концентрацію CO2 та CO до реакції та CO після реакції отримані з матеріального балансу, % об.;

Проведемо розрахунок об'єму каталізатору:

$$V_{\text{кат}} = \frac{V_{\text{сух}}}{U}$$

де $V_{сух}$ – об'єм газу, що направляється на конверсію, $м^3$/год

U – об'ємна швидкість по сухому газу, $год^{-1}$

Знайдемо діаметр апарату:

$$d = \frac{V_{\text{сух}}}{U * 10}$$

Щоб знайти висоту шару каталізатору скористаємося наступною залежністю:

$$h = \frac{V_{\text{кат}}}{0{,}785 * d^2}$$

Обираємо апарат пошарового типу, а також знаходимо кількість та висоту слоїв відповідно до висоти шару каталізатору.

Проведемо розрахунок маси каталізатору:

$$m_{кат} = V_{кат} * W$$

де W – насипна щільність, кг/ дм^3

За стандартними розмірами для низькотемпературних конверторів вибираємо апарат з відповідними конструктивними параметрами (висота, товщина стінки та діаметр), що обираються відповідно до розрахованих параметрів.

Вихідними даними для математичного розрахунку низькотемпературного конвертора є температура, при якій проходить реакція та об'ємна швидкість в апараті.

Щоб провести розрахунок необхідно дотримуватися алгоритму.

1. Розраховується константа швидкості реакції.
2. Розраховуються парціальні тиски кожного компоненту.
3. Розрахунок математичної моделі.
4. Розрахунок конструктивних розмірів апарату.

Використаємо програмне середовище MathCad для розрахунку диференційного рівняння за методом Ейлера. Повний розрахунок наведений в додатку Б.

Результат обчислень має вигляд:

$$F(P) := \frac{-k1 \cdot (p - PCO) \cdot (PH2O)^{0.5}}{PH2}$$

Рисунок 3.2 – Диференційне рівняння

$$\begin{pmatrix} \tau_i \\ P_i \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \tau_{i-1} + \Delta\tau \\ P_{i-1} + F(P)\cdot\Delta\tau \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.3 – Розрахунок методом Ейлера

де k_1– константа швидкості реакції, c^{-1};

PCO, PH2O, PH2 – парціальні тиски відповідних компонентів, Па;

p – тиск, при якому здійснюється реакція, Па.

Розрахований тиск CO після реакції, Па:

P =

	0
0	$1.05\cdot10^5$
1	$1.046\cdot10^5$
2	$1.041\cdot10^5$
3	$1.037\cdot10^5$
4	$1.033\cdot10^5$
5	$1.029\cdot10^5$
6	...

Рисунок 3.4 – Розрахований тиск CO після реакції

Розрахуємо концентрацію CO %, на виході з реактора:

CO =

	0
0	0.024
1	0.024
2	0.024
3	0.024
4	0.023
5	0.023
6	0.023
7	0.023
8	...

Рисунок 3.5 – Розрахована концентрація CO після реакції

Значення концентрацій CO та CO_2 до реакції беремо з матеріального балансу.

Розрахуємо концентрацію CO_2 після реакції, % об. :

$$CO2 := (C3 + C1) - CO$$

Рисунок 3.6 – Розрахунок концентрації CO2 після реакції.

Значення концентрацій CO та CO_2 до реакцій беремо з матеріального балансу.

CO2 =

	0
0	0.104
1	0.104
2	0.104
3	0.104
4	0.105
5	0.105
6	0.105
7	...

Рисунок 3.7 – Розрахована концентрація CO2 після реакції

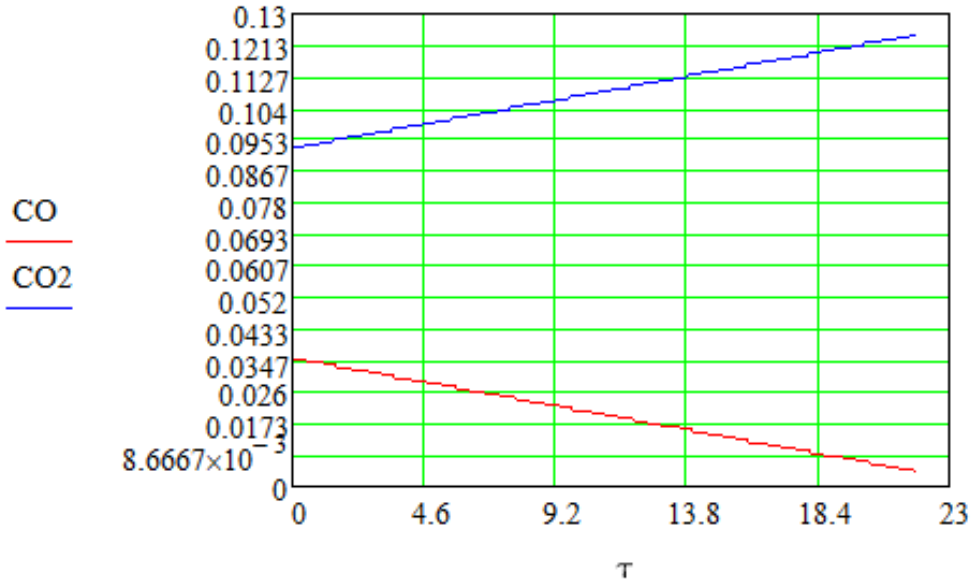


Рисунок 3.8 – Графік залежності концентрації CO та CO_2 від часу τ

де CO, CO_2 – концентрації оксиду вуглецю (II) та оксиду вуглецю (IV), % об.

τ – час досягнення заданої концентрації CO, сек.

Проведемо розрахунок об’єму каталізатору:

$$Vsux := 98447.9 \quad \frac{м3}{год}$$

$$Vkat := \frac{Vsux}{U}$$

$$Vkat = 48.497$$

Рисунок 3.9 – Розрахунок об’єму каталізатора.

Розрахунок діаметру апарату, м:

$$d := \frac{Vsux}{U \cdot 10}$$

$$d = 4.85 \quad м$$

Рисунок 3.10 – Розрахунок діаметру каталізатора.

Розрахунок висоти шару каталізатору, м:

$$h := \frac{Vkat}{0.785 \cdot d^2}$$

$$h = 2.627 \quad м$$

Рисунок 3.11 – Розрахунок висоти шару каталізатора.

Розрахунок маси каталізатору:

$w := 1.5$ кг/дм^3

$w1 := w \cdot 1000$

$w1 = 1.5 \times 10^3$ кг/м^3

$Mkat := Vkat \cdot w1$

$Mkat = 7.274 \times 10^4$ кг

Рисунок 3.12 – Розрахунок маси каталізатору

Виконавши дані розрахунки можна підібрати апарат з даними, відповідними, конструктивними параметрами.

4 СИНСТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB-SIMULINK

Використовуючи програмне забезпечення MATLAB-SIMULINK синтезовано системи керування з ПІ та ПІД регуляторами.

Рівняння динаміки для конвертора має вигляд:

$$-\frac{dP_{CO}}{d\tau} = K\frac{(P - P'_{CO})P_{H2O}^{0.5}}{P_{H2}}$$

де K – константа швидкості реакції c^{-1};

P_{CO}, P_{H2}, P_{H2O}, - парціальні тиски відповідних компонентів, Па;

P – тиск, при якому здійснюється реакція, Па.

Вхід – $G_{CO\ вхід}$, $G_{H2O\ вхід.}$

Вихід – $G_{CO2\ вихід.}$, $G_{H2\ вихід.}$

Передавальна функція за каналом «завдання - вихід» (концентрація $G_{CO\ вхід}$, $G_{H2O\ вхід}$ – концентрація $G_{CO2\ вихід.}$, G_{H2} вихід) має вигляд:

$$W_{G\text{вхід},G\text{вихід}}(s) = \frac{G_{CO\text{вх}} \cdot G_{CO2\text{вих}} + G_{CO2\text{вих}} \cdot G_{H2\text{вих}}}{G_{CO2\text{вих}} \cdot s + G_{H2\text{вих}} * V * p}$$

Підставляємо розраховані значення в передавальну функцію та спрощуємо так, щоб коефіцієнт перед s був одиницею для спрощення запису [15,16].

$$W_{G\text{вхід},G\text{вихід}}(s) = \frac{14.483}{5.762s + 3.458}$$

Використовуючи дану передатну функцію, синтезуємо та налаштовуємо за допомогою Matlab Simulink систему керування з ПІД та ПІ регуляторами.

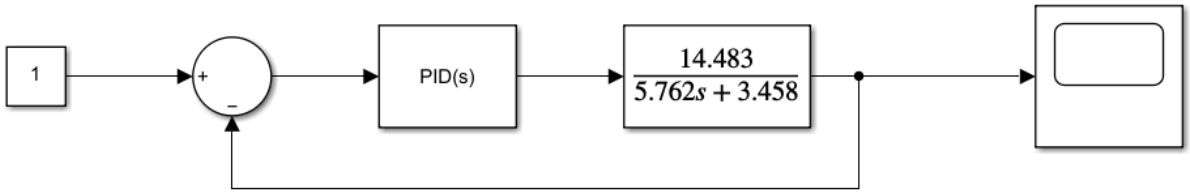


Рисунок 4.1 – Структурна схема системи керування з ПІД регулятором

За допомогою функції “Tune”, налаштовуємо регулятор.

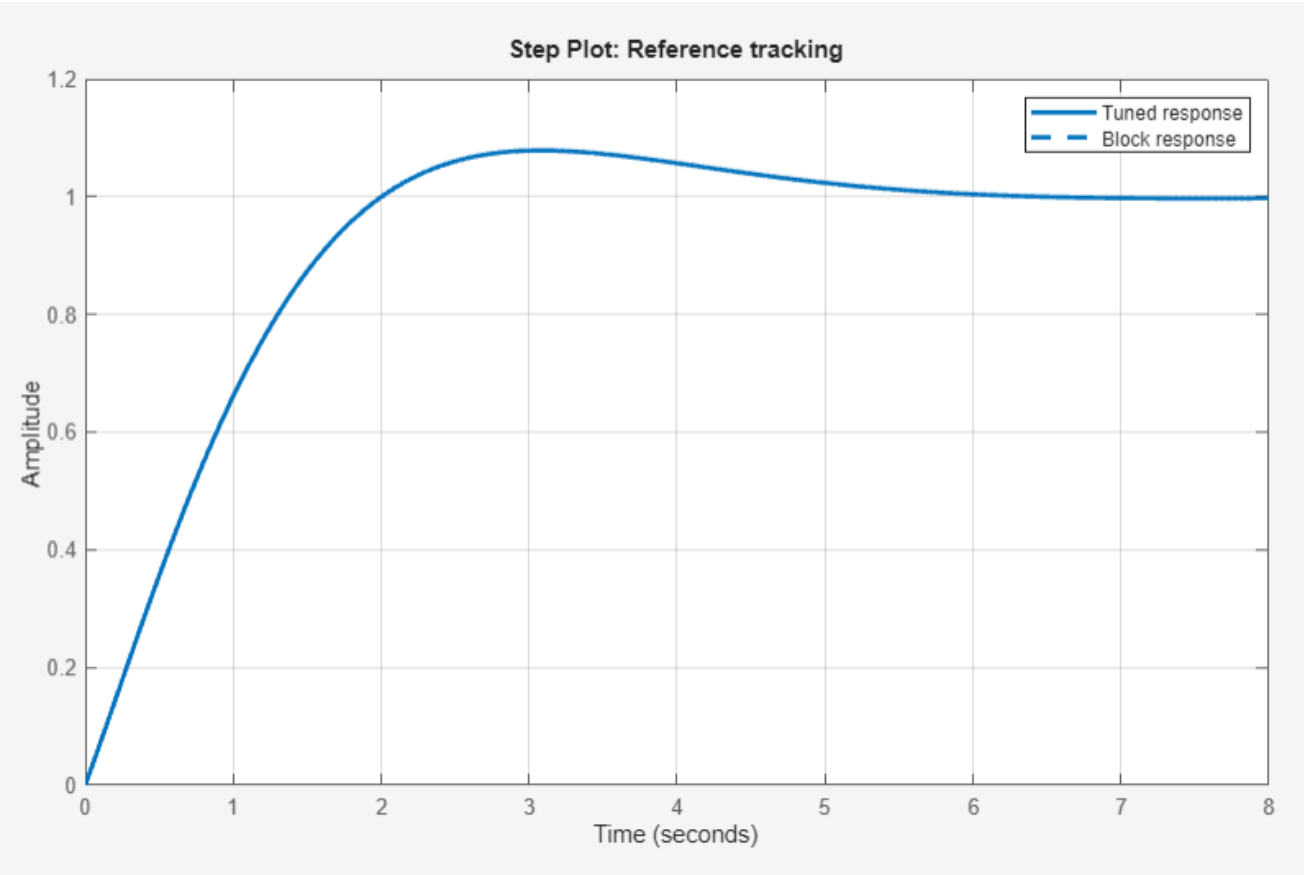


Рисунок 4.2 – Графік системи з ПІД регулятором

Синтезуємо систему з PI-регулятором [15,16].

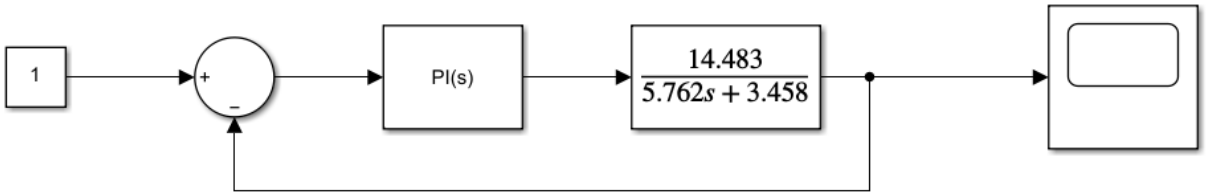


Рисунок 4.3 – Структурна схема системи керування з ПІ регулятором

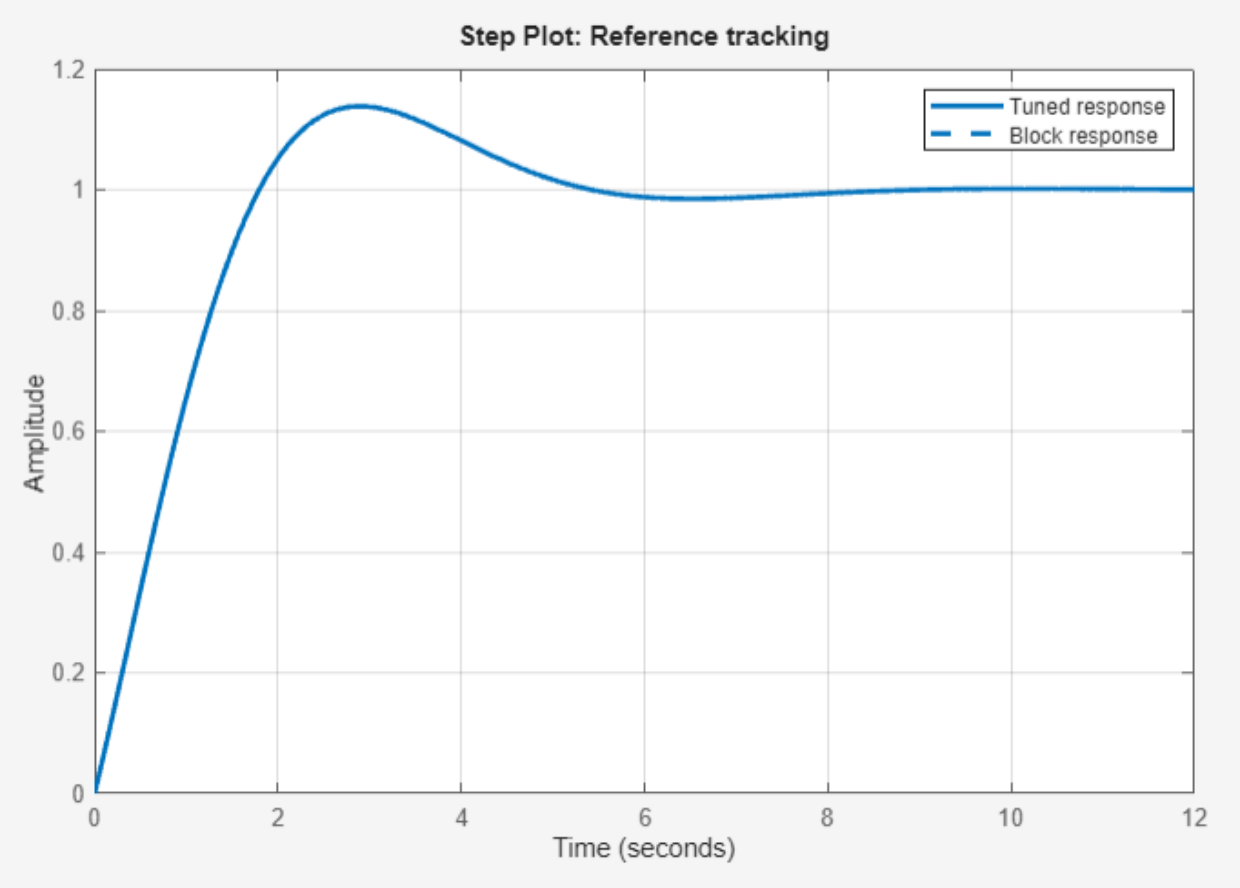


Рисунок 4.4 – Графік системи з ПІ регулятором

5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОНВЕРТОРА

Для моделювання процесу конверсії оксиду вуглецю на низькотемпературному конверторі був розроблений застосунок за алгоритмом використаним у середовищі MathCad.

Для роботи з програмним модулем користувач повинен задати вхідні дані, на основі яких буде проведено розрахунок: температура на вході в конвертор (К), вхідна концентрація CO (% об), вхідна концентрація CO2 (% об), вхідна концентрація H2 (% об), вхідна концентрація H2O (% об), загальний парціальний тиск (МПа), об'ємна швидкість (м3 г/м3 к*год), витрата по сухому газу (м3/год).

Температура та тиск задані за умовою. Концентрації та витрата сухого газу отримані з матеріального балансу, а об'ємну швидкість прийняли стандартною для даного процесу.

Застосунок розроблений за допомогою мови програмування Python та бібліотек Tkinter і MatPlotlib. Програма складається з вікна для внесення та розрахунку даних а також спливаючого вікна де відображається графік зміни концентрації CO та CO2 з часом.

Для розрахунку користувач у вікні програми у частині “Вхідні дані” вносить початкові дані, рис. 5.1

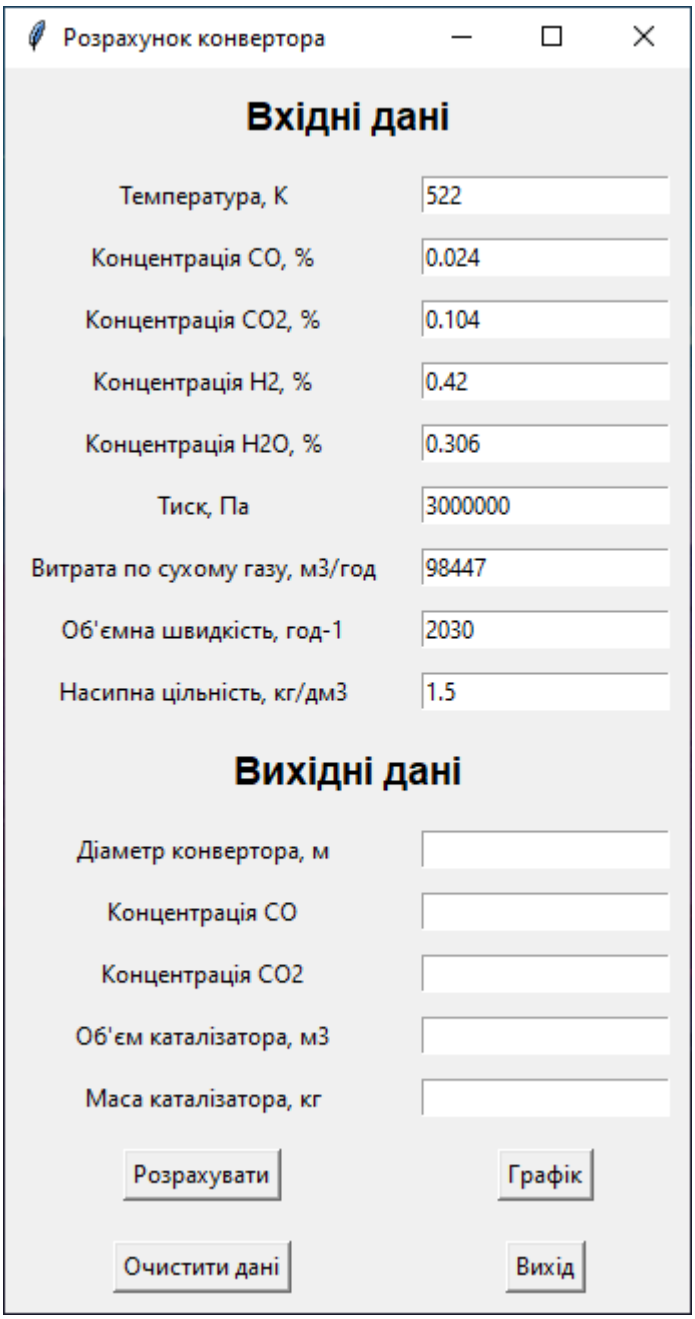


Рисунок 5.1 – Вікно програми розрахунку низькотемпературного конвертора з внесеними початковими даними

Після внесення початкових даних користувач натискає кнопку “Розрахунок” та у частині “Вихідні дані” отримує результати розрахунку, рис. 5.2.

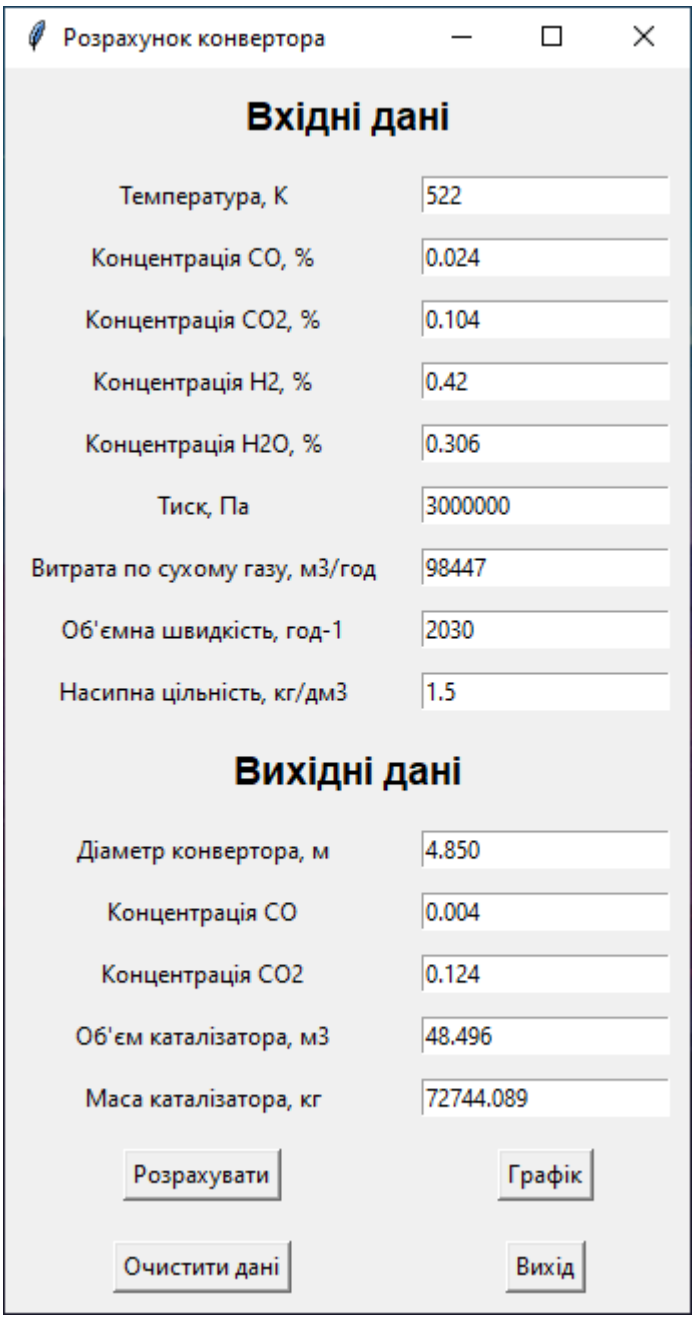


Рисунок 5.2 – Вікно програми розрахунку низькотемпературного конвертора із розрахованими даними

Отримавши результати розрахунку користувач натискає кнопку “Графік”, щоб отримати графічну залежність зміни концентрації CO та CO2 з часом, рис 5.3

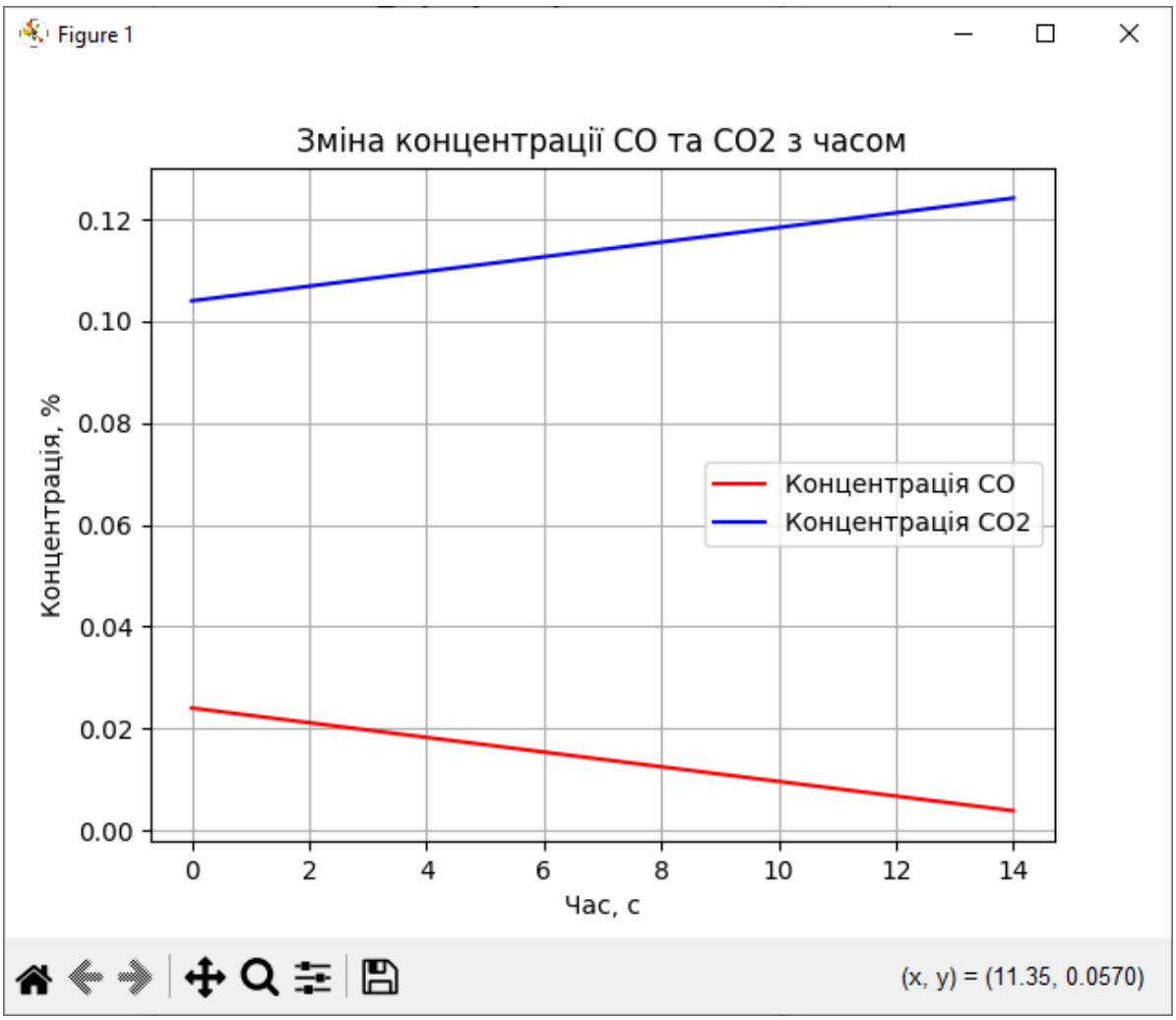


Рисунок 5.3 – Вікно програми графічної залежності концентрації CO та CO2 з часом

Червоним кольором позначено зміна концентрації CO з часом, синім – CO2. Розглянутий програмний модуль дозволяє користувачу швидко та якісно виконувати розрахунки за заданою математичною моделлю. Цей програмний модуль є вузькоспеціалізованим, оскільки призначений лише для низькотемпературного конвертора.

Використавши програмне середовище PyCharm, мову програмування Python та бібліотеки Tkinter і MatPlotlib був розроблений застосунок для розрахунку та моделювання процесу конверсії оксиду вуглецю на низькотемпературному конверторі.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

В технологічному процесі конверсії окису вуглецю використовуються шкідливі та вибухонебезпечні речовини і матеріали, а також наявна механічна і теплова енергія. Транспортування сировини і готової продукції здійснюється трубопроводами. Отримання конвертованої суміші, що містить близько 2% оксиду вуглецю, 40% водню, 10% вуглекислого газу, 30% води та приблизно 20% інших неорганічних речовин (водяна пара, кисень, 14% азот, 2% метану), є одним із головних небезпечних факторів. Цьому слід приділити особливу увагу для дотримання правил охорони праці та забезпечення безпеки персоналу.

Проєкт розроблений з урахуванням вимог промислової санітарії, безпеки та екологічних стандартів. У цьому розділі, на основі аналізу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, були розроблені заходи та засоби для створення здорових і безпечних умов праці, а також забезпечення пожежної безпеки в цеху.

6.1 Виявлення та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Згідно з чинним стандартом ДСН 3.3.6.042-99 "Норми мікроклімату на виробництві", на проектованому підприємстві виконуються роботи легкої та середньої важкості.

Стандартні норми мікроклімату представлені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Оптимальні норми мікроклімату робочої зони згідно ДСН3.3.6.042-99

Період року	Категорія робіт	Температура, ºС		Оптимальна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
		оптимальна	допустима		
Холодний	Легка Іб	21 - 23	20 - 24	40 – 60	0,1
	Середньої важкості IIа	18 – 20	17 – 23	40 – 60	0,2
Теплий	Легка Іб	22 - 24	21 – 28	40 – 60	0,2
	Середньої важкості IIа	21 – 23	18 – 27	40 – 60	0,3

Межі допустимої температури на поверхні обладнання розраховуються за формулою:

$$t_{доп.пов.обл} = t_{опт.р.з} + 2 = 24\,°C,$$

де $t_{доп.пов.обл}$ – допустима температура зовнішньої поверхні обладнання;

$t_{опт.р.з}$ – оптимальна температура повітря робочої зони в теплий період року.

Для організації повітрообміну передбачена вентиляція цеху [17-19].

Основна задача працівників на виробництві полягає у спостереженні за технологічним процесам, дотримання технологічного режиму та самостійне виконання ряду технологічних операцій, таких як підготовка приміщень і обладнання до роботи, відбір проб та їх аналіз.

До небезпечних факторів котрі шкодять мікроклімату також відноситься запиленість та загазованість повітря робочої зони цеху. Слід зазначити, що дані небезпечні фактори мають місце лише у випадку аварії на виробничій ділянці.

Для нормалізації повітря робочої зони проектом передбачені наступні заходи:

- герметизація технологічного обладнання: охолоджувачі, вузол охолодження конвертованого газу, зволожувачі, конвертори першого та другого ступенів, фільтри, насоси та інші фланцеві з’єднання;
- теплоізоляція технологічного обладнання: трубопроводи, конвертори, охолоджувачі;
- вентиляція для усунення небезпечних та шкідливих газів;
- система вентиляції притоку свіжого повітря;
- кондиціонування повітря робочої зони;
- використання засобів індивідуального захисту (спецодяг, шапочки, спецвзуття);
- система опалення;

- передбачена система контролю мікроклімату (психрометри, спиртові термометри та анемометри, газоаналізатори, автоматична система контролю вмісту різних газів в повітрі).

6.2 Захист від виробничого шуму та вібрацій

На цьому виробництві основними джерелами шуму та вібрації є система вентиляції, насоси та технологічне обладнання.

При роботі насосів та компресорів рівень звукового тиску досягає 110-120 дБ. На відстані 5 м рівень шуму від повітряних компресорів становить 56 дБ, а від витяжних вентиляторів - 55 дБ.

Згідно з ДСН 3.3.6.037-99, гранично допустимий рівень шуму для виробничих приміщень становить 80 дБ. Технологічна вібрація від систем вентиляції, насосів та компресорів досягає 100 дБ. Допустимий рівень звукового тиску на робочих місцях становить 75 дБ, еквівалентний рівень звуку – 80 дБ [17-19].

Проектом передбачені наступні заходи для зниження рівня шуму та вібрації.

1. Використання обладнання з невеликими габаритами обертових деталей і електродвигунами малої потужності (до 5,0 кВт), які генерують шум низького рівня звукової потужності, що відповідає допустимим нормам.
2. Установка кондиціонера і вентилятора у вентиляційній камері вентиляційного обладнання.
3. З'єднання кондиціонера та вентиляторів з повітропроводами за допомогою гнучких вставок.
4. Застосування віброізоляції для вібруючого обладнання встановлюються амортизатори вібрацій зі сталевих пружин; використовуються вібропоглинаючі (гумове покриття) та віброізолюючі (сталеві пру-

жинні та гумові віброізолятори, віброізолюючі килимки) матеріали та конструкції.

5. Для вимірювання та аналізу шуму і вібрації використовуються шумоміри ВШВ-003 та частотні аналізатори.

6.3 Електробезпека

Основними можливими причинами ураження електричним струмом є: випадковий контакт зі струмоведучими частинами під напругою та виникнення напруги на металевих конструкційних частинах електрообладнання через статичну електрику.

Електричне обладнання цеху отримує живлення від трьохфазної чотирьохпровідної електромережі промислової частоти з напругою 380/220 В та глухозаземленою нейтраллю.

Для забезпечення електробезпеки працівників підприємства передбачені такі заходи:

- занулення;
- захисне відключення;
- ізоляція електричних мереж;
- огорожа високовольтного електрообладнання;
- застережна сигналізація, знаки безпеки та попереджувальні плакати.

Для захисту працівників під час роботи в умовах електричного поля з параметрами, що перевищують допустимі, використовуються спеціальні комплекти діелектричного, індивідуального одягу та взуття, а також інші засоби індивідуального захисту. (НПАОП 0.00-7.17-18)

6.4 Пожежна небезпека

Найбільш вибухонебезпечним та пожежонебезпечним фактором у виробництві є наявність оксиду вуглецю та метану у конвертованій суміші. Можливими причинами запалення та вибуху на виробництві, що проектується, є необережне поводження з вибухопожежонебезпечними речовинами та матеріалами (метан, деякі органічні речовини), а також випадки витоку газу, зумовлені пошкодженням газопроводів або несправністю регулюючих приладів [17-19].

Джерелами запалення можуть бути коротке замикання в електрообладнанні, нагріті стінки обладнання, іскри електричного та механічного походження, а також розряди атмосферної електрики (прямий удар блискавки в будівлю, занесення високих потенціалів блискавки у під'єднані до будівлі дроти та інші провідники).

Для запобіганню витоку газу, що може призвести до займання або вибуху, на підводах газопроводів встановлені електромагнітні клапани, що зв'язані з газоаналізатором повітря. При заповненні газом газопроводи продуваються ним через скидні свічки до витіснення всього повітря, а при звільненні від газу продуваються повітрям до повного витіснення газу. Це необхідно через те, що при об'ємній концентрації природного газу в повітрі 5-15% утворюється вибухонебезпечна суміш. Газ з скидних свічок викидається в місцях, де він не може потрапити в будівлі і де усунена можливість його займання від будь-якого джерела вогню.

Пожежна безпека виробничих приміщень забезпечується наступними проектними та інженерно-технічними рішеннями, спрямованими на попередження виникнення пожежі та вибуху, а також забезпечення вибухопожежної та пожежної безпеки:

- обов'язкове проходження інструктажу з пожежної безпеки для всього персоналу;
- наявність планів швидкої евакуації персоналу на випадок пожежі;
- автоматичне і дистанційне регулювання обладнанням;

- блискавкозахист виробничих приміщень;
- надійна герметизація рухомих та нерухомих з’єднань технологічного обладнання, своєчасне змащування підшипників машин та механізмів;
- теплоізоляція нагрітих поверхонь;
- систематична перевірка справності обладнання;
- застосування систем контролю, попереджувальної та аварійної сигналізації.

У виробничому приміщенні також передбачена необхідна кількість первинних засобів пожежогасіння: вуглекислотні або порошкові вогнегасники, пожежні крани, пожежний інструмент та інвентар [17-19].

Результати визначення категорій технологічних блоків, приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою, класифікація вибухонебезпечних і пожежонебезпечних зон щодо застосування електрообладнання дають привід вважати їх належними категорії А та класу 2, оскільки у виробництві є наявність оксиду вуглецю та метану в конвертованій суміші. (ДСТУ Б В.1.1-36:2016) .

ВИСНОВКИ

У даному дипломному проекті розглянуто технологічний процес конверсії окису вуглецю на низькотемпературному конверторі і отримано такі висновки.

1. Досліджено процес та технологічну схему конверсії окису вуглецю на низькотемпературному конверторі.
2. Відповідно до технологічного процесу розроблено схему автоматизації, описані контури регулювання, а також підібрані технологічні засоби для контролю та регулювання процесу.
3. Створено спрощену технологічну схему процесу конверсії окису вуглецю та розраховано матеріальний баланс за допомогою програмного модуля ChemCAD.
4. Проведено математичних розрахунок по запропонованій математичній моделі у програмі MathCAD.
5. Синтезовано систему керування та підібрано оптимальні налаштування для ПІД та ПІ регуляторів в Matlab Simulink.
6. Розроблено обчислювальний модуль для реалізації моделювання досліджуваного процесу за допомогою мови програмування Python.
7. Запропоновані заходи безпеки з охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія зв’язаного азоту: технологія та алгоритми розрахунків виробництва аміаку і метанолу. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних речовин та водоочищення» / А.Л. Концевой ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 5,55 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 211 с.
2. Товажнянський Л. Л. Технологія зв’язаного азоту: підручник / Л. Л. Товажнянський, О. Я Лобойко та ін. – Харків.: НТУ “ХПІ”, 2007. - 536 с
3. Лобойко О.Я. Методи розрахунків у технології неорганічних виробництв: Ч. 1. Зв'язаний азот [Текст] : підручник / О. Я. Лобойко, Л. Л. Товажнянський, І. О. Слабун; За ред. О. Я. Лобойко і Л. Л. Товажнянського. – Х. : НТУ “ХПІ”, 2001. – 511 с.
4. Каталітична конверсія метану водяною парою [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://8ref.com/10/referat_105313.html
5. Каталог промислових приборів [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.dstu.dp.ua/student/zaochn/inflist/ek/mt1.htm
6. Каталог засобів автоматизації [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.svaltera.ua/download-catalog/
7. Каталог вимірювання температури [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://aqteck.com.ua/
8. Каталог засобів автоматизації [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://allhim.kh.ua/ua/g12873645-pribory-sredstva-avtomatizatsii
9. Каталог засобів автоматизації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrgazavt.com.ua/products-category/pribory-i-sredstva-avtomatizacii/.
10. Каталог засобів вимірювання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.eus.endress.com/en?ii-country=ua&locale=en.

11. Балтовський О.О., Форос Г.В, Сіфоров О.І. Основи математичного моделювання/ За заг. ред. д.т.н., доц. О.А. Балтовського. Одеський держ. унів- т внутр. довідок, 2023. 125 с.

12. Згуровский, М. З. Системній аналіз. Проблеми, методология, приложения. [Текст] / М.З. Згуровский, Н. Д. Панкратова – К. : Наук. Думка. 2005. – 743 с.

13. Бугаєва Л. М. Системний аналіз хіміко-технологічних комплексів [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Л. М. Бугаєва, Ю. О. Безносик, Г. О. Статюха. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,06 Мбайт). Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 197 с. – Назва з екрана.

14. Бойко, Т. В. Математичне моделювання та застосування ЕОМ в хімічній технології: Метод. вказівки до виконання лаборатор. робіт для студ. напряму підготов. «Хімічна технологія та інженерія». [Текст] / Уклад. : Т. В. Бойко, В. І. Бендюг, І. О. Потяженко та ін. – К. :НТУУ «КПІ», 2007. – 128с.

15. Проектування систем керування: навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології» / М. З. Зм. Арк. рк. № докум. Підпис Дата Арк. 59 ДПЛА92.10.00.000ПЗ Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 342 с.

16. Ладанюк, А. П. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: навч. посіб. / А. П. Ладанюк, К. С. Архангельська , Л. О. Власенко - К.: НУХТ, 2014. -274 с.

17. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

18. Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Сторожук В.М., Туряб Л.В., Лико Х.І. Практикум з охорони праці. – Львів, 2000 – 350 с.

19. ДСН 3.3.6.039-99 Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації

20. Крюковська О.А., Левчук К.О. Охорона праці в галузі (для хімічних спеціальностей) під редакцією к.т.н., доцента Толока А.О.: Навч. посібник. – 2011. – 230 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Таблиця А – Специфікація устаткування та виробів засобів автоматизації

Позиція на функціональній схемі	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка	Завод-виробник	Одиниця вимірюв.	К-сть
2а, 3а, 6а, 7а, 8а, 10а	Датчик температури, діапазон -50…+400 °С, вибухозахищений корпус вихідний уніфікований сигнал 4-20 mA	TM131 PT100 TF	Endress+Hauser, Німеччина	шт	6
4а	Датчик температури, діапазон -50…+500 °С, вибухозахищений корпус вихідний уніфікований сигнал 4-20 mA	TM131 PT100 TF StrongSens	Endress+Hauser, Німеччина	шт	1
2б, 3б, 6б, 7б, 10б	Прилад для вимірювання, реєстрації та регулювання температури, вхідний сигнал 4-20 mA	МТР-138	“Мікрол”, Україна	шт	5
4б, 8б	Прилад для вимірювання, реєстрації та контролю температури, вхі-	ІТМ-310А	“Мікрол”, Україна	шт	1

	дний сигнал 4-20 mA				
1а, 11а	Вихровий витратомір для вимірювання витрати газової суміші	Proline Prowirl F 200	Endress+Hauser, Німеччина	шт	2
12а, 13а	Електромагнітний витратомір для вимірювання витрати води	Proline Promag P 10	Endress+Hauser, Німеччина	шт	2
1б, 12б, 13б,	Прилад для вимірювання, реєстрації та регулювання витрати, вхідний сигнал 4-20 mA	МТР-138	“Мікрол”, Україна	шт	3
11б	Прилад для вимірювання, реєстрації та контролю витрати, вхідний сигнал 4-20 mA	ІТМ-310А	“Мікрол”, Україна	шт	1
5а, 9а	Концентратомір для аналізу концентрації речовин в газовій суміші, вихідний сигнал 4-20 mA	LCI-KL50KPF	KOBOLD, Німеччина	шт	2
5б, 9б	Прилад для вимірювання, реєстрації, контролю	ІТМ-310А	“Мікрол”, Україна	шт	2

	та сигналізації концентрації, вхідний сигнал 4-20 mA				
14а, 15а	Датчик тиску для контролю та сигналізації тиску, з робочим діапазоном до 40 бар та вихідним сигналом 4-20 mA	Cerabar PMP71B	Endress+Hauser, Німеччина	шт	2
14б, 14б	Прилад для вимірювання, реєстрації, контролю та сигналізації тиску, вхідний сигнал 4-20 mA	ITM-310A	“Мікрол”, Україна	шт	2
16а, 17а	Диференційний манометр для показу різниці тиску, діапазон вимірювання 0,05 – 1 Бар	Deltabar M PMD55	Endress+Hauser, Німеччина	шт	2

ДОДАТОК Б

Вихідні дані:

Температура в апараті: $T := 522$ К

Газова стала: $R := 8.31$ Дж/(моль·К)

Об'ємна швидкість в апараті: $U := 2030$ c^{-1}

Розрахуємо константу швидкості:

$$k1 := \left(\frac{4.92 \cdot 10^5 \cdot e^{\frac{-18450}{R \cdot T}}}{3600} \right) \qquad k1 = 1.943 \quad c^{-1}$$

Перераховуємо концентрацію в тиск кожного компоненту:

концентрація,% об:	Парціальні тиски:
$CO := 0.035$ %	$PCO := 3 \cdot 10^6 \cdot CO = 1.05 \times 10^5$ Па
$H2O := 0.306$ %	$PH2O := 3 \cdot 10^6 \cdot H2O = 9.18 \times 10^5$ Па
$CO2 := 0.104$ %	$PCO2 := 3 \cdot 10^6 \cdot CO2 = 3.12 \times 10^5$ Па
$H2 := 0.42$ %	$PH2 := 3 \cdot 10^6 \cdot H2 = 1.26 \times 10^6$ Па

Загальний тиск: $p := 3 \cdot 10^6$ Па

Кількість ітерацій: $i := 1..218$

Початкови тиск: $P_0 := PCO$ Па

Початковий час: $\tau_0 := 0.1$ сек

Крок: $\Delta\tau := 0.1$

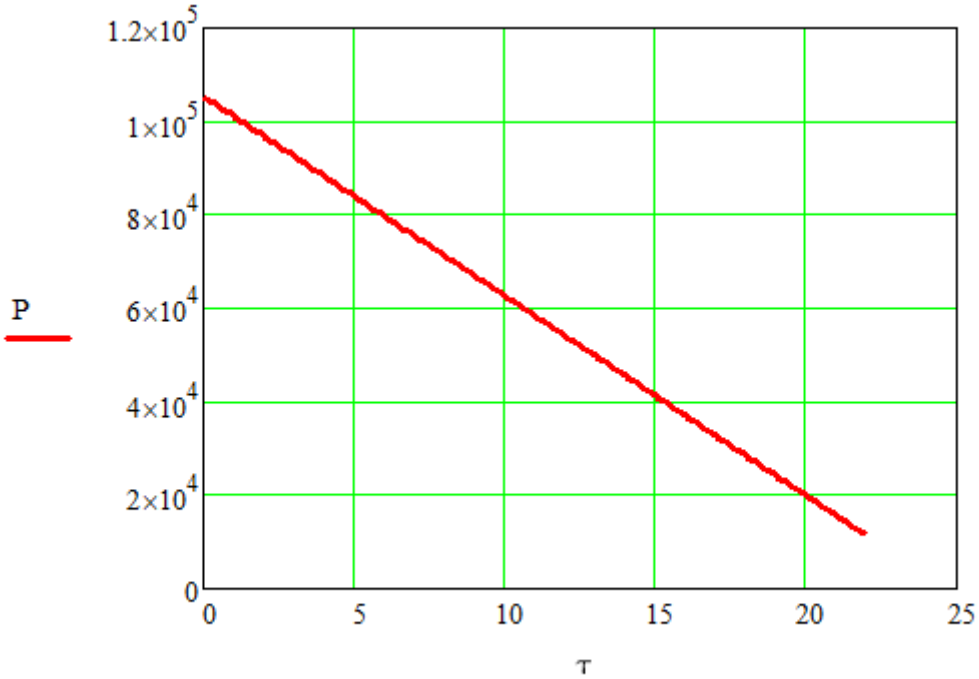
Диференційне рівняння:

$$F(P) := \frac{-k1 \cdot (p - PCO) \cdot (PH2O)^{0.5}}{PH2}$$

Розв'язок рівняння методом Ейлера:

$$\begin{pmatrix} \tau_i \\ P_i \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \tau_{i-1} + \Delta\tau \\ P_{i-1} + F(P) \cdot \Delta\tau \end{pmatrix}$$

Побудова графика:



					ДПЛА01.13.00.000ПЗ	Арк
Вик	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Парціальний тиск CO після реакції, Па:

P =

	0
0	$1.05 \cdot 10^5$
1	$1.046 \cdot 10^5$
2	$1.041 \cdot 10^5$
3	$1.037 \cdot 10^5$
4	$1.033 \cdot 10^5$
5	$1.029 \cdot 10^5$
6	...

Час реакції, сек:

τ =

	0
0	0.1
1	0.2
2	0.3
3	0.4
4	0.5
5	0.6
6	0.7
7	...

При τ=21,9 сек концентраціія CO досягає заданого проектом начення - 0,4% об.

Перехід від тиску до концентрацій, % об.: $CO := \frac{P}{p}$

CO =

	0
0	0.035
1	0.035
2	0.035
3	0.035
4	0.034
5	0.034
6	0.034
7	0.034
8	...

З матеріального балансу знаходимо концентрацію CO_2 та CO до реакції:

$C1 := 0.024$ %

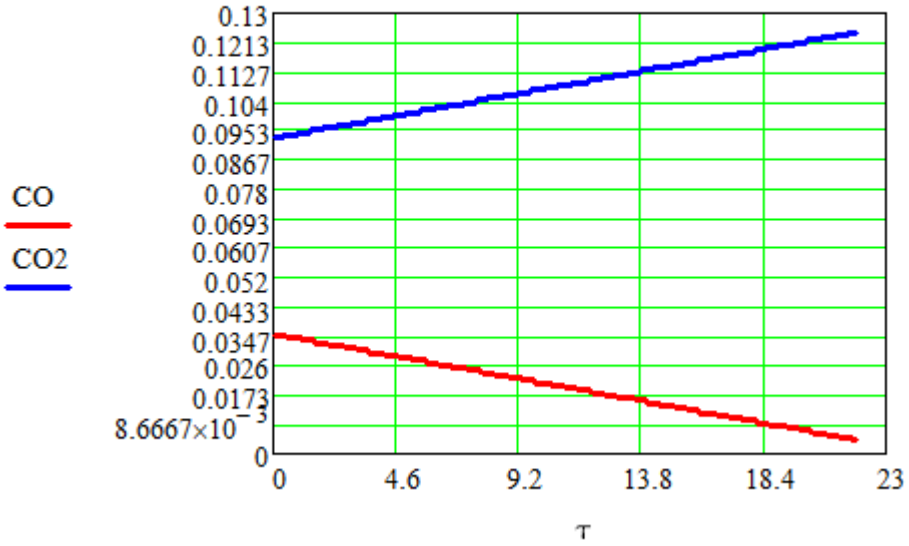
$C3 := 0.104$ %

$CO2 := (C3 + C1) - CO$

CO2 =

	0
0	0.093
1	0.093
2	0.093
3	0.093
4	0.094
5	0.094
6	0.094
7	...

Побудова графіку залежності концентрації від часу:



З матеріального балансу

$$Vsux := 98447. \frac{м3}{год}$$

Розрахуємо об'єму каталізатору

$$Vkat := \frac{Vsux}{U}$$

$$Vkat = 48.497 \quad м^3$$

Розрахунок діаметру апарату

$$d := \frac{Vsux}{U \cdot 10}$$

$$d = 4.85 \quad м$$

Розрахунок висоти шару каталізатору

$$h := \frac{Vkat}{0.785 \cdot d^2}$$

$$h = 2.627 \quad м$$

Розрахунок маси каталізатору

$$w := 1.5 \quad кг/дм^3$$

$$w1 := w \cdot 1000$$

$$w1 = 1.5 \times 10^3 \quad кг/м^3$$

$$Mkat := Vkat \cdot w1$$

$$Mkat = 7.274 \times 10^4 \quad кг$$

ДОДАТОК В.

Код програмного застосунку

```
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
import matplotlib.pyplot as plt
from math import exp, sqrt

# Клас для графічного інтерфейсу програми розрахунку конвертора
class CalculApp:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Розрахунок конвертора")

        # Створення віджетів інтерфейсу
        self.create_widgets()

    def create_widgets(self):
        # Створення та розміщення метки "Вхідні дані"
        input_label = tk.Label(self.root, text="Вхідні дані", font=("Arial", 14, "bold"))
        input_label.grid(row=0, columnspan=2, pady=10)

        # Список вхідних даних
        labels = [
            "Температура, К", "Концентрація CO, %", "Концентрація CO2, %", "Конце-
ntрація H2, %",
            "Концентрація H2O, %", "Тиск, Па", "Витрата по сухому газу, м3/год",
            "Об'ємна швидкість, год-1", "Насипна цільність, кг/дм3"
        ]
        self.entries = {}
```

```
# Створення та розміщення полів для введення вхідних даних
for i, label in enumerate(labels, start=1):
    lbl = tk.Label(self.root, text=label)
    lbl.grid(row=i, column=0, padx=10, pady=5)
    entry = tk.Entry(self.root)
    entry.grid(row=i, column=1, padx=10, pady=5)
    self.entries[label] = entry

# Встановлення значень за замовчуванням для полів введення
self.entries["Температура, К"].insert(0, '522')
self.entries["Концентрація CO, %"].insert(0, '0.024')
self.entries["Концентрація CO2, %"].insert(0, '0.104')
self.entries["Концентрація H2, %"].insert(0, '0.42')
self.entries["Концентрація H2O, %"].insert(0, '0.306')
self.entries["Тиск, Па"].insert(0, '3000000')
self.entries["Об'ємна швидкість, год-1"].insert(0, '2030')
self.entries["Витрата по сухому газу, м3/год"].insert(0, '98447')
self.entries["Насипна цільність, кг/дм3"].insert(0, '1.5')

# Створення та розміщення метки "Вихідні дані"
output_label = tk.Label(self.root, text="Вихідні дані", font=("Arial", 14, "bold"))
output_label.grid(row=len(labels) + 1, columnspan=2, pady=10)

# Список вихідних даних
output_labels = [
    "Діаметр конвертора, м", "Концентрація CO", "Концентрація CO2",
    "Об'єм каталізатора, м3", "Маса каталізатора, кг"
]

# Створення та розміщення полів для виводу вихідних даних
```

```
        for i, label in enumerate(output_labels, start=len(labels) + 2):
            lbl = tk.Label(self.root, text=label)
            lbl.grid(row=i, column=0, padx=10, pady=5)
            entry = tk.Entry(self.root)
            entry.grid(row=i, column=1, padx=10, pady=5)
            self.entries[label] = entry

        # Кнопка для запуску розрахунків
        self.calculate_button = tk.Button(self.root, text="Розрахувати",
command=self.calculate)
        self.calculate_button.grid(row=len(labels) + len(output_labels) + 2, column=0,
padx=10, pady=10)

        # Кнопка для побудови графіку
        self.plot_button = tk.Button(self.root, text="Графік", command=self.plot)
        self.plot_button.grid(row=len(labels) + len(output_labels) + 2, column=1,
padx=10, pady=10)

        # Кнопка для очищення даних
        self.clear_button = tk.Button(self.root, text="Очистити дані",
command=self.clear)
        self.clear_button.grid(row=len(labels) + len(output_labels) + 3, column=0,
padx=10, pady=10)

        # Кнопка для виходу з програми
        self.exit_button = tk.Button(self.root, text="Вихід", command=self.root.quit)
        self.exit_button.grid(row=len(labels) + len(output_labels) + 3, column=1,
padx=10, pady=10)

    def calculate(self):
```

```
try:
    # Отримання вхідних даних з полів введення
    self.Tem = float(self.entries["Температура, К"].get())
    self.CO = float(self.entries["Концентрація CO, %"].get())
    self.CO2 = float(self.entries["Концентрація CO2, %"].get())
    self.H2 = float(self.entries["Концентрація H2, %"].get())
    self.H2O = float(self.entries["Концентрація H2O, %"].get())
    self.p = float(self.entries["Тиск, Па"].get())
    self.U = float(self.entries["Об'ємна швидкість, год-1"].get())
    self.V = float(self.entries["Витрата по сухому газу, м3/год"].get())
    self.w = float(self.entries["Насипна цільність, кг/дм3"].get())

    # Ініціалізація початкових змінних
    Vn = 51205.4
    V1 = 141834.5
    V0 = 90629.1
    self.pCO = self.p * self.CO
    self.pCO2 = self.p * self.CO2
    self.pH2 = self.p * self.H2
    self.pH2O = self.p * self.H2O
    self.y = [self.pCO]
    self.t = [0]
    self.h = 0.1
    we = 4.92
    wer = 100000
    er = 18450
    r = 8.31
    re = 3600
    self.k = (we * wer * exp(-er / (r * self.Tem))) / re
```

```
# Розрахунок зміни концентрацій
self.c = (-self.k * (self.p - self.pCO) * sqrt(self.pH2O)) / self.pH2
for i in range(1, 141):
    self.t.append(self.t[i - 1] + self.h)
    self.y.append(self.y[i - 1] + self.c * self.h)
    a = self.t[i]
    b = self.y[i] / self.p
    O = (self.CO + self.CO2) - b

# Розрахунок вихідних параметрів
nnCO = V0 * self.CO / 100
nnCO2 = V0 * self.CO2 / 100
nnH2 = V0 * self.H2 / 100
nCO = nnCO + (nnCO * 0.698)
nCO2 = nnCO2 + (nnCO * 0.698)
nH2 = nnH2 + (nnCO * 0.698)
nH2O = Vn - (nnCO * 0.698)
Vkat = self.V / self.U
D = self.V / (self.U * 10)
h = Vkat / (0.785 * D * D)
Mkat = self.w * 1000 * Vkat

# Заповнення полів виводу результатами
self.entries["Діаметр конвертора, м"].delete(0, tk.END)
self.entries["Діаметр конвертора, м"].insert(0, f"{D:.3f}")
self.entries["Концентрація CO"].delete(0, tk.END)
self.entries["Концентрація CO"].insert(0, f"{b:.3f}")
self.entries["Концентрація CO2"].delete(0, tk.END)
self.entries["Концентрація CO2"].insert(0, f"{O:.3f}")
self.entries["Об'єм каталізатора, м3"].delete(0, tk.END)
```

```
        self.entries["Об'єм каталізатора, м3"].insert(0, f"{Vkat:.3f}")
        self.entries["Маса каталізатора, кг"].delete(0, tk.END)
        self.entries["Маса каталізатора, кг"].insert(0, f"{Mkat:.3f}")

    except ValueError:
        messagebox.showerror("Error", "Перевірте правильність введених данних")

def plot(self):
    try:
        # Підготовка даних для графіку
        t = [i * 0.1 for i in range(141)]
        y = [self.pCO]
        for i in range(1, 141):
            y.append(y[i - 1] + self.c * self.h)

        b = [yi / self.p for yi in y]
        O = [(self.CO + self.CO2) - bi for bi in b]

        # Побудова графіку
        plt.plot(t, b, 'r', label='Концентрація CO')
        plt.plot(t, O, 'b', label='Концентрація CO2')
        plt.xlabel('Час, с')
        plt.ylabel('Концентрація, %')
        plt.title("Зміна концентрації CO та CO2 з часом")
        plt.legend()
        plt.grid(True)
        plt.show()
    except AttributeError:
        messagebox.showerror("Error", "Потрібно спочатку виконати обчислення")
```

```
    def clear(self):
        # Очищення всіх полів введення та виводу
        for entry in self.entries.values():
            entry.delete(0, tk.END)


if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = CalculApp(root)
    root.mainloop()
```

ДОДАТОК Г

Блок-схема алгоритму

Блок – схема програмного комплексу

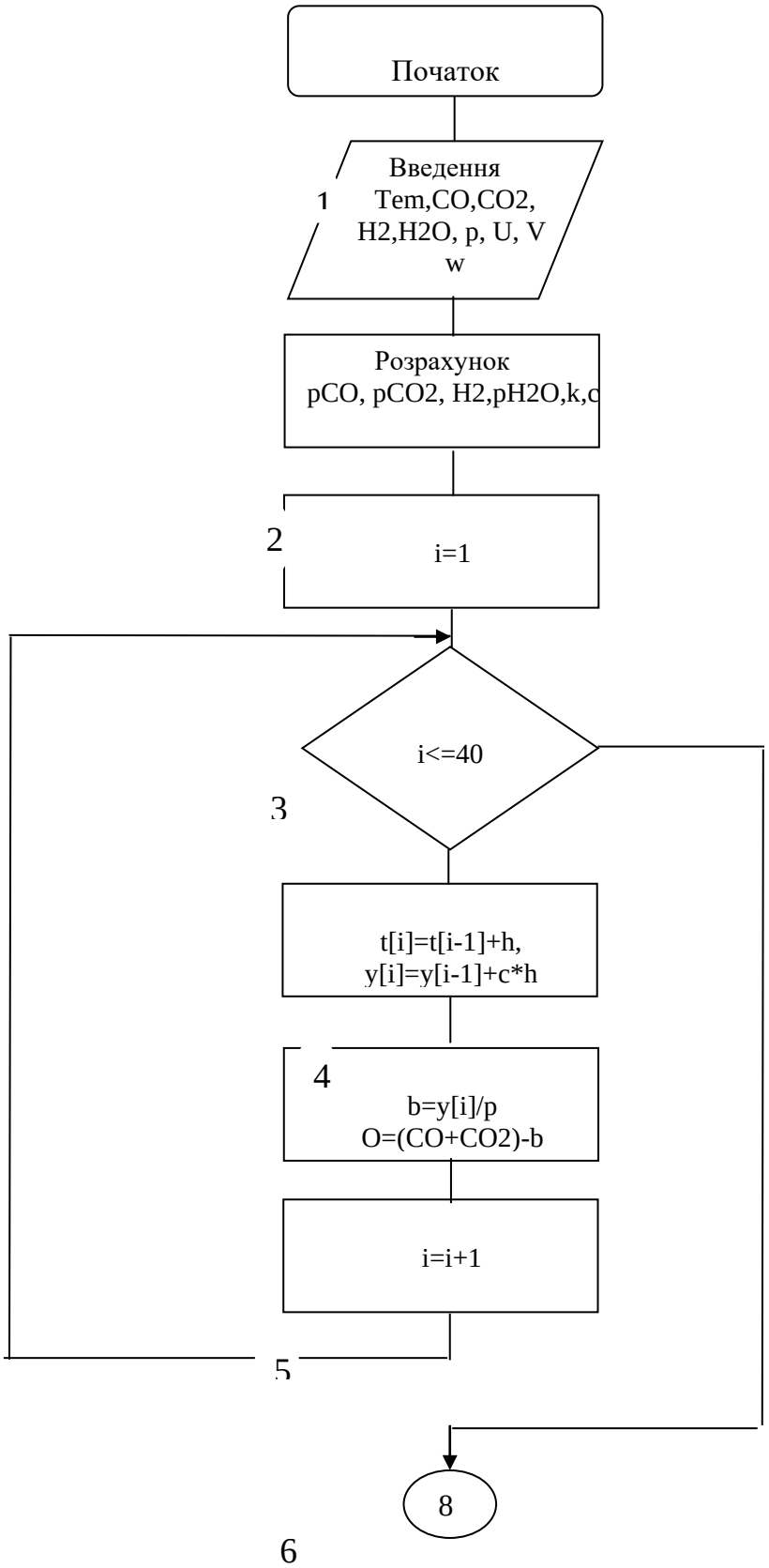


Рисунок Г.1 – Блок – схема алгоритму програмного модулю для розрахунку конструктивних параметрів низькотемпературного конвертору