


ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ  
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ**

**методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт**

Запоріжжя 2026



УДК 681.5:622(072)

A18

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ  
ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 5 від 27.02.2026 р.)

**Укладач**

Сімкін О. І., професор, канд. техн. наук

Койфман О.О., доцент, канд. техн. наук

Давиденко О.В., аспірант

A18 Автоматизація об'єктів гірничо-металургійної галузі : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт / уклад.: О. І. Сімкін, О. О. Койфман., О. В. Давиденко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 63 с.

У методичних рекомендаціях наведено тематику лабораторних робіт, методичні пояснення щодо порядку та приклади їх виконання, критерії оцінювання, вимоги до оформлення звітів, питання для самоперевірки тощо.

УДК 681.5:622(072)



## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
Лабораторна робота №1 .....	5
Завдання .....	5
Теоретична частина.....	6
Інструкція з встановлення та використання програми-симулятора .....	13
Контрольні запитання .....	15
Список рекомендованої літератури .....	15
Лабораторна робота №2 .....	16
Завдання .....	16
Теоретична частина.....	17
Контрольні запитання .....	26
Список рекомендованої літератури .....	26
Лабораторна робота №3 .....	27
Завдання .....	27
Теоретична частина.....	28
Контрольні запитання .....	38
Список рекомендованої літератури .....	38
Лабораторна робота №4 .....	39
Завдання .....	39
Теоретична частина.....	41
Контрольні запитання .....	61
Список рекомендованої літератури .....	61
Додаток А. ....	62
ПРИКЛАД ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА .....	62



## ВСТУП

Лабораторний практикум містить чотири віртуальні лабораторні роботи, які виконуються на ПЕОМ.

Основою кожної роботи є програма-імітатор, яка включає математичну модель технологічного процесу, реалізовані окремо алгоритми регулювання та управління, людино-машинний інтерфейс та ін.

Для кожної роботи наведені завдання, теоретична частина, в якій докладно описані основна інформація (технологія, модель процесу, призначення автоматизованої системи управління та ін.), опис НМІ, можливості програми, детально описані вимоги до виконання роботи. Наведено контрольні питання для самоперевірки знань студентів.

Рекомендовано для студентів спеціальності G7/174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» першого (бакалаврського) рівня освіти.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Тема: «Дослідження роботи системи управління кисневим конвертером методом математичного моделювання»

Мета роботи: Здобути практичні навички дослідження основних параметрів процесу та їх вплив на перебіг плавки, вивчення функцій АСУ ТП агрегату, вплив роботи АСУ ТП на перебіг технологічного процесу, отримання навичок в обробці експериментальних даних.

### ЗАВДАННЯ

Після ознайомлення з матеріалом теоретичної частини цієї лабораторної роботи, а також з джерелами [1, 2] з переліку рекомендованої літератури, виконати чотири завдання.

**Завдання 1. Вивчення імітаційної моделі.** Проведіть плавки в режимі чистого імітатора та режимі автоматичного керування.

*Пояснення.* Для виконання завдання необхідно провести плавки в режимі чистого імітатора та в автоматичному режимі керування. Вибір режиму роботи здійснюється у верхньому лівому куті основного вікна програми. Для запуску потрібно натиснути кнопку "Старт". Перед безпосереднім моделюванням необхідно ввести початкові дані в діалоговій формі, що з'явилася. Після завершення плавки результати будуть занесені у файли, формати яких та розташування встановлено в налаштуваннях (за замовчуванням здійснюється виведення в текстовий файл до директорії Results, а виведення даних у Excel-файл необхідно встановити перед плавкою).

У звіті необхідно надати інформацію про початкові дані плавки та її результати у вигляді графіків та таблиць. Зробити висновки про виконану роботу та якість проведених плавок за економічними та тимчасовими критеріями.

**Завдання 2.** Вивчення процесу виплавлення сталі. Проведення плавки в ручному режимі самостійно та з використанням порадики.

*Пояснення.* Необхідно провести одну й тугішу плавку двічі (з однаковими початковими умовами) у ручному режимі. Спочатку без порадики, а потім із використанням рекомендацій порадики АСУТП кисневого конвертера. Активація порадики здійснюється встановленням галочки біля поля «Увімк. порадики», а його рекомендації виводитимуться в таблицю, розташовану на вкладці «Радник» у нижньому лівому кутку. За замовчуванням у налаштуваннях вказано виводити нове повідомлення до таблиці.

У звіті щодо виконання другого завдання необхідно надати інформацію про початкові дані та результати плавки у вигляді графіків та таблиць. Необхідно провести порівняльний аналіз двох плавок, визначити перевитрату матеріалів, часу та порівняти якість плавок. Зробити висновок



про доцільність створення та вдосконалення порадника у складі АСУТП киснево-конвертерного цеху.

**Завдання 3.** Вивчення алгоритмів автоматичного керування. Проведіть плавку в автоматичному режимі з різними алгоритмами автоматичного керування.

*Пояснення:* необхідно вивчити принцип роботи алгоритму автоматичного управління, провівши одну й тугішу плавку в режимі автоматичного управління при використанні різних алгоритмів, побудованих на різних принципах роботи.

У налаштуваннях «Моделі->Керуючий алгоритм» доступний вибір між автоматичним керуванням, побудованим за технологічною інструкцією, або динамічним керуванням за температурою відпрацьованих газів.

У звіті необхідно надати результати проведених плавок, зробити висновки щодо роботи обох алгоритмів, визначити більш оптимальний, описати недоліки та переваги.

**Завдання 4.** Вивчення впливу технологічних параметрів на перебіг плавки. Проведення досліджень щодо визначення впливу кількості сипких матеріалів, витрати кисню та положення фурми на температуру сталі та вміст у ній вуглецю.

*Пояснення:* необхідно зробити висновки про вплив кількості сипучих матеріалів, часу їх відвантаження, витрати кисню, положення фурми на основні параметри плавки (температура сталі та відсотковий вміст вуглецю). Якщо отриманих даних при виконанні попередніх завдань недостатньо для формування необхідних висновків, рекомендується проводити плавки в ручному режимі із різними комбінаціями заданих значень для проведення дослідницької роботи.

**Порівняння плавок під час виконання завдань лабораторної роботи.** Для порівняння плавок використовуються:

а) Результати плавки (сумарна витрата кисню, маса сталі, брухту, вапна та ін. сипучих добавок, температура сталі - див. відповідну вкладку на головному вікні програми);

б) графіки температури розплаву, концентрації вуглецю у процесі плавки;

в) інші дані, наявні у файлах, що формуються програмою (на розсуд виконавця лабораторної роботи).

## ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

### Характеристики кисневого конвертера

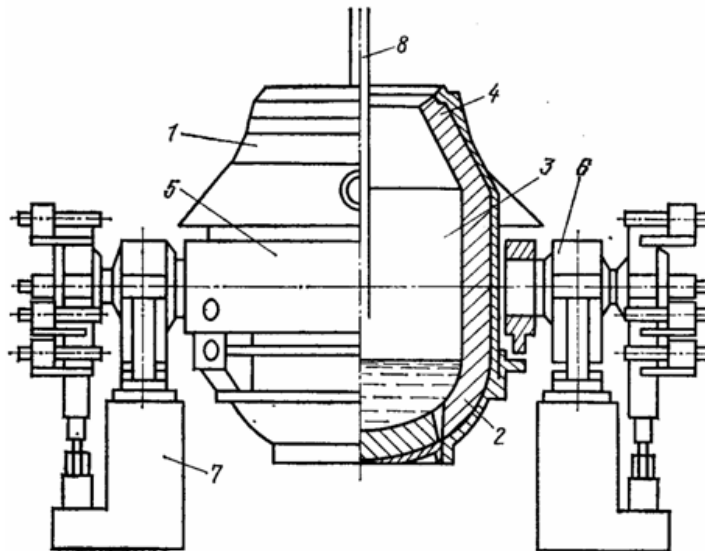
**Технологічне обладнання.** Для виплавки сталі в кисневому конвертері необхідний комплекс основного і допоміжного технологічного устаткування. Розгляну конструкцію основних із них.

*Кисневий конвертер* являє собою футеровану зсередини посудину грушоподібної форми, виготовлену із сталевого листа і має зверху отвір -

горловину. Горловина служить для завантаження шлакоутворювальних матеріалів та скрапу, заливки чавуну, введення в порожнину конвертера кисневої фурми, відведення газів, зливу шлаку.

Конвертер складається із трьох частин (рис. 1.1):

- верхньою роз'ємною шоломною частиною у формі зрізаного конуса з меншою основою вгорі (горловиною);
- середня циліндрична частина;
- днище (роз'ємне або нероз'ємне), має напівсферичну чашоподібну форму, виконують знімним для зручності ремонту або глуходонним.



1 – корпус конвертера; 2 – вогнетривка футерівка; 3 – робочий простір конвертера; 4 – горловина; 5 - опорне кільце з цапфами; 6 – опорні вузли; 7 – станина; 8 - водоохолоджувана киснева фурма.

Рисунок 1.1 – Будова кисневого конвертера

Для відокремлення металу від шлаку при зливі в ківш конвертер постачають люткою (сталевипускним отвором). Кожух конвертера зварюють із товстих сталевих листів товщиною від 20 до 110 мм. Футерівку роблять тришаровою:

- арматурний (теплозахисний) шар товщиною 110..250 мм, що примикає до кожуха, виконують з магнезитової або магнезитохромітової цегли.

- робочий (внутрішній, вогнетривкий) шар з периклазовапняної, периклазовуглецевої та ін. цегли, товщина якої в залежності від місткості конвертера становить 380..750 мм.

- проміжний (між арматурним і робочим шаром) зазвичай роблять набивання товщиною 70..100 мм з вогнетривкої маси.

Загальна товщина футерівки конвертерів місткістю 50-300 т становить 700..1000 мм. Перед введенням конвертера в роботу футерівку обпалюють при 1100..1200 °С. Зазвичай футерівка витримує 800-2000 плавов. В даний час при використанні периклазовуглецевої цегли та створенні шлакового



гарнісажу, шляхом роздування шлаку після кожної плавки, досягнуто стійкість ~15000 плавок.

Корпус конвертера кріпиться в опорному кільці з цапфами, що спираються на підшипники, які встановлені в опорних вузлах на станинах. Цапфи з'єднані з механізмом повороту, що забезпечує поворот конвертера на  $360^\circ$  у будь-якому напрямку. Механізм повороту конвертера складається з редукторів, що зв'язують цапфу з приводом через муфту зубчасту або шестеренне колесо. На обертання наводиться кількома електродвигунами. Кількість редукторів і електродвигунів залежить від ємності конвертерів, для великовантажних механізмів повороту роблять двостороннім, тобто. два окремих синхронно працюючих приводи.

По вертикальній осі конвертера зверху через горловину вводиться водоохолоджувальна фурма. Над конвертером, крім фурми, знаходяться газовідвідний тракт та система завантаження сипких матеріалів. Під конвертером по рейках переміщуються сталевоз і шлаковоз (візки для сталерозливного та шлакового ковшів).


За конфігурацією кожуха внутрішнього робочого об'єму існуючі конвертери можна поділити на два типи. В Україні, країнах СНД, Франції, Німеччині випускають конвертери першого типу з геометрією робочого об'єму у формі зрізаного конуса зі сферичним або плоским днищем, що відповідає топографії зносу футерівки. У США, Японії, Англії, Канаді використовують конвертери другого типу з циліндричною формою робочого об'єму та сферичним днищем великого радіусу, що забезпечує найбільшу глибину ванни у її центральній частині. Водоохолоджувана фурма для подачі кисню в конвертер виготовляється зазвичай з трьох суцільнотягнутих сталевих труб, що концентрично входять одна в іншу. По центральній трубі подається кисень, дві зовнішні служать для охолодження. Нижня частина фурми закінчується наконечником (соплом).

Сопло являє собою профільовану насадку, призначену для перетворення потенційної енергії газового потоку в кінетичну та надання йому заданого напрямку. Сопло може бути циліндричним, що звужується або комбінованим: звужується і потім розширюється.

Фурму встановлюють вертикально осі конвертера. Тиск води, що охолоджує фурму, зазвичай 0,6..1,0 МПа і повинен бути достатнім, щоб різниця температур води на вході і виході фурми не перевищувала  $40^\circ\text{C}$  (для надійного охолодження  $15..20^\circ\text{C}$ ). Загальна витрата води для охолодження залежить від ємності конвертера та розмірів фурми.

Тиск кисню перед соплом становить зазвичай 1..1.5 МПа. При введенні присадок сипучих та під час викидів витрата кисню знижується.

Під час продування у конвертері утворюється значна кількість газів. Для використання тепла газів, що відходять, і очищення цих газів за кожним конвертером встановлюється котел-утилізатор і установка для очищення газів. Управління конвертерним процесом здійснюється за допомогою електронно-обчислювальних машин, в які водиться інформація про показники процесу (склад і кількість чавуну, брухту, вапна, газів, що



відходять, температура та ін.). Отримана після продування рідка сталь випускається з конвертера в сталерозливний ківш, встановлений на електрифікованому дистанційно керованому самохідному візку і передається у відділення позапічної обробки та розливне відділення.

*Конструкція фурми.* Кисень надходить у конвертер водоохолоджуваної фурми, виготовленої з трьох цільнотягнутих труб, що концентрично входять одна в іншу. Знизу фурма закінчується мідним наконечником головкою. Головка фурми є змінною. Її кріплять до сталевих труб за допомогою різьблення та зварювання. Кисень, як правило, подається по центральній трубі, дві зовнішні служать для підведення та відведення води. Є конструкції фурм із центральною подачею охолоджувача. Тиск кисню, що подається у фурму, знаходиться в межах 0,9-1,5 МПа, тиск води для охолодження 0,6-1,0 МПа. Температура води, що відходить з фурми, не повинна перевищувати 40 °С.

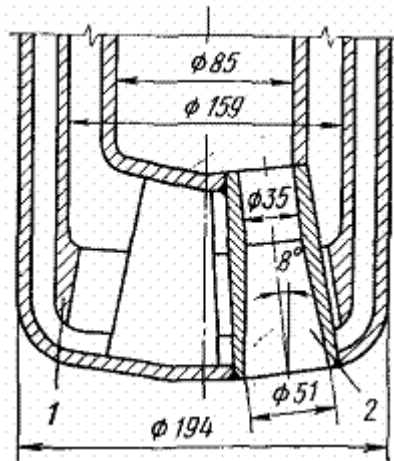
Фурму встановлюють вертикально, по осі конвертера. Висоту розташування фурми над рівнем металу змінюють протягом плавки. Підйом і опускання фурми здійснюються за допомогою механізму, зблокованого з механізмом обертання конвертера. Конвертер не можна повернути, доки з нього не видалено фурму. Конструкція фурми дуже впливає на роботу конвертера і визначає його продуктивність, стійкість футерівки, вихід придатного і т. д.

Найбільш простими за конструкцією є односоплові фурми. Односоплові фурми успішно використовують у конвертерах малої та середньої ємності при витратах кисню, що не перевищують 200-300 м<sup>3</sup>/хв.

Зі збільшенням розмірів конвертерів та кількості кисню, що подається через одне сопло, різко збільшилася кількість викидів. Це призвело до зменшення виходу придатного та зниження стійкості футерівки. Застосування багатосоплових фурм дозволило отримати розосереджене (м'яке) дуття, при якому збільшується площа реакційної зони, зменшується кількість викидів, що дає можливість працювати з великими витратами кисню (500-900 м<sup>3</sup>/хв).

Найбільшого поширення набули три- (рис. 1.2) і чотирисоплові фурми. Головки цих фурм мають віялоподібно розбіжні сопла, нахилені під кутом 6-15° до осі фурми. Стійкість фурм складає 70..300 плавок.

*Зважування та дозування сипких матеріалів.* Технологічне обладнання системи зважування і дозування сипучих матеріалів включає до свого складу витратні бункери, віброживильники, ваговимірювальні бункери, затвори клапанів і т.д. проміжний бункера. Для подачі сипких проміжних бункерів безпосередньо в кисневих конвертер використовується система конвеєрних транспортерів.



1 – розподільник води, 2 – сопло Лаваля

Рисунок 1.2 – Головка трьох соплової фурми

### Опис технологічного процесу виплавки сталі


Роботу конвертера можна розбити на такі періоди:

- 1) завалка та заливання;
- 2) продування;
- 3) повалка;
- 4) додування;
- 5) випуск та доведення.

*Завалка та заливання.* У конвертер завантажують сталевий брухт і частину вапна (протягом 2 хвилин). Потім заливають чавун. При цьому відбувається плавлення брухту, що знаходиться в конвертері. Маса металошихти повинна забезпечувати масу рідкої сталі трохи більше 180 т. Масову витрату чавуну та металобрухту для плавки визначають за рекомендаціями АСУ ТП. Масову витрату чавуну та брухту повинні забезпечити після закінчення продування задані значення температури, вмісту вуглецю в металі та FeO у шлаку. При відхиленні цих параметрів від заданих значень, у тому числі за температурою металу більш ніж на 20°, перешивають плавки.

*Продування.* Продування плавок проводять за режимами з частковим або з повним допалюванням окису вуглецю. Положення кисневої фурми щодо рівня металу у ванні при витраті кисню 100-500 м<sup>3</sup>/хв встановлюють виходячи з нормативів, що визначаються вмістом вуглецю у ванні, а також заданою кількістю вуглецю в сталі. Для продування використовують кисень чистотою не нижче 99,5% із вмістом азоту не більше 0,15%. Тиск кисню в цехової магістралі перед фурмою має бути не меншим 1,5 МПа при витраті кисню 100..500 м<sup>3</sup>/хв;

Після закінчення продування роблять вимір температури та відбір проб металу та шлаку з обов'язковим спуском шлаку. У пробах шлаку визначають вміст CaO, MgO, SiO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S, FeO та основність. У пробах



металу визначають вміст Mn, S, F, Cu, Ni, Cr, N. Температура металу перед випуском плавки повинна бути в таких межах: 1580 °С - 1600 °С - при розливанні сталі в сляби товщиною 250 мм; 1575 °С - 1595 °С - при розливанні сталі в сляби завтовшки 300 мм. Випуск плавки здійснюють після отримання аналізу металу на вміст вуглецю, сірки, фосфору та температури заданого значення. Тривалість випуску плавки повинна становити щонайменше 6 хв.

*Повалка.* Встановлення заданої концентрації вуглецю сталі досягається за допомогою проміжної плавки. При цьому фурму піднімають, вимикають дуття, переводять конвертер у горизонтальне положення, відбирають проби металу та шлаку та заміряють температуру ванни за допомогою термопари занурення. Чекаючи на результати аналізу, трохи повертають конвертер.

*Додування.* Коли після продування вміст сірки та фосфору в сталі, або її температура не відповідають заданим значенням параметрів, додають плавки. Додування металу на сірку та фосфор рекомендується здійснювати за наступним режимом:

- положення фурми вище за базове положення на 300-1500 мм;
- інтенсивність продування в межах від 100 до 500 м<sup>3</sup>/хв;
- витрата вапна з розрахунку від 1 до 3 т. на кожну хвилину додування.

Додування металу на температуру виробляють за наступним режимом:

- становище фурми звичайне, або підвищене на 300-1500 мм,
- тривалість додування визначають за технологічним розрахунком;
- при вмісті С у металі рівному не менше 0,085 виробляють присадку<sub>2</sub> та термоантрациту з розрахунку 300 кг на одну хвилину додування.

*Випуск.* Під час випуску сталі конвертер нахилиють. Сталь зливають через випускний отвір у сталерозливний ківш, шлак - у чашу.

*Доведення.* Сталь у ковші піддається позапічної обробки вакуумом, аргоном, азотом і т.д. Розкислення та легування металу виробляють у сталерозливному ковші. Витрата розкислювачів і легуючих добавок визначається з розрахунку отримання середньозаданого вмісту елементів готової сталі. Тривалість циклу становить 30-45 хв.

У конвертерному виробництві випускають такі типи сталей: вуглецева звичайної якості (А, Б, В); вуглецева якісна конструкційна, легована конструкційна; низьколегована і т.д.

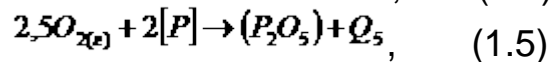
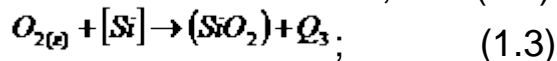
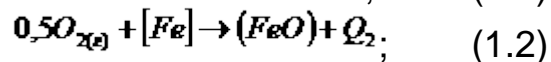
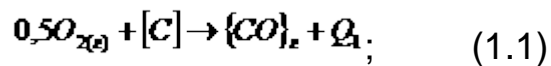
Перетворення рідкого чавуну і твердого сталевого брухту в рідку сталь, що здійснюється в кисневому конвертері, являє собою складне поєднання хімічних і теплових процесів, розвиток яких у часі обумовлено як дифузійною, так і хімічною кінетикою. Хімічним реакціям належить провідна роль, оскільки вони визначають нагрівання металу і, тим самим, можливість перетворення чавуну на сталь. Тому конвертер можна розглядати як хімічний реактор періодичної дії, в якому відбуваються реакції окислення різних елементів і процеси перерозподілу домішок і тепла між шлаком і металом, що утворюється. Термодинамічно зрозуміло, що окислення вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору та заліза киснем при звичайних для конвертерного процесу температурах (1400 – 1600 °С) має здійснюватися досить повно. Необоротність реакцій окислення вуглецю забезпечується безперервним



видаленням з реактора газоподібного оксиду, що утворюється. Для інших елементів, що переходять у шлакову фазу, повної незворотності відповідних реакцій не може бути. Достатньо повне перебіг приватних реакцій забезпечується великим зменшенням вільної енергії системи під час утворення продуктів реакцій. Зниження вільної енергії досягається тією чи іншою мірою і шляхом хімічного зв'язування цих продуктів у шлаку. Присутність основних оксидів у шлаку зазвичай є достатньою умовою перебігу більшості реакцій рафінування. Достатньо повне перебіг приватних реакцій забезпечується великим зменшенням вільної енергії системи під час утворення продуктів реакцій. Зниження вільної енергії досягається тією чи іншою мірою і шляхом хімічного зв'язування цих продуктів у шлаку. Присутність основних оксидів у шлаку зазвичай є достатньою умовою перебігу більшості реакцій рафінування.

Розчинення вапна в оксидах, що утворюються, призводить до утворення основного шлаку і фіксації в ньому сірки і фосфору.

Хімічні реакції окислення домішок чавуну, формально опишемо результуючими стехеометричними рівняннями наступного типу:



де  $Q_i$  – теплові ефекти відповідних реакцій.

Зміна вільної енергії цих реакцій дозволяє оцінювати ступінь повноти їхнього протікання. Значення теплових ефектів реакцій дають можливість розрахувати зміну температури системи метал – шлак у процесі.

Наведені реакції окиснення елементів чавуну екзотермічні. Тепло, що виділяється при їх протіканні, забезпечує не тільки нагрівання до необхідної температури рідкої сталі, що отримується з чавуну, а й досить значний надлишок тепла. Саме він визначає можливість використання в шихті конвертера холодного сталевого брухту в кількості 25 – 50% від маси чавуну (залежно від хімічного складу, температури чавуну, а також режиму допалювання газів) та 5 – 8% вапна.

**Статичні моделі.** Статичні моделі складаються з представлення конвертерного процесу як об'єкта з зосередженими параметрами, не



поділяючи їх у окремі зони і тому розглядається взаємодія цих зон. Ці моделі в першу чергу повинні зробити розрахунок шихти.

**Динамічні моделі.** Динамічні моделі кисневого процесу будуються на підставі фізичних та фізико-хімічних закономірностей процесу, що протікають у сталеплавильній ванні, і тому в їх основі лежить детермінований підхід. Але так як скласти суто детерміновану модель при існуючому рівні знань про сталеплавильні процеси неможливо, то частина коефіцієнтів моделі визначається статичним шляхом при ідентифікації моделі за результатами промислових плавок. Тому динамічні моделі конвертерного процесу відносяться до комбінованого детерміновано-статистичного типу.


У загальному випадку динамічні прогнозуючі моделі повинні характеризувати зміну параметрів процесу плавки в часі і тому є системами диференціальних рівнянь.

### **ІНСТРУКЦІЯ З ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМИ-СИМУЛЯТОРА**

*Запуск програми.* Для запуску імітаційної моделі кисневого конвертера необхідно запустити файл KKModel.exe.

*Налаштування програми.* Конфігурація налаштувань імітаційної моделі здійснюється в діалоговій формі «Налаштування», викликати яку можна з меню Параметри->Налаштування. Зліва представлено дерево розділів налаштування, що містять наступні частини: анімація, запис даних, моделі, керуючий алгоритм, бункера, фурма. Щоб прийняти налаштування, потрібно натиснути клавішу «Застосувати» або скасувати введені параметри «Скасувати». Встановлення нових параметрів налаштування доступне не завжди. Блокування встановлюється на час проведення плавки, і знімається при припиненні моделювання процесів, що протікають в кисневому конвертері.

*Запуск моделі.* Для початку проведення плавки необхідно вибрати режим, в якому вона протікатиме. Зміна режиму роботи здійснюється зміною положення покажчика перед списком можливих режимів запуску у верхньому лівому куті основної форми програми (за замовчуванням встановлено режим автоматичного керування). Далі, щоб запустити модель, необхідно натиснути кнопку «Старт». У разі запуску моделі в ручному або автоматичному режимі керування з'явиться діалогова форма для встановлення початкових даних плавки. У ній необхідно задати або здійснити вибір із запропонованих варіантів за такими необхідними даними: марку і температуру чавуну, що використовується, марку, температуру і масу сталі, яку необхідно виплавити. Для завдання випадкових даних передбачено кнопку «Випадковий вибір», при натисканні яку всі поля заповняться із запропонованих варіантів випадковим чином використовуючи генератор випадкових чисел. Після вибору всіх початкових даних необхідно натиснути кнопку «Застосувати» для початку плавки, або «Скасувати», щоб скинути введені дані. При режимі чистого імітатора діалогове вікно для початкових даних має інші інформаційні



поля. Чистий імітатор отримує номер архівної плавки, виплавлення якої необхідно проімітувати.

*Управління моделлю.* Управління моделлю здійснюється тільки в режимі ручного керування на віртуальному пульті, розташованому в нижньому лівому куті основного вікна програми. Складається пульт з тематичних розділів: лом і чавун, кисень і фурма, сипучі та бункери, злив сталі та шлаку. Для захисту від неправильної послідовності періодів плавки, введення аварійних та неправильних заданих значень передбачена система блокувань та обмежень.

*Вихідні розрахункові дані.* Дані моделювання відображаються у кількох місцях за тематичною ознакою. Виведення поточних значень усіх технологічних параметрів здійснюється у таблиці «Технологічні параметри», розташованій праворуч на вкладці «Анімація». На вкладці «Графіки» будуються графіки зміни положення фурми, витрати кисню, сумарного вдутого кисню, сумарно завантаженого вапна, температури сталі та вмісту вуглецю в сталі. У таблицю на вкладці «Таблиці» заносяться значення всіх технологічних параметрів, що моделюються, в поточний момент часу. Інформація на вкладку «Результати плавки» заноситься в міру надходження даних, а таблиця «Результати плавки», що розташована на ній, заповнюється при завершенні виплавки сталі.

*Довідкова інформація та допомога.* Для отримання допомоги за проектом необхідно скористатися help-ом, натиснувши пункт меню Довідка->Help. Щоб отримати інформацію про проєкт, необхідно вибрати пункт меню Довідка->Про проєкт.

**Критерії оцінювання виконаної роботи:** знання конструкції та технології, основні контрольовані та регульовані параметри, функції АСУТП, використовувані моделі, якість обробки та побудови графіків, правильність висновків.

**Зміст звіту:** Звіт оформляється в Microsoft Word поточної версії та завантажується в Moodle. Звіт повинен містити детальний опис дій, відповідні графіки та висновки. Якщо це потрібно, в звіт можна додавати копії екрану монітора з поясненнями.

**Захист роботи.** Після завантаження звіту у Moodle викладач перевіряє звіт. У випадку відсутності суттєвих помилок робота оцінюється 60% від максимально можливої кількості балів, що зазвичай наведена в семестровому графіку. Для підвищення оцінки здобувач повинен публічно захистити роботу.



## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Технологія виплавки сталі у кисневому конвертері (конструкція агрегату, вихідні матеріали, хід плавки, обробка готової сталі).
2. Перелік параметрів розплаву та рідкої сталі, що характеризують властивості сталі, та їх зразкові значення (діапазон).
3. Основні контури контролю та регулювання.
4. Статична та динамічні (інформаційні, керуючі) моделі АСУТП конвертерної плавки, їх призначення.
5. Алгоритми управління виплавою сталі у кисневих конвертерах.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравченко В. П., Койфман О. О., Сімкін О. І. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2023. 276 с.  
URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/482>.
2. СТАНДАРТ АСУ ТП 2.0. Вид. офіц. Київ : ТОВ «МЕТІНВЕСТ ДІДЖИТАЛ», 2020. 50 с.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### Дослідження роботи системи управління машиною безперервного розливу заготовок методом математичного моделювання

**Мета роботи:** вивчення роботи машини безперервного розливання заготовок, основних параметрів процесу розливання металу; вивчення функцій АСУ ТП агрегату, впливу роботи АСУ ТП на перебіг технологічного процесу; отримання навичок у обробці експериментальних даних серед EXCEL.

### ЗАВДАННЯ

Після ознайомлення з матеріалом теоретичної частини цієї лабораторної роботи, а також з джерелами [1, 2] з переліку рекомендованої літератури, виконати п'ять завдань, що виконуються за допомогою обчислювальних експериментів:

**Завдання 1. Порівняння розливання заготовок різної товщини.** Провести три експерименти для розливання слябів однієї марки сталі, але мають різну товщину. Результати оформити як таблиці MS Excel.

*Пояснення.* Для виконання моделювання необхідно змінити параметр "товщина" у діалоговому вікні "Геометрія ЗВО", запустити процес розрахунку, натиснувши кнопки "Перезапуск" та "Пуск" та дочекатися досягнення початком зливка позначки 37 м (різак МГР). Операцію повторити тричі з різними значеннями товщини, зберігаючи отримані дані між перезапуском.

**Завдання 2. Порівняння розливання заготовок різної ширини.** Провести три експерименти для розливання слябів однієї марки сталі, але мають різну ширину. Результати оформити як таблиці MS Excel.

*Пояснення.* Для виконання моделювання необхідно вибрати таблицю в діалоговому вікні "Вибір таблиці" (вибрана ширина слябу в математичній моделі встановиться автоматично), запустити процес розрахунку, натиснувши кнопки "Перезапуск" і "Пуск" і дочекатися досягнення початком зливка позначки 37 м. Для проведення експерименту вибираються таблиці для однієї групи сталей, але різної ширини зливка. Операцію повторити тричі з різними значеннями товщини, зберігаючи отримані дані між перезапуском.

**Завдання 3. Порівняння розливання заготовок різних марок сталі.** Провести два експерименти для розливання слябів різних марок сталі, але такі, що мають однаковий переріз. Результати оформити як таблиці MS Excel.

*Пояснення.* Для виконання моделювання необхідно вибрати таблицю в діалоговому вікні "Вибір таблиці", запустити процес розрахунку, натиснувши кнопки "Перезапуск" та "Пуск" і дочекатися досягнення початком зливка позначки 37 м. Для проведення експерименту вибираються таблиці для однієї ширини зливка, але різних груп сталей .



**Завдання 4.** Порівняння розливання заготовок одного перерізу з різною швидкістю витягування. Провести три експерименти для розливання слябів однієї марки сталі і мають однаковий переріз із різною швидкістю витягування. Результати оформити як таблиці MS Excel.

*Пояснення.* Для виконання моделювання необхідно встановити двигун задатчика швидкості у вибране положення, запустити процес розрахунку, натиснувши кнопки "Перезапуск" та "Пуск" та дочекатися досягнення початком зливка позначки 37 м (різак МГР). Експеримент проводиться для однієї марки сталі з постійними значеннями ширини та товщини. Операцію повторити тричі з різними значеннями швидкості, зберігаючи отримані дані між перезапуском.

**Завдання 5.** Порівняння перехідних процесів при різних налаштуваннях регуляторів. Провести кілька експериментів із різними налаштуваннями регуляторів, порівняти отримані перехідні процеси. Результати оформити як таблиці MS Excel.

*Пояснення.* Для виконання експерименту необхідно змінити налаштування регулятора однієї з секцій ЗВО, після чого запустити програму та дочекатися досягнення початком зливка обраної секції ЗВО. Провести кілька експериментів із різними значеннями налаштувань регуляторів, зберігаючи отримані дані між перезапуском.

У процесі проведення всіх експериментів повинні бути зроблені висновки про відмінності в протіканні процесів розливання і про причини, що викликають ці відмінності. У ході зведеного порівняння студент має порівняти результати різних експериментів між собою та зробити відповідні висновки. Наприклад даються таблиці з обробленими результатами експериментів.

*Для порівняння використовувати графіки залежностей:*

1. Температур зливку  $t_0$ ,  $t_2$ ,  $t_4$  та середньої ( $t_{\text{сеп}}=(t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4)/5$ ) від координати початку зливка (файл data.txt). Зробити висновок.
2. Питомої площі зрощення від координати початку зливка (файл data.txt). Зробити висновок.
3. Витрат води секціями ЗВО (подбой,  $1r+1R$ ,  $2r+2R$ ,  $3r+3R$ ,  $3ar+3aR$ ,  $4r+4R$ ,  $5r+5R$ , всього 7 секцій) від часу в сек. Обчислити і порівняти кількість використаної води за 100 с роботи МБРЗ. Зробити висновок.


## ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

**Загальна характеристика об'єкта.** Відділення безперервного розливання сталі металургійного комбінату імені Ілліча представлено двома криволінійними однострумовими слябовими МБРЗ загальною продуктивністю 1.5 млн. т заготовок на рік. Комплекс обладнання МБРЗ призначена для отримання мірних слябових заготовок товщиною 235, 250 і 280 мм та шириною 1600...1900 мм з конструкційних, вуглецевих, рядових та низьколегованих сталей, а також передачі заготовок на стенд слябів та штабелювання заготовок.

Кожна МБРЗ, технічні характеристики яких наведені в табл. 1.1) забезпечена двома проміжними ківшами (робочим та резервним). Маса порожнього промківшу – 15 т, наповненого – 35 т. Температура металу у промківші – 1500..1580 градусів. Діапазон виміру маси промківшу з металом - 0...35 т, діапазон вимірювання маси металу у промківші - 0..20 т. Номінальне значення маси металу у промківші – 18,2 т, верхнє аварійне значення маси металу 19,5 т; нижнє – 9,7 т.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика МБРЗ

Тип машини	криволінійна
Кількість струмків	1
Вага плавки номінальна, т	155
Цикл подачі плавки на МБРЗ, хв.	50
Продуктивність МБРЗ, т/рік	750
Ємність сталювша по рідкому металу, т	160
Висота підйому сталювша на стенді, мм.	600
Місткість промківша по рідкому металу при працюючому рівні, т	19
Робочий рівень у промківші, мм.	900
Висота підйому промківша на підйомно-поворотному стенді, мм.	500
Сортамент заготовок, мм. за товщиною; за шириною.	235,250,280 1550-1900
Радіус кривизни базової стінки кристалізатора, мм.	8000
Висота кристалізатора, мм.	1200
Частота гойдання кристалізатора, 1/хв	20-120
Закон руху кристалізатора	синусоїдальний
Швидкість розливання, м/хв: - за механізмами - технологічна максимальна для слябів завтовшки: 235 мм. 250 мм. 280 мм.	0.2-1.6  1.35 1.20 0.85
Загальна технологічна довжина машини (по зовнішній поверхні слябу від верху кристалізатора до осі останнього ролика зони вторинного охолодження), мм в тому числі : - Довжина радіальної ділянки, мм. - Довжина криволінійної ділянки, мм.	27900  9646 6081
Довжина заготовки після порізу в потоці МБРЗ мм.	5600-8500
Позначка рівня розливного майданчика, мм.	+9435
Позначка рівня полотна рольгангів, мм.	+800
Швидкість руху заготівлі по рольгангах, м/с	0.5
Швидкість переміщення рольганг - візки, м/с	до 2.5
Маса заготівлі максимальна, т	35
Кількість штабелюючих пристроїв, шт.	2
Кількість заготовок, що штабелюються в пакет (максимальне), шт.	3



МБРЗ забезпечена поворотним розливним станом, призначеним для встановлення та зміни стальківші. Сталевиливальний ківш забезпечений шибєрним затвором. На кожен візок для сталєрозливного ковша встановлюється два силовимірювальні перетворювачі, діапазон зміни навантаження на один силовимірювальний перетворювач: 0...200 кН.

Вага плавки – 155 т. Кількість плавок на добу – 17, серійність плавок – 10 і більше.

Максимальна швидкість машини – 1.6 м/хв.

Кристалізатор мідний, має систему каналів, через які подається вода, що охолоджує.

Зона вторинного охолодження розташована між кристалізатором і роликами, що тягнуть. Система охолодження роликів – форсункова. Технологічна довжина машини від верху кристалізатора до останнього ролика ЗВО 27.9 м. Привід роликів ЗВО індивідуальний.

Далі по ходу металу розташована машина газового різання, призначена для порізу сляба на мірні заготовки довжиною від 5.6 до 8.5 м. Рольганг під МГР (модуль газового різання) забезпечений роликами, що перекидаються, що опускаються на час проходження різаків МГР.

**Використовувані енергоресурси.** Електропостачання АСУТП МБРЗ передбачається за першою категорією надійності від двох незалежних джерел живлення з автоматичним введенням резерву.

Електроживлення системи сигнальної автоматики та обчислювальної техніки здійснюється напругою 220В частотою 50 Гц.

Для кисневого різання злитків машини газового різання (МГР) застосовуються такі енергоресурси:

- кисень технічний другого сорту за ГОСТ 5583 – 78 чистотою не нижче 99.5 %, вологістю не більше 0.5 г/куб м, тиском 14 – 16 атм;

- природний газ тиском 3 атм теплотворною здатністю 8200 – 8300 ккал/куб м;

- вода тиском 3 – 4 атм; температурою 20 – 40 град, жорсткість води не більше 140 мг екв/л.

- стиснене повітря для живлення засобів автоматизації тиском 1.4 атм з періодичною витратою;

- неочищене стиснене повітря для охолодження злитка тиском 4...6 атм та максимальною витратою 2000 куб м/год;

- стиснене повітря для пневмоприводів та повітряного охолодження: тиск 0.4...0.6 МПа, клас забрудненості 10.

Примітка: допускається коливання води 10 мм водного стовпа.

**Опис технологічного процесу.** Перед прийомом плавки МБРЗ готується до розливання. Усі механізми наводяться у вихідні положення: у кристалізатор за допомогою ливарного крана заводиться затравка. Встановлення затравки в кристалізатор проводиться верхнім приводом роликової зони при керуванні робочого місця розливника (РМР). Промківш, попередньо розігрітий, встановлюється на підйомно-поворотний стіл у робочу та резервну позицію. З комфортного місця чергового мастила (КМДС)



за 10 - 15 хв до початку розливу запускається таймер часу для автоматичної циклічної роботи системи мастила МБРЗ, з ПУ-1 відкриваються засувки системи охолодження обладнання та зливка. За допомогою АСУТП з поста ПУ-1 проводиться перевірка готовності обладнання, вихідного положення механізмів, системи автоматики, мастила та розливання. Стан готовності висвітлюється на екранах комп'ютерів. Розливний ківш з металом встановлюється на поверхневий двопозиційний стенд у резервну позицію, де до шиберного затвору стальківша приєднується виконавчий механізм. Управління механізмом здійснюється за допомогою посту кнопки, що звисає з консолі стенда. Стенд із ковшем переводиться в робочу позицію при ручному управлінні з РМР; відкривається шибер і метал подається до проміжного ківша. З метою захисту струменя рідкого металу від вторинного окиснення між стальківшем та промківшем встановлюються за допомогою спеціального механізму захисні металопроводи. Управління механізмом - з підвісного посту кнопки, загального для управління механізмом шиберного затвора. Для зменшення охолодження струменя металу на ділянці стальківш-промківш сталерозливний стенд опускається і залишається в такому положенні на весь період розливання. Управління механізмом підйому - опускання стенду здійснюється вручну з РМР. При наповненні промківша відкривається стопор промківша, а після заповнення металом кристалізатора проводиться запуск МБРЗ з РМР: включаються механізми гойдання кристалізатора, ролик зона, верхні зони вторинного охолодження, відлік загальної довжини зливка, системи стеження за переднім кінцем зливка та інші системи. Швидкість розливання поступово доводиться до робочої технічної системи регулювання рівня металу в промковші і кристалізаторі переводиться в автоматичний режим. відлік загальної довжини зливка, системи стеження за переднім кінцем зливка та інші системи. Швидкість розливання поступово доводиться до робочої технічної системи регулювання рівня металу в промковші і кристалізаторі переводиться в автоматичний режим. відлік загальної довжини зливка, системи стеження за переднім кінцем зливка та інші системи. Швидкість розливання поступово доводиться до робочої технічної системи регулювання рівня металу в промковші і кристалізаторі переводиться в автоматичний режим.

У міру просування зливка автоматично включаються відповідні зони вторинного охолодження, витрата води регулюється по зонах і гранях зливка функції швидкості розливання. АСУТП здійснює вимірювання та допусковий контроль технологічних параметрів розливання з поданням інформації через комп'ютери та мнемосхеми. При виході затравки із зони вторинного охолодження автоматично проводиться відділення її головки від зливка та підйом у положення для зберігання під розливним майданчиком. При підході зливка до мірного ролика здійснюється коригування загальної довжини, а потім автоматичний відлік мірних довжин слябів.

Різання заготовок проводиться автоматично під час керування з ПУ-2. Програма розкрою реалізується АСУТП. Рольганг під МГР забезпечений роликами, що перекидаються, що опускаються на час проходження різаків



МГР. Продукти різання грануються та забираються. Після відрізання слябів рольганг за МГР і частина роликів, що перекидаються, переводиться на транспортну швидкість.

Сляб передається до маркувальника, маркується із зупинкою у маркувальника і передається на приймальний рольганг, де зупиняється в очікуванні завантаження на рольганг-візок.

Під час розливання АСУТП здійснює контроль роботи обладнання МБРЗ: завантаження тягуче правильного апарату, відмови в роботі електрообладнання, стан насосних станцій та іншого обладнання в обсязі технічних завдань.

За наслідками розливання АСУТП видає норму допускового контролю технологічного процесу, норму контролю стану технологічного обладнання, паспорт розливання плавки.

При готовності чергової плавки при розливі "плавка на плавку" сталерозливний ківш з металом встановлюється на сталерозливний стенд в резервну позицію. При випорожненні попереднього ковша сталерозливний стенд піднімається, повертається, встановлюється над робочим промківшем, відкривається шибер чергового ковша, і розлив продовжується.

Якщо розлив ведеться одиночними плавками, то при випорожненні сталюковша закінчується розлив промківша, кінець зливка заморожується і видається з машини.

З метою скорочення часу підготовки МБРЗ до прийому наступної плавки її конструкція дозволяє заводити затравку при виході кінця злитка попередньої плавки горизонтальну ділянку роликів зони вторинного охолодження.

**Базові вимоги до АСУТП.** АСУТП призначається для управління процесами безперервного розливання сталі та порізу безперервно - литого зливка. При управлінні повинні забезпечуватись необхідні за умовами технологічної інструкції параметри процесів.


АСУТП складається із двох рівнів.

У нижній рівень входять локальні підсистеми, що здійснюють збір первинної інформації, керування технологічним обладнанням та дистанційне керування технологічними параметрами процесу безперервного розливання сталі.

Верхній рівень містить підсистеми, що працюють за алгоритмами, заснованими на методах оптимального управління, та реалізується на базі ЕОМ. До основних завдань, що працюють на верхньому рівні АСУТП, належать, зокрема, математична модель процесу розливання металу, завдання видачі заданих значень витрати води за секціями ЗВО на автоматичні регулятори локальних систем, завдання автоматичного ведення документації.

Нижній рівень АСУТП містить такі підсистеми:

- контроль параметрів;
- регулювання рівня сталі у промківші;
- регулювання рівня сталі у кристалізаторі;

- 
- регулювання витрати охолоджувальної води на кристалізатор;
  - регулювання витрати мастила на кристалізатор;
  - регулювання витрати охолоджувальної води на загальне підведення ЗВО;
  - регулювання витрати повітря на загальне підведення ЗВО;
  - регулювання витрати охолоджувальної води за секціями ЗВО;
  - відсікання повітря за секціями ЗВО;
  - пуск МГР;
  - регулювання витрати повітря на МГР;
  - регулювання витрати газу на МГР;

**Робота з програмою-імітатором.** Програма складається з модуля MNLZ.EXE, текстових файлів конфігурації і файлів, що містять растрові зображення.

Налаштування регуляторів секцій ЗВО зберігаються у конфігураційному файлі в текстовому форматі. Файли звіту створюються у вигляді таблиці у текстовому форматі для зручності імпортування до формату MS Excel. Завантаження файлу здійснюється під час запуску програми, створення файлів звіту здійснюється при натисканні кнопки на панелі керування. Передбачається, що конфігураційні файли знаходяться в поточному каталозі програми. Завантаження інших файлів не передбачено.

Програмою використовуються та створюються такі файли:

- settings.dat - файл налаштувань моделі;
- setregs.dat – файл налаштувань регуляторів;
- data.txt - файл звіту, що містить дані про температуру металу та питому витрату води;
- data2.txt - файл звіту, що містить дані про перехідні процеси в локальних системах стабілізації витрати води на ЗВО.

**Основне вікно програми.** Після запуску програми керування передається її головному вікну, що надає частину інформації про перебіг процесу розливання та елементи керування (рис. 2.1).

На основному вікні програми знаходиться панель інструментів, графік питомої щільності зрошення, схематичне зображення машини безперервного лиття заготовок і рядок статусу, що надає інформацію про переріз зливка, час від початку розливу та повну довжину зливка.

Для зміни швидкості витягування служить двигун задатчика швидкості. Також можна змінити швидкість клавішами "Вправо" та "Вліво".

Панель інструментів (рис. 2.2) містить такі елементи керування та налаштування.

Кнопки: "Вихід" - вихід із програми; "Створити звіт" - створення файлів звіту; "Перезапуск" - перезапуск моделі; "Пуск" - запуск моделі; "Пауза" - призупинення розрахунку; Графік температур - перегляд графіка розподілу температур

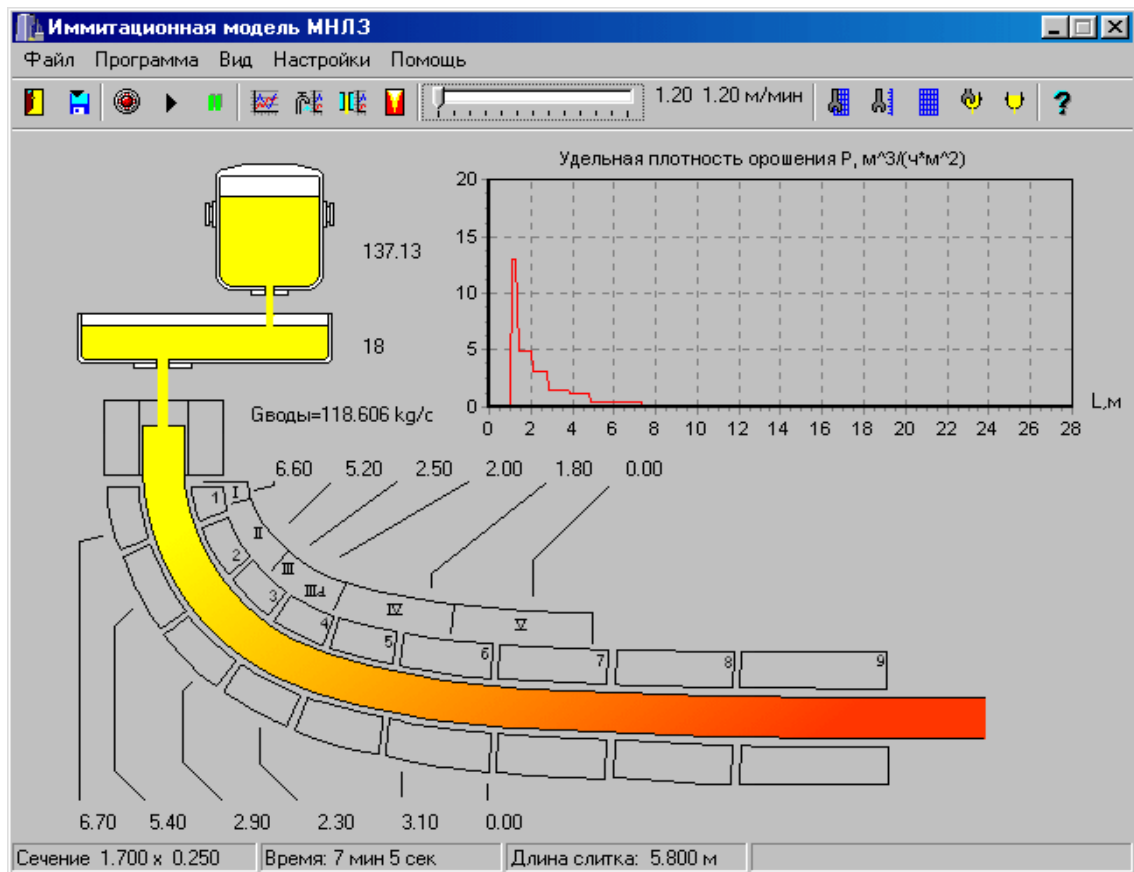


Рисунок 2.1 – Основне вікно програми



Рисунок 2.2 – Панель інструментів

Кнопка "Регулятори ЗВО" – перегляд графіка перехідних процесів у ЗВО; "Регулятор кристалізатора" – перегляд графіка перехідних процесів у кристалізаторі; "Карта зон" - Перегляд карти розподілу фаз; "Задатчик швидкості" - завдання швидкості розливання; "Таблиця витрати води" - зміна таблиці витрати води за секціями ЗВО; Кнопка "Геометрія ЗВО" – зміна геометричних параметрів ЗВО; "Вибір таблиці" - вибір таблиці витрати води за секціями ЗВО; "Властивості сталі" - зміна фізичних параметрів сталі; "Параметри наступної плавки" - Зміна параметрів наступної плавки; "Допомога" - перегляд файлу допомоги.

Система меню, що випадають, містить пункти відповідні органам керування панелі інструментів із зазначенням швидких клавіш.

**Вибір таблиці витрати води.** Щоб змінити таблицю витрати води, необхідно викликати діалогове вікно вибору таблиці витрати води (рис. 2.3), натиснувши кнопку на панелі керування або вибравши відповідний пункт меню "Налаштування".

Діалогове вікно дозволяє вибрати таблицю витрати для однієї з двох груп сталей та для одного із трьох значень ширини.

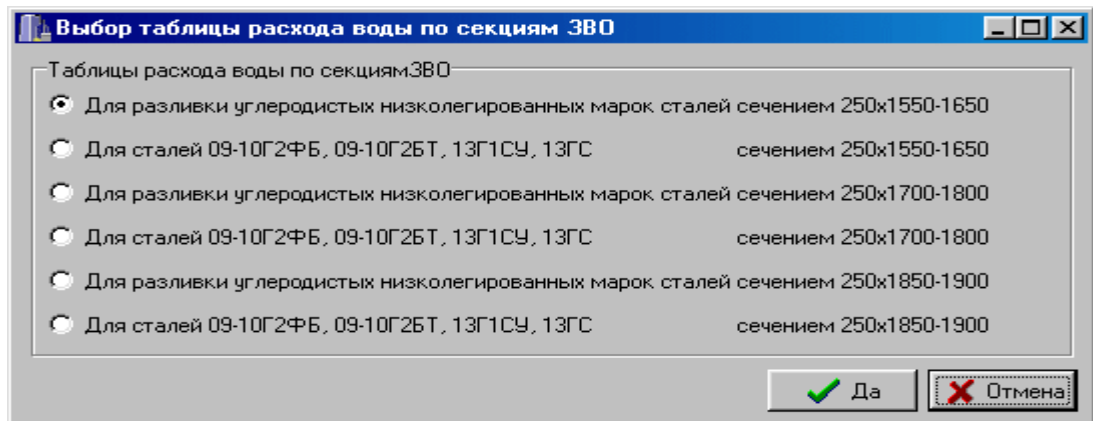


Рисунок 2.3 – Діалогове вікно вибору таблиці витрати води

**Зміна геометрії зливка.** Для зміни геометричних параметрів необхідно викликати діалогове вікно зміни геометрії (рис. 2.4), натиснувши кнопку на панелі керування або вибравши відповідний пункт меню “Налаштування”

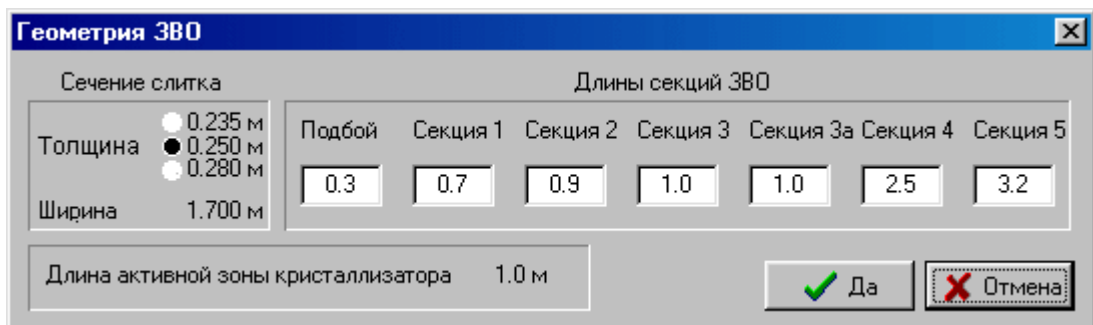


Рисунок 2.4 – Діалогове вікно зміни геометрії зливка

Діалогове вікно дозволяє змінити товщину зливка та довжини секцій ЗВО.

### Зміна параметрів наступної плавки

Щоб змінити параметри наступної плавки, необхідно викликати діалогове вікно зміни параметрів наступної плавки (рис. 2.5), натиснувши кнопку на панелі керування або вибравши відповідний пункт меню “Налаштування”.

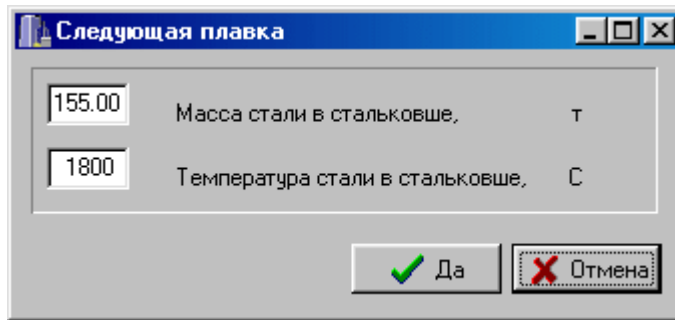


Рисунок 2.5 – Діалогове вікно зміни параметрів наступної плавки

**Зміна налаштувань регуляторів.** Щоб змінити налаштування регуляторів, необхідно відкрити файл "setregs.dat" та внести необхідні зміни.

Лістинг файлу "setregs.dat"

//Налаштування\_регуляторів

//Kob\_Tob\_tob\_Kr\_Ti\_Td\_Tb

//Підбій

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

//Секція\_1

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

//Секція\_2

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

//Секція\_3

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

//Секція\_3а

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

//Секція\_4

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000


//Секція\_5

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

0.100000 10.000000 2.000000 35.000000 7.000000 0.000000 0.000000

Як видно з лістингу, у файлі конфігурації вказані назви секцій ЗВО та порядок налаштувань:

- Kob – коефіцієнт передачі об'єкта управління;
- Tob – постійна часу об'єкта управління;
- tob - час запізнення об'єкта управління;
- Kr – коефіцієнт посилення регулятора;
- Ti – час інтегрування;
- Td – час диференціювання;
- Tb – постійна часу баластової ланки.



Після зміни налаштувань регулятора програму розрахунку моделі необхідно перезапустити, оскільки налаштування завантажуються з файлу лише один раз під час запуску програми.

**Критерії оцінювання виконаної роботи:** знання конструкції та технології, основні контрольовані та регульовані параметри, функції АСУТП, використовувані моделі, якість обробки та побудови графіків, правильність висновків.

**Зміст звіту:** Звіт оформляється в Microsoft Word поточної версії та завантажується в Moodle. Звіт повинен містити детальний опис дій, відповідні графіки та висновки. Якщо це потрібно, в звіт можна додавати копії екрану монітора з поясненнями.

**Захист роботи.** Після завантаження звіту у Moodle викладач перевіряє звіт. У випадку відсутності суттєвих помилок робота оцінюється 60% від максимально можливої кількості балів, що зазвичай наведена в семестровому графіку. Для підвищення оцінки здобувач повинен публічно захистити роботу.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Технологія розливання сталі в МБЛЗ (конструкція агрегату, технологія розливання, отримання слябів).
2. Перелік основних технологічних параметрів та їх діапазон.
3. Основні контури контролю та регулювання.
4. Динамічні (інформаційні, керуючі) моделі твердіння та охолодження сталі.
5. АСУ розливання сталі в МБЛЗ, основні функції.
6. Алгоритми управління МБЛЗ.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравченко В. П., Койфман О. О., Сімкін О. І. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2023. 276 с.  
URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/482>.
2. СТАНДАРТ АСУ ТП 2.0. Вид. офіц. Київ : ТОВ «МЕТІНВЕСТ ДІДЖИТАЛ», 2020. 50 с.

## Лабораторна робота №3

### Дослідження роботи нагрівального колодязя з частковою реалізацією функцій АСУ ТП методом математичного моделювання

*Мета роботи:* вивчення роботи нагрівального колодязя, основних параметрів процесу нагрівання металу; вивчення функцій АСУ ТП колодязя, впливу роботи АСУ ТП на перебіг технологічного процесу; отримання навичок у обробці експериментальних даних серед MS Excel.

#### ЗАВДАННЯ

Після ознайомлення з матеріалом теоретичної частини цієї лабораторної роботи, а також з джерелами [1, 2] з переліку рекомендованої літератури, виконати чотири завдання.

##### **Завдання №1.**

1. Провести процес нагрівання 2-х садок зливків різних марок сталей холодного посаду. Результати оформити у вигляді таблиці та графіків у MS Excel.

2. Провести процес нагрівання 2-х садок зливків різних марок сталей гарячого посаду (час, що минув від початку розливу 3 години). Результати оформити у вигляді таблиці та графіків у MS Excel.

*Пояснення:* закінченням процесу нагрівання служить повідомлення «Видача зливків!»; після закінчення нагрівання потрібно вийти з програми та переписати файл rez1 перейменувавши його.

##### **Завдання №2.**


1. Провести процес нагрівання 2-х садків зливків однієї й тієї ж марки стали холодного посаду з мінімальною (1800 ккал/м<sup>3</sup>) та максимальною (2300 ккал/м<sup>3</sup>) калорійністю палива. Результати оформити у вигляді таблиці та графіків у MS Excel та порівняти (час нагріву, витрата палива).

2. Провести процес нагріву 2-х садок зливків однієї й тієї ж марки стали гарячого посаду (час, що минув від початку розливу 5 годин) з мінімальною (1800 ккал/м<sup>3</sup>) та максимальною (2300 ккал/м<sup>3</sup>) калорійністю палива. Результати оформити у вигляді таблиці та графіків у MS Excel та порівняти (час нагріву, витрата палива).

*Пояснення:* закінченням процесу нагрівання служить повідомлення «Видача зливків!»; після закінчення нагрівання потрібно вийти з програми та переписати файл rez1 перейменувавши його.

##### **Завдання №3.**

1. Провести процес нагрівання 2-х садок зливків однієї і тієї ж марки стали холодного посаду з різною кількістю зливків. Результати оформити у вигляді таблиці та графіків у MS Excel.



2. Провести процес нагрівання 2-х садок зливків однієї й тієї ж марки стали гарячого посада (час, що минув від початку розливу 5 годин) з різною кількістю зливків. Результати оформити у вигляді таблиці та графіків у MS Excel.

*Пояснення:* закінченням процесу нагрівання служить повідомлення «Видача зливків!»; після закінчення нагрівання потрібно вийти з програми та переписати файл rez1 перейменувавши його.

**Завдання №4.** Провести процес нагрівання 2-х садок зливків однієї і тієї ж марки стали холодного посаду. У процесі нагрівання 1-ої садки зливків регулювання температури здійснює ПІД-регулятор (налаштування за замовчуванням). У процесі нагрівання другої садки зливків регулювання температури здійснює ПД-регулятор (постійну інтеграцію задати прагнення до нескінченності, а інші налаштування залишити без зміни). Результати оформити у вигляді таблиці та графіків у MS Excel.

*Пояснення:* закінченням процесу нагрівання служить повідомлення «Видача зливків!»; після закінчення нагрівання потрібно вийти з програми та переписати файл rez1 перейменувавши його.

## ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

**Опис технологічного процесу.** Нагрів зливків в нагрівальних колодязях проводиться за режимами, розробленими для кожної групи марок сталей залежно від хімічного складу, температури посада, типу та кількості зливків.

Весь метал, що нагрівається, у колодязях розбивається на 4 групи сталей, для кожної з яких встановлюються режими нагріву.

I група. Зливки всіх киплячих та напівспокійних марок сталей із вмістом вуглецю до 0,3 % з температурою поверхні при посаді 930°C та вище.

Зливки всіх киплячих та напівспокійних марок сталей із вмістом вуглецю до 0,3 % з температурою поверхні при посаді 925°C та нижче.

II група. Зливки спокійних марок сталей із вмістом вуглецю до 0,3% (крім сталі марок 08ю, 08юА, 18юМА та аналогічних).

Зливки стали марок 08ю, 08юА, 18юА, 20юА та інших, легованих алюмінієм.

III група. Зливки спокійних марок стали із вмістом вуглецю від 0,31 до 0,5 %, у тому числі марганцевистих.

IV група. Зливки спокійних марок стали із вмістом вуглецю від 0,5 до 0,75 % та низьколегованих сталей.

Тепловий та температурний режим нагріву зливків I та II груп сталі, крім зливків, посаджених з температурою поверхні 930°C і вище, а також зливків гарячого посада III та IV груп сталі, що розбивається на два періоди:

Перший період нагрівання характеризується максимально допустимою витратою газу та повітря, що забезпечує найбільш повне спалювання палива

та максимальну швидкість підйому температури в комірці до заданої в інструкції. Тиск пічних газів під кришкою має бути позитивним;

другий період - період томління, характеризується підтримкою заданої температури томління в осередку та поступовим зниженням витрати газу та повітря. У період томління відбувається вирівнювання температури з перерізу зливка. Тиск у осередку під час томління підвищується до 0,5..0,8 мм в. ст. (5..7,8 Па), а середовище має бути відновлювальною, тобто. з коефіцієнтом надлишку повітря менше 1. (При підйомі приймається 1,10 – 1,15). Початком томління злиwkів вважається момент досягнення нижньої межі контрольної температури за температурною діаграмою.

Тепловий та температурний режим нагріву злиwkів I групи марок сталі, посаджених з підвищеним тепловмістом (температурою поверхні 930°C і вище) поділяється на три групи періоду:

перший період - період витримки, в якому злиwки після посадки в комірку з метою створення умов прискореної кристалізації рідкої серцевини, витримуються на черговому газі без подачі повітря;

другий і третій періоди - відповідають режимам нагрівання I групи марок сталей, тобто. швидкість підйому температури не обмежується і томління при контрольних температурах залежно від температури посада.

Тепловий та температурний режим нагріву злиwkів холодного посаду III та IV груп сталей розбивається на три періоди:


перший період - період витримки, у якому запобігання руйнації злиwkів від термічного напруги, призначається витримка при відкритій кришці, частково відкритим шибєрі, на черговому газі, без подачі повітря протягом 15 хвилин для сталей III групи і 30 хвилин для сталей IV групи;

другий період - період підйому температури в комірці забезпечується регулюванням теплового навантаження допустимих швидкостей підйому температури в комірці згідно з таблицею 3.1.

Таблиця 3.1 – Допустимі швидкості підйому температури в комірці

Температура в осередку, °C.	Швидкість підйому температури в комірці, °C/год	
	для злиwkів III групи марок сталей	для злиwkів IV групи марок сталей
до 650°C	70	50
від 650 до 950°C	80	70
вище 950°C	не обмежується	не обмежується

Третій період - період томління, характеризується підтримкою заданої температури томління в осередку та поступовим зниженням витрати газу та повітря. У період томління відбувається вирівнювання температури з перерізу зливка. Тиск у осередку під час томління підвищується до 0,5 - 0,8 мм в. ст. (5 - 7,8 Па), а середовище має бути відновлювальним, тобто. з коефіцієнтом надлишку повітря менше 1. (При підйомі приймається 1,10 –



1,15). Початком томління зливків вважається момент досягнення нижньої межі контрольної температури за температурною діаграмою.

**Завдання управління технологічним процесом.** Для нагрівання великих зливків перед прокаткою на обтискних станах - слябінгах і блюмінгах застосовуються нагрівальні колодязі, в яких зливки встановлені вертикально. У завдання відділення нагрівальних колодязів входить отримання нагрітих до температури прокатки і рівномірно прогрітих по перерізу зливків та забезпечення безперервної роботи між двома послідовними етапами технологічної лінії отримання металу, що мають агрегати періодичної дії між сталеплавильними і прокатними цехами.

Нагрівальні колодязі є печами садового типу періодичної дії з розподіленими у часі температурним та тепловим режимами. Нагрів ділиться на два етапи. У перший період - період нагрівання - відбувається нагрівання частини, що найбільш швидко гріється - поверхні зливка до заданої температури, що фіксується датчиком температури. У цей період у колодязь подається максимальна кількість палива. У другому періоді - періоді витримки - витрата палива весь час зменшується, тому що основним завданням періоду є підвищення температури середини та інших частин зливка, що повільно гріються при збереженні на постійному рівні температури поверхні, так як перевищення її призводить до перепалу і оплавлення зливків.

Завдання управління процесом нагріву металу в нагрівальних колодязях полягає у виборі та забезпеченні режиму роботи, необхідного для отримання металу із заданою температурою поверхні з мінімально допустимим перепадом температур по перерізу зливка при максимальній продуктивності та мінімальній питомій витраті палива та чаді металу.


Роботу нагрівального колодязя оцінюють за такими параметрами:

- температурі осередку;
- тиску у робочому просторі;
- економічності спалювання палива;
- температурі підігріву повітря.

Завданням управління нагріванням у колодязі є отримання необхідної температури поверхні та заданого розподілу температур перерізу зливків. Вимірювання температури металу, особливо внутрішніх його точок, є дуже складним технічним завданням. Тому нагрівання ведуть за температурою робочого простору. При видачі готового металу температура зливків контролюється пірометром за допомогою пірометра оптичного.

Керуючий вплив у системі регулювання температури - витрата палива. Зміна витрати палива здійснюється за допомогою виконавчого механізму при газовому регульовальному клапані комірки. Керуючий сигнал на виконавчий механізм надходить з АСУТП, на вхід якої подається сигнал датчика температури в колодязі - пірометра.

Для регулювання тиску в колодязях сигнал з датчика тиску надходить в АСУТП. За допомогою виконавчого механізму змінює положення поворотного шибера в димарі для відновлення в комірці заданого значення тиску.



Для підтримки коефіцієнта витрати повітря на заданому рівні з датчиків витрати повітря та палива сигнали надходять до АСУТП. За допомогою виконавчого механізму та зчленованого з ним регульовального клапана змінюється витрата повітря відповідно до витрати газу.

**Математична постановка задачі.** Необхідно створити імітаційну модель нагрівання зливків у нагрівальному колодязі, яка б максимально відображала роботу нагрівального колодязя в реальних умовах з частковою реалізацією завдань АСУТП та імітацією пристроїв засобів автоматизації.

Процес нагрівання масивних зливків у нагрівальних колодязях відрізняється великою складністю, що ускладнює розрахунки. До факторів, що ускладнюють аналіз процесу нагріву, відносяться такі:

- 1) нерівномірність температур гріючого середовища (факела, стін камери) з різних сторін зливка, що викликає асиметрію поля температур у зливку;
- 2) нестационарність температур гріючого середовища;
- 3) зміна теплофізичних характеристик металу у процесі нагрівання;
- 4) складний характер теплообміну на поверхні зливків, що нагріваються (випромінювання, конвекція).

Виходячи з короткого розгляду існуючих способів розрахунку нагріву зливків, можна відзначити такі особливості:

- 1) загальний період нагрівання зливків поділяється на дві стадії - стадію підйому температури колодязя та стадію витримки;
- 2) існуючі методи розрахунків не враховують складної зміни зливка, тобто. не дозволяють оцінювати вплив асиметрії нагріву та температури ребра зливка;
- 3) недостатньо повно враховується початковий нерівномірний розподіл температур (характерний для зливків гарячого посада);
- 4) у багатьох моделях не враховуються залежності теплофізичних властивостей сталі від зміни температури, а якщо і враховується, то грубо наближено – шляхом поділу процесу на ряд інтервалів тощо.

Особливого значення набуває розробка методу розрахунку нагріву зливка для з'ясування ролі кожного з факторів, що впливають на процес нагрівання.

Для вивчення ролі окремих факторів було розроблено методику чисельного вирішення двовимірної задачі теплопровідності, яка описує процес нагрівання зливків прямокутного перерізу з урахуванням зміни теплофізичних характеристик металу залежно від температури та теплообміну випромінюванням на поверхні тіла.

Реалізуються такі задачі АСУТП:

- 1) контроль та регулювання температури в робочому просторі нагрівального колодязя;
- 2) контроль та регулювання співвідношення паливо-повітря;
- 3) контроль та регулювання тиску в робочому просторі нагрівального колодязя;

4) модель охолодження зливка;

5) модель нагрівання зливка.

Імітуються пристрої засобів автоматизації:

1) регулюючий орган регулювання витрати палива;

2) регулюючий орган регулювання витрати повітря;

3) шибер регулювання тиску в робочому просторі нагрівального колодязя.

Формулювання математичної моделі охолодження зливка.  
Формулювання задачі для зливка включає рівняння теплопровідності:

$$\rho c_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (3.1)$$

початкова умова

$$T_{\text{нач}} \equiv T(x, y, 0) = T_{\text{вісі}} + \Delta T(X^2 + Y^2) \quad (3.2)$$

де  $X = x/A$ ;  $Y = y/A$ ;  $\Delta T = T_{\text{гр}} - T_{\text{вісі}}$   
 $T_{\text{гр}}$  - температура посередині грані зливка на початку процесу;  
 $T_{\text{вісі}}$  - температура на осі зливка на початку процесу.

Граничні умови вздовж площин симетрії

$$\left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_j = 0 \quad (3.3)$$

і на охолоджуваній поверхні зливка

$$-\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \sigma \cdot (T_{\text{сл}}^4 - T_{\text{изл}}^4) + \frac{\lambda_{\text{заз}}}{l_{\text{заз}}} \cdot (T_{\text{сл}} - T_{\text{изл}}) \quad (3.4)$$

де  $\lambda_{\text{заз}}$  - коефіцієнт теплопровідності зазору;  
 $l_{\text{заз}}$  - товщина зазору.

Температура поверхні зливка визначається за такою формулою:

$$t_{\text{пов}}(\tau) = t_{\text{окр}} + (t_{\text{пов}}(0) - t_{\text{окр}}) \cdot e^{-k_1 \cdot \tau^{k_2}} \quad (3.5)$$

де  $t_{\text{окр}}$  – температура навколишнього середовища;  
 $t_{\text{пов}}(0)$  - початкова температура кристалізується;  
 $k_1, k_2$  – постійні.

Заміна приватних похідних у рівнянні теплопровідності (1) відносинами кінцевих прирощень веде до наступного розрахункового співвідношення явного виду:

$$T_{i,j,k+1} = T_{i,j,k} + \frac{a_{i,j,k} \cdot \Delta t_k}{\Delta x^2} \cdot [(T_{i-1,j,k} - 2 \cdot T_{i,j,k} + T_{i+1,j,k})] + \frac{\lambda_{i-1,j,k} - \lambda_{i+1,j,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \cdot (T_{i-1,j,k} - T_{i+1,j,k}) + \frac{a_{i,j,k} \cdot \Delta t_k}{\Delta y^2} \cdot [(T_{i,j-1,k} - 2 \cdot T_{i,j,k} + T_{i,j+1,k})] \quad (3.6)$$

де  $\Delta x = \Delta y = A/N$  - відстань між вузлами сіткової області;  
 $i = 1, 2, 3, \dots$ ;  
 $j = 1, 2, 3, \dots$

**Формулювання математичної моделі нагрівання зливка.** Завдання формулюється так:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.7)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \sigma (T_{\text{печ}}^4 - T^4) \quad (3.8)$$

де  $n$  – нормаль до поверхні зливка;  
 $\sigma$  - коефіцієнт теплообміну випромінюванням на поверхні зливка;  
 $T_{\text{печ}}$  – температура печі.

$$T_{\text{нач}}(X, Y) = T_0 + 4\Delta T(X - X^2) + 4\Delta T(Y - Y^2) \quad (3.9)$$

де  $T_0$  – початкова температура ребра зливка;  
 $X = x/A, Y = y/A$  – безрозмірні координати;  
 $A$  – розмір поперечного перерізу зливка.

Розв'язання задачі, яка визначається системою рівнянь (3.7..3.9), поводитися методом сіток. Диференціальне рівняння теплопровідності замінювалося сіточним рівнянням явного виду:

$$T_{m,k,t+\Delta t} = T_{m,k,t} + \Pi \frac{a_{m,k,t}}{a_{\text{max},t}} \left[ \left( 1 + \frac{\lambda_{m,k+1,t} - \lambda_{m,k-1,t}}{4\lambda_{m,k,t}} \right) \cdot (T_{m,k+1,t} - T_{m,k,t}) + \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \left( 1 - \frac{\lambda_{m,k+1,t} - \lambda_{m,k-1,t}}{4\lambda_{m,k,t}} \right) \cdot (T_{m,k-1,t} - T_{m,k,t}) \\
& + \left( 1 + \frac{\lambda_{m+1,k,t} - \lambda_{m-1,k,t}}{4\lambda_{m,k,t}} \right) \cdot (T_{m+1,k,t} - T_{m,k,t}) + \\
& + \left( 1 - \frac{\lambda_{m+1,k,t} - \lambda_{m-1,k,t}}{4\lambda_{m,k,t}} \right) \cdot (T_{m-1,k,t} - T_{m,k,t})]
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Коефіцієнти тепло- та температуропровідності віднесені до температур у вузлах сіткової області на початку кожного розрахункового інтервалу часу.

Гранична умова (8) вводиться до уваги за допомогою вузлів сіткової області, розташованих поза перерізом злитка на відстані  $h/2$  від поверхні. Замінюючи похідну  $\partial T/\partial n$  відношенням  $(T_{\phi} - T_1) / h$  та використовуючи вираз

$$T_{\text{пов}} = 0,5 \cdot (T_{\phi} + T_1) \tag{3.11}$$

можна отримати співвідношення для визначення температури у вузлах зовнішнього (фіктивного) напівшару:

$$T_{\phi} = \left( 1 + \frac{\alpha h}{2\lambda} \right)^{-1} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{\alpha h}{2\lambda} \right) \cdot T_1 + \frac{\alpha h}{\lambda} \cdot T_{\text{печ}} \right] \tag{3.12}$$

де

$$\alpha = \sigma \cdot \frac{T_{\text{печ}}^4 - T_{\text{пов}}^4}{T_{\text{печ}} - T_{\text{пов}}} \tag{3.13}$$

### Формулювання імітаційної моделі роботи нагрівального колодязя.

Імітаційна модель роботи нагрівального колодязя є цифровою динамічною модель нагрівання термічно масивного тіла в камерній нагрівальній печі (теплообмін випромінюванням і конвекцією). У моделі враховується масивність вогнетривкої кладки (стін печі) та перемішування в газовому обсязі робочого простору вважається ідеальним.

Схема теплових потоків у робочому просторі має такий вигляд:

1) ефективно випромінювання металу:

$$Q_M = \sigma_M F_M \left( \frac{T_{\text{м.пов}}}{100} \right)^4 + \sigma_D F_M (1 - \varepsilon_M) \left( \frac{T_D}{100} \right)^4 + \phi Q_C (1 - \varepsilon_D) (1 - \varepsilon_M) \tag{3.14}$$

де  $T_{\text{м.пов}}$  - температура поверхні металу, К;  
 $T_D$  - температура робочого простору, К;  
 $F_M$  – площа поверхні металу, м<sup>2</sup>;  
 $\sigma_M$  – коефіцієнт випромінювання металу;  
 $\sigma_C$  – коефіцієнт випромінювання кладки;  
 $\varepsilon_M$  - ступінь чорноти випромінювання металу;

$\varepsilon_d$  – ступінь чорноти випромінювання продуктів згорання.

2) ефективне випромінювання стін печі

:

$$Q_c = \sigma_c F_c \left( \frac{T_{c.пов}}{100} \right)^4 + \sigma_d F_c (1 - \varepsilon_c) \left( \frac{T_d}{100} \right)^4 + Q_m (1 - \varepsilon_d)(1 - \varepsilon_c) + Q_c (1 - \phi)(1 - \varepsilon_d)(1 - \varepsilon_c) \quad (3.15)$$

де  $T_{c.пов}$  - температура поверхні кладки, К;  
 $F_c$  – площа поверхні кладки, м<sup>2</sup>;  
 $\sigma_d$  – коефіцієнт випромінювання продуктів згорання;  
 $\varepsilon_c$  – ступінь чорноти випромінювання кладки.

Рівняння теплових балансів різних верств:

1) поверхневого шару металу, зверненого в робочий простір печі:

$$r_{m0} \rho_m c_m F_m \left( \frac{dt_{m.пов}}{d\tau} \right) = \sigma_d F_m \left( \frac{T_d}{100} \right)^4 + \alpha_m F_m (t_d - t_{m.пов}) + \phi Q_c (1 - \varepsilon_d) - Q_m - \left( \frac{\lambda_m F_m}{r_m} \right) (t_{m.пов} - t_{m,j-1}) \quad (3.16)$$

де  $\rho_m$  – щільність сталі, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_m$  - коефіцієнт теплоємності металу, ккал/(кг·°С);  
 $\sigma_m$  - коефіцієнт тепловіддачі металу, ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°С);  
 $\lambda_m$  - коефіцієнт теплопровідності металу, ккал/(м·ч·°С).

2) поверхневого шару кладки, зверненої в робочий простір печі:

$$r_{c0} \rho_c c_c F_c \left( \frac{dt_{c.пов}}{d\tau} \right) = \sigma_d F_c \left( \frac{T_d}{100} \right)^4 + \alpha_c F_c (t_d - t_{c.пов}) + Q_c (\phi - 1)(1 - \varepsilon_d) + Q_m (1 - \varepsilon_d) - Q_c - \left( \frac{\lambda_c F_c}{r_c} \right) (t_{c.пов} - t_{c,j-1}) \quad (3.17)$$

де  $\rho_c$  – щільність кладки, кг/м<sup>3</sup>;  
 $c_c$  - коефіцієнт теплоємності кладки, ккал/(кг·°С);  
 $\alpha_c$  - коефіцієнт тепловіддачі кладки, ккал/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $\lambda_c$  - коефіцієнт теплопровідності кладки, ккал/(м·°С).

3) поверхневого шару кладки, зверненої назовні:

$$r_{c0}\rho_c c_c \left( \frac{dt_{cn}}{d\tau} \right) = \left( \frac{\lambda_c}{r_c} \right) (t_{c,j+1} - t_{cn}) - \alpha_{cn} (t_{cn} - t_{окр}) \quad (3.18)$$

4) j-того шару кладки:

$$r_c \rho_c c_c \left( \frac{dt_{cj}}{d\tau} \right) = \left( \frac{\lambda_c}{r_c} \right) (t_{c,j-1} - 2t_{c,j} + t_{c,j+1}) \quad (3.19)$$

5) газового об'єму печі:

$$\begin{aligned} V_{п} c_{д} \left( \frac{dt_{д}}{d\tau} \right) = & V_{г} [Q_{н}^p - (1 - k_p) v_{д} c_{д} t_{д}] - \varepsilon_{д} (Q_c + Q_{м}) \\ & - \sigma_{д} (F_{м} + F_c) \left( \frac{T_{д}}{100} \right)^4 - \alpha_c F_c (t_{д} - t_{с.пов}) \\ & - \alpha_{м} F_{м} (t_{д} - t_{м.пов}) \end{aligned} \quad (3.20)$$

де  $V_{п}$  – вільний обсяг робочого простору, м<sup>3</sup>;  
 $c_{д}$  – коефіцієнт теплоємності продуктів згоряння, ккал/(кг·°С);  
 $V_{г}$  – витрата газу, м<sup>3</sup>/год;  
 $Q_{н}^p$  – теплотворна здатність палива, ккал/м<sup>3</sup>;  
 $v_{д}$  – питомий вихід продуктів згоряння на 1 м<sup>3</sup> газу, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $k_p$  – коефіцієнт регенерації тепла.

Алгоритм обчислення має такий вигляд:

1) обчислюємо:

$$\phi = \frac{F_{м}}{F_c}$$

$$Q_c = \frac{A}{B}$$

$$A = [\sigma_{д} F_c (1 - \varepsilon_c) + \sigma_{д} F_{м} (1 - \varepsilon_{м}) (1 - \varepsilon_{д}) (1 - \varepsilon_c)] \cdot \left( \frac{T_{д}}{100} \right)^4 + \sigma_c F_c \left( \frac{T_{с.пов}}{100} \right)^4 + \sigma_{м} F_{м} (1 - \varepsilon_{д}) (1 - \varepsilon_c) \left( \frac{T_{м.пов}}{100} \right)^4$$

$$B = 1 - (1 - \phi) (1 - \varepsilon_{д}) (1 - \varepsilon_c) - \phi (1 - \varepsilon_{д})^2 (1 - \varepsilon_{м}) (1 - \varepsilon_c)$$

$$Q_{м} = \sigma_{м} F_{м} \left( \frac{T_{м.пов}}{100} \right)^4 + \sigma_{д} F_{м} (1 - \varepsilon_{м}) \left( \frac{T_{д}}{100} \right)^4 + \phi Q_c (1 - \varepsilon_{д}) (1 - \varepsilon_{м})$$

$$\Delta t_{д} = \left( \frac{\Delta \tau}{V_{п} c_{д}} \right) \left\{ V_{г} [Q_{н}^p - (1 - k_p) v_{д} c_{д} t_{д}] - \varepsilon_{д} (Q_c + Q_{м}) - \sigma_{д} (F_{м} + F_c) \left( \frac{T_{д}}{100} \right)^4 - \alpha_c F_c (t_{д} - t_{с.пов}) - \alpha_{м} F_{м} (t_{д} - t_{м.пов}) \right\}$$

$$\Delta t_{м.пов} = \left( \frac{\Delta \tau}{r_{м0} \rho_{м} c_{м} F_{м}} \right) [\sigma_{д} F_{м} \left( \frac{T_{д}}{100} \right)^4 + \alpha_{м} F_{м} (t_{д} - t_{м.пов}) + \phi Q_c (1 - \varepsilon_{д}) - Q_{м} -$$

$$-\left(\frac{\lambda_M F_M}{r_M}\right)(t_{M, \text{пов}} - t_{M, j-1})$$

$$t_{c, \text{пов}} = \left(\frac{\Delta \tau}{r_{c0} \rho_c c_c F_c}\right) \left[ \sigma_d F_c \left(\frac{T_d}{100}\right)^4 + \alpha_c F_c (t_d - t_{c, \text{пов}}) + Q_c (\phi - 1) (1 - \varepsilon_d) + \right.$$

$$\left. + Q_M (1 - \varepsilon_d) - Q_c - \left(\frac{\lambda_c F_c}{r_c}\right) (t_{c, \text{пов}} - t_{c, j-1}) \right]$$

$$t_{cп} = \left(\frac{\Delta \tau}{r_{c0} \rho_c c_c}\right) \left[ \left(\frac{\lambda_c}{r_c}\right) (t_{c, j+1} - t_{cп}) - \alpha_{cп} (t_{cп} - t_{окр}) \right]$$

2) обчислюємо для всіх шарів кладки, крім крайніх:

$$r_c \rho_c c_c \left(\frac{dt_{c_j}}{d\tau}\right) = \left(\frac{\lambda_c}{r_c}\right) (t_{c, j-1} - 2t_{c, j} + t_{c, j+1})$$

3) знаходимо для всіх елементів:

$$t_{c_j}(k) = t_{c_j}(k-1) + \Delta t_{c_j}$$

$$t_d(k) = t_d(k-1) + \Delta t_d$$

де  $k$  – поточний номер обчислень;  
 $k-1$  – попередній номер обчислень.

**Робота з програмою.** На початку задати модель нагріву зливка або модель роботи нагрівального колодязя.

Перед початком роботи програми потрібно ввести вихідні дані, кнопка Посад або залишити їх за замовчуванням:

1. Кількість злиwkів (4 – 8).
2. Початкова температура робочого простору (600 - 1000 °C).
3. Калорійність палива (1800 – 2300 ккал/м3).
4. Марку сталі (08, У8, 30ХНЗ, 50С2Г, 3Х13, 1Х18Н9Т).
5. Температуру посада зливка (у разі гарячого посада задається час, що минув від початку розливання).

Вибравши пункт меню Настройки можна перед початком або в процесі роботи програми встановити параметри регуляторів температури і тиску.


Під час роботи програми можна вибрати пункт меню Графіки або на панелі інструментів відповідні кнопки:

1. Розподіл температур перерізу зливка (таблиця).
2. Розподіл температур перерізу зливка (графік).
3. Температура у робочому просторі нагрівального колодязя.
4. Тиск у робочому просторі нагрівального колодязя.
5. Витрати газу та повітря.

Щоб вийти з програми, потрібно вибрати пункт меню Файл.

**Критерії оцінювання виконаної роботи:** знання конструкції та технології, основні контрольовані та регульовані параметри, функції АСУТП, використовувані моделі, якість обробки та побудови графіків, правильність висновків.

**Зміст звіту:** Звіт оформляється в Microsoft Word поточної версії та завантажується в Moodle. Звіт повинен містити детальний опис дій, відповідні



графіки та висновки. Якщо це потрібно, в звіт можна додавати копії екрану монітора з поясненнями.

**Захист роботи.** Після завантаження звіту у Moodle викладач перевіряє звіт. У випадку відсутності суттєвих помилок робота оцінюється 60% від максимально можливої кількості балів, що зазвичай наведена в семестровому графіку. Для підвищення оцінки здобувач повинен публічно захистити роботу.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Призначення нагрівальних колодязів (НК). Типові елементи конструкції НК. Типи НК. Початкові та вихідні матеріали та їх властивості. Технологія нагріву зливків в колодязях.

2. Основні технологічні параметри, їх діапазон, яким чином вимірюються.

3. Основні системи автоматичного регулювання (САР).

4. Математичні моделі, які використовуються.

5. Функції АСУТП НК. Управляючі функції АСУТП НК та їх реалізація.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравченко В. П., Койфман О. О., Сімкін О. І. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2023. 276 с.

URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/482>.

2. СТАНДАРТ АСУ ТП 2.0. Вид. офіц. Київ : ТОВ «МЕТІНВЕСТ ДІДЖИТАЛ», 2020. 50 с.

## Лабораторна робота №4

### Дослідження роботи котла ТЕЦ з частковою реалізацією функцій АСУ ТП методом математичного моделювання

Мета роботи: Вивчення роботи котла ТЕЦ у базовому та піковому режимах, конструкції його основних елементів, систем контролю та регулювання, оцінка впливу АСУ на технологічний процес котлоагрегату, отримання навичок обробки результатів експериментів за допомогою ЕОМ.


### ЗАВДАННЯ

**Завдання №1.** Провести процес збільшення (зменшення) парового навантаження котла при вимкнених контурах регулювання. Результати експерименту оформити як графіків перехідних процесів. Пояснити процеси в окремих елементах котла, зокрема явище набухання в барабані.

Порядок виконання:

- а) запустити програму Chamber.exe;
- б) запустити модель (Старт/Рестарт);
- в) вимкнути всі контури регулювання: викликати всі вікна меню *Контури регулювання контролера* і натиснути кнопку *Ручн.* для кожного із регуляторів;
- г) перевести перемикач Управління моделлю в положення *Обурення*;
- д) увімкнути пункт головного меню *Формувати звіт вихідних параметрів*;
- є) викликати вікно завдання ступінчастих збурень (*Технологічні параметри, пункт Обурення*);
- ж) встановити для параметра Парова навантаження котла перемикач *Обурення* у положення *Знач.* та встановити нове значення параметра в межах 145–160 т/год, натиснути кнопку *Подати обурення*, повернути перемикач у вихідне положення;
- з) після закінчення 10-20 хв. модельний час зупинити модель (Пауза). На основі звіту з результатами експерименту (за умовчанням файл .\Reports\ReportOut.txt) побудувати графіки наступних перехідних процесів:
  - а. рівень води у барабані котла;
  - б. тиск у барабані котла;
  - в. температура перегрітої пари після другого ступеня пароперегрівача (на виході у ГПЗ);
  - г. тиск перегрітої пари після другого ступеня пароперегрівача (на виході ГПЗ).

**Завдання №2.** Провести процес збільшення (зменшення) парового навантаження котла за умови включених контурів регулювання. Результати



експерименту оформити у вигляді графіків перехідних процесів та керуючих впливів. *Пояснити, які (і яким чином системи) регулювання підтримують заданий рівень і тиск насиченої пари в барабані і температуру перегрітої пари після другого ступеня пароперегрівача.*

Порядок виконання:

- запустити програму Chamber.exe;
- запустити модель (Старт/Рестарт);
- перевести перемикач *Управління моделлю* в положення

*Обурення;*

- увімкнути пункти головного меню *Формувати звіт вихідних параметрів; Формувати звіт управляючих впливів;*
- викликати вікно завдання ступінчастих збурень (*Технологічні параметри, пункт Обурення*);

- встановити для параметра *Парова навантаження котла* перемикач *Обурення* у положення *Знач.* та встановити нове значення параметра в межах 145–160 т/год, натиснути кнопку *Подати обурення*, повернути перемикач у вихідне положення;

- після закінчення 10-20 хв. модельний час зупинити модель (Пауза). На основі звіту з результатами експерименту (за умовчанням файл \Reports\ReportOut.txt) побудувати графіки наступних перехідних процесів:

- а) рівень води у барабані котла;
- б) тиск у барабані котла;
- в) температура перегрітої пари після другого ступеня пароперегрівача (на виході у ГПЗ);
- г) тиск перегрітої пари після другого ступеня пароперегрівача (на виході у ГПЗ);
- д) витрата води на виході з економайзера.


Також побудувати графіки сумарних керуючих впливів наступних контурів регулювання (за замовчуванням файл \Reports\ReportY.txt), пояснити відмінності у зовнішньому вигляді графіків:

1. Температура перегрітої пари. Упорскування;
2. Температура перегрітої пари. Поверхневий пароохолоджувач.

**Завдання №3.** Пояснити відмінності між базовим та піковим режимом роботи котла та взаємопов'язаність функціонування головного регулятора, регулятора теплового навантаження та регулятора витрати доменного газу (див. рис. 2.1) при різному складі палива. Результати експерименту оформити як графіків перехідних процесів.

Порядок виконання:

- запустити програму Chamber.exe;
- запустити модель (Старт/Рестарт);
- відкрити вікно регулятора теплового навантаження (*Контури регулювання контролера, пункт Теплове навантаження*), далі натиснути



кнопку *Показати перемикач виду палива*. У вікні встановити потрібний тип опалення котла;

- перевести перемикач *Управління моделлю* в положення *Обурення*;

- увімкнути пункти головного меню *Формувати звіт вихідних параметрів*;

- викликати вікно завдання ступінчастих збурень (*Технологічні параметри, пункт Обурення*);

- встановити параметр *Витрата ДГ* перемикач *Обурення в положення Знач.* та встановити нове значення параметра в межах 100–120 тис.м<sup>3</sup>/год, натиснути кнопку *Подати обурення*, повернути перемикач у вихідне положення;

- після закінчення 10-20 хв. модельного часу зупинити модель (Пауза). На основі звіту з результатами експерименту (за умовчанням файл .\Reports\ReportOut.txt) побудувати графік зміни теплового потоку до труб циркуляційного контуру.

Перераховані вище дії виконати три рази: для опалення доменним газом, природним газом та їх сумішшю. Оцінити якість перехідних процесів з огляду на реконфігурацію АСУ при зміні положення перемикача виду палива.


## ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

**Опис технологічного процесу.** Доменний і природний газ надходить через пальникові пристрої в камеру топки, де спалюється факельним способом. На металургійному комбінаті основна кількість доменного газу йде на опалення мартенівських печей та печей прокатних цехів. На ТЕЦ-1 прямує лише частина газу, що залишилася. Тому котел, окрім спалювання доменного газу, розрахований також на спалювання та природний газ. Однак, при опаленні котла використання доменного газу завжди є кращим, зважаючи на його дешевизну в порівнянні з природним. Доменний і природний газ не вводиться в об'єм камери топки через одні й ті ж пальникові пристрої.

Для доменного газу застосовуються щілинні пальники, у яких газові щілини чергуються з повітряними. Газоподібне паливо перемішується з повітрям усередині вертикальних шамотних амбразур. Швидкість виходу доменного газу та повітря становить близько 20-35 м/с. Запалення газу відбувається в амбразурі, його горіння продовжується всередині камери згорання.

При великому вмісті баласту в доменному газі та низькій теплоті його згорання температура його факела порівняно мала, а процес горіння затягується. У зв'язку з цим пальники доменного газу розташовані в нижній частині камери топки, утворюючи нижній ярус пальників, для того, щоб газ міг горіти на більшій по можливості висоті.

Об'єм природного газу в 9,5 разів менший за об'єм повітря, необхідного для його спалювання. Перемішування газу з повітрям має бути ретельним.



Тому в пальники газу вводять у повітряний потік із високою швидкістю – 70-140 м/с. Швидкість повітряного потоку становить близько 30 м/с.

При зменшенні швидкості газу перемішування погіршується, горіння затягується, що може призвести до підвищення температури перегрітої пари. Тому при зниженні парового навантаження котла частину газових пальників необхідно відключати.

Під час аварійної зупинки котла необхідно негайне відключення подачі газу в топку. На всіх відводах газопроводів доменного та природного газ до окремих котлів встановлена швидкодіюча засувка, яка завжди в повній готовності до негайного закриття.

Для підтримки процесу горіння в топку подається повітря. Він нагнітається за допомогою двох дутьових вентиляторів типу ВДН-20, продуктивністю 113500 м<sup>3</sup>/год кожен і попередньо нагрівається в двоступінчастому повітропідігрівачі. Необхідне для горіння повітря може засмоктуватись на двох рівнях: з верхньої частини приміщення, де його температура дещо вища, ніж перед вентилятором, та на позначці 16000 мм. Нагнітальні патрубки вентиляторів з'єднані між собою для того, щоб можна було зупинити одну машину при зниженні навантаження котла.

Димові гази, що утворилися в процесі горіння, відсмоктуються з топки двома димососами типу Д-20-2, продуктивністю 210060 м<sup>3</sup>/ч кожен. Принагідно вони проходять через поверхні нагріву пароперегрівачів водяного економайзера, повітропідігрівача і видаляються через димову трубу в атмосферу. Тяга димової труби не забезпечує видалення газів, що відходять, а лише сприяє роботі димососів. Продуктивність димососів змінюється за допомогою поворотних багатовісних дросельних заслонок.

Насичена пара, що виходить з барабана, не повинна нести крапель води. Якщо котлова вода потрапляє з паром в пароперегрівач, вона випаровується, і частина розчинених у ній солей залишається на внутрішній поверхні змійовиків у вигляді твердого осаду. Поступово товщина шару збільшується, і передача тепла від газів до пари не може. Змійовики пароперегрівача нагріваються до високої температури, близької до температури газів, внаслідок чого можливе пошкодження окремих змійовиків та аварійна зупинка котла. Інша небезпека потрапляння води з барабана в пароперегрівач - при високому тиску велика кількість солей, що вносяться з водою, розчиняється в парі і проходить разом з ним пароперегрівач, після чого осідає всередині турбогенераторів і турбовоздуховок.

Для підвищення критичного навантаження котла за вологістю пари в барабані встановлені сепараційні пристрої, призначені для відділення пари і крапель вологи.

У котлах високого тиску, до яких належить ПК-14-2М, пара, що утворюється, носить з собою невелику кількість кремнієвої кислоти і деяку кількість інших солей. Ці солі не можуть бути уловлені внутрішньобарабанними пристроями відділення крапельної вологи. Очищення пари від таких речовин здійснюється шляхом промивання (барботажу) його живильною водою.



Фосфатування котла здійснюється через трубу, розташовану в нижній частині барабана над водоопускними трубами екранів.

У барабан врізано трубу для аварійного скидання надлишку води у разі надмірного підвищення її рівня. Верхній кінець цієї труби знаходиться на висоті допустимого рівня води в барабані. Аварійне скидання води здійснює машиніст котла за допомогою дистанційного керування.

У барабані котла ПК-14-2М застосовано двоступінчасте випаровування, що полягає в тому, що частина випарної поверхні нагрівання виділено в так звані сольові відсіки, в яких вода котла має більш високий вміст солей. Безперервне продування в розмірі 3-5% від припливу поживної води в барабан проводиться тільки з сольових відсіків, що забезпечує зменшення втрати води та тепла з безперервним продуванням. Якби вся котлова вода мала такий солевміст, який мають сольові відсіки, то були б потрібні громіздкі способи очищення пари. При ступінчастому випаровуванні утруднюється очищення лише частини пари, яка виходить із сольових відсіків.

Застосування двоступінчастого випаровування дозволяє вести безперервне продування кількістю води приблизно п'ять разів меншим, ніж без нього. Вода, що видаляється з безперервним продуванням, має солевміст близько 2000 мг/л. Солевміст води, що знаходиться в чистому (більшому за розміром) відсіку, становить близько 400 мг/л.

Чистий і сольові відсіки з'єднані один з одним по парі і розділені по воді, однак, у перегородках між відсіками є отвори, через які кілька води перетікає з чистого в сольові відсіки.

Періодичне продування, яке виконується 1-2 рази на зміну, призначене для видалення шламу з нижніх колекторів.

На стінах камери топки розташовані екрани, що складаються з великої кількості вертикальних труб, і на виході з топки - фестон, які утворюють випарні поверхні нагріву, що отримують частину теплоти продуктів згорання. Природна циркуляція води та пароводяної суміші в циркуляційній системі за рахунок різниці мас стовпа води в опускних трубах (не обігріваються) та пароводяної суміші в підйомних трубах (обігріваються) екранів та фестону. Під циркуляцією мається на увазі рух води в котлі замкненим шляхом (циркуляційного контуру), на окремих ділянках якого відбувається часткове випаровування цієї води.

Процес пароутворення протікає у підйомних трубах циркуляційного контуру, причому вміст пари в пароводяної суміші становить 10 – 20%.

Циркуляція в котлі нерівномірна. На швидкість руху води впливають зміна подачі палива в топку, зміна тиску в барабані котла та інші фактори. Крім того, швидкість у циркуляційному контурі може змінюватися через недостатньо постійних умов відриву бульбашок від стінок труб. Неоднакова і середня швидкість руху рідини у різних трубах однієї й тієї ж циркуляційного контуру внаслідок різного поглинання тепла окремими трубами.

Підтримка стійкої циркуляції запобігає її перекиданню, появі парових «пробок», інших несприятливих явищ і, як наслідок, пошкодженню екранних труб.



Насичений пар з барабана надходить у пароперегрівач, де нагрівається до встановленої температури рахунок радіації факела і конвективного обігріву топочними газами. У складі пароперегрівача можна виділити радіаційну, напіврадіаційну (ширмову) та конвективну частини. Радіаційна частина (стельовий пароперегрівач) походить по конструкції на топкові екрани і подібно до них розташована на стінах і стелі камери топки. Насичена пара, проходячи стельовий пароперегрівач, сприймає тепло, що випромінюється топковими газами на труби пароперегрівача. Конвективна частина пароперегрівача (перший ступінь) розташована поза топкою котла. Димові гази проходять між встановленими на невеликій відстані один від одного змійовиками. Для першого ступеня пароперегрівача більшість тепла сприймається конвекцією.

Для підвищення надійності роботи пароперегрівача застосовується проміжне перемішування пари. Перше проміжне перемішування відбувається в поверхневому пароохолоджувачі, друге - у восьми перекидних трубах і перекидних колекторах між першим і другим ступенями пароперегрівача, третє - в колекторі пароохолоджувача, що впорскує.

По ширині горизонтального газоходу розташована велика кількість ширм, тому перегріта пара після входу в другий ступінь пароперегрівача проходить через половину з них (крайні ширми), а потім по перепускних труб, що не обігріваються, направляється в інші (середні) ширми. За такої схеми зменшується вдвічі кількість ширм, включених паралельно, і, скорочується можливе розбіжність температури пари у яких.

Після виходу із середніх пакетів труб другого ступеня пароперегрівача пара збирається в парозбірний колектор і далі направляється в загальний паропровід, який об'єднує котли зі станційними номерами 13-16.

При русі перегрітої пари по пакетах пароперегрівача температура перегріву пари регулюється в поверхневому і впорскує пароохолоджувачі.

Впорскуючий пароохолоджувач розміщений в розсічці пароперегрівача, між стельовою частиною пароперегрівача та його першим ступенем. При роботі пароохолоджувача частина перегрітої пари може перетворюватися на воду, яка потім знову випаровується в трубах пароперегрівача. Охолодження пари проводиться поживною водою, яка для цього відгалужується перед економайзером, а після охолодження перегрітої пари скидається перед нею ж. На поверхневий пароохолоджувач відводиться близько 40-60% усієї живильної води на котел. Охолодна вода всередині колектора поверхневого пароохолоджувача рухається по змійовиках вздовж нього, а пара рухається поперек. Пароохолоджувач поверхневого типу може охолоджувати пару приблизно на 50-60 С, що не завжди виявляється достатнім для отримання заданої температури перегріву гострої пари.

Усередині колектора впорскування власний конденсат розбризкується всередині сорочки, що захищає корпус від різкого та нерівномірного охолодження. Упорскування проводиться через дев'ятнадцять отворів по колу сопла. За допомогою упорскування конденсату можна регулювати температуру перегріву пари в широкому діапазоні, крім того, запізнення дії



пароохолоджувача, що впорскує, становить 2-3 хв. порівняно із запізненням поверхневого пароохолоджувача – 5-6 хв. Тому при роботі котла поверхневим пароохолоджувачем підтримують температуру перегріву пари в заданому діапазоні, упорскуванням же набувають її бажаного значення.

Власний конденсат, на відміну від поживної води, має значно менший вміст солі, відповідно, його використання для впорскування дозволяє в цілому зменшити вміст солей в гострій парі.

Установка для отримання власного конденсату складається з конденсатора та конденсатозбірника. У конденсаторі поживна вода охолоджує деяку кількість насиченої пари, що відводиться з барабана котла, який потім накопичується в конденсатозбірнику. Кількість конденсату, що впорскується, може виявитися недостатнім при роботі котла і при його роботі з дуже низьким навантаженням, коли кількість поживної води невелика і ця вода не може забезпечити конденсацію необхідної кількості пари. Тому передбачена можливість тимчасового охолодження пари шляхом упорскування в нього поживної води, незважаючи на її підвищений вміст солі.

Хвостовими поверхнями нагріву, які розташовані останніми шляхом димових газів і, отже, омиваються газами порівняно низької температури, є водяний економайзер і повітропідігрівач.

У котлі ПК-14-2М застосований економайзер киплячого типу, в якому відбувається часткове випаровування поживної води, зазвичай близько 15-25%. При цьому вода нагрівається з 150°C до 215°C (номінальне значення).

Поживна вода підводиться до котла по двох паралельних лініях, на яких встановлені запірні засувки, регулюючі та зворотні клапани. У стійкому режимі роботи котла одна з ліній повністю відкрита, інша внаслідок регулювання витрати поживної води тримається відкритою на 0-20% від максимуму.

**Котлоагрегат як об'єкт управління.** Регулювання процесу горіння в топці котла зводиться до управління подачею палива, якістю його спалювання та розрядження в камері згорання. Регулювання процесу пароутворення передбачає керування тиском перегрітої пари та теплового навантаження котла.

Процеси горіння палива та пароутворення тісно пов'язані. Кількість палива, що спалюється, а точніше, тепловиділення в топці в режимі роботи, що встановився, повинно відповідати кількості пари, що виробляється котлом. Непрямим показником тепловиділення є теплове навантаження. Вона характеризує кількість теплоти, сприйняту поверхнями нагріву в одиницю часу і витрачене на нагрівання води в екранних трубах та пароутворення. Кількість пари, що виробляється котлами на загальній паровій магістралі, повинна відповідати витраті пари на турбогенератори та турбоповітродувки, які підключені до неї. Непрямим показником цієї відповідності є тиск перегрітої пари. Воно має підтримуватись поблизу заданого значення з високою точністю за умовами економічності та безпеки роботи теплоенергетичної установки в цілому. Температура перегріву пари повинна підтримуватись у вузькому заданому діапазоні. Процес спалювання



палива повинен здійснюватися з максимальною економічністю, а втрати теплоти під час її передачі поверхням нагрівання повинні бути мінімальними.

*Регулювання тиску пари та навантаження котельного агрегату.* При паралельній роботі котлів зі станційними номерами 12-16 на загальну парову магістраль одні працюють у так званому базовому режимі, інші перебувають у піковому (регулюючому) режимі.

Базовим називається режим підтримки парового навантаження котла на заданому рівні незалежно від зміни теплового та електричного навантажень споживачів перегрітої пари, що зазвичай має на увазі постійну подачу палива в них.

У піковому режимі котел повинен сприймати коливання теплового та електричного навантажень турбоповітродувок та турбогенераторів, тобто бере участь у регулюванні їх навантажень. Регулюючий контур тиску пари, підтримуючи тиск у загальній паровій магістралі, повинен одночасно керувати паровим навантаженням всіх котлоагрегатів, що входять до цієї групи.

Для того, щоб забезпечити стабілізацію режимів окремих котлів не тільки при зовнішніх, але й при внутрішніх обуреннях застосовується каскадна схема, що передбачає роботу регулюючого контуру теплового навантаження на кожному з котлів, що працюють на загальну парову магістраль та загального для них регулятора тиску в магістралі (головного). коригувального регулятора). Необхідно передбачити, щоб головний регулятор не керував безпосередньо подачею палива, а лише коригував у піковому режимі завдання регуляторам теплового навантаження, а також наявність пристроїв, що задають, дозволяють встановити бажаний розподіл навантажень між котлами, тобто ступінь участі котлів в регулюванні тиску пари в загальній магістралі.

Котел як об'єкт регулювання тиску та теплового навантаження може бути представлений у вигляді послідовно з'єднаних ділянок, розмежованих конструктивно: камери топки; пароутворюючої частини; барабана та пароперегрівача.

Для котла як об'єкта регулювання характерна підтримка постійного тиску пари в барабані. Основним обуренням є зміна споживання пари споживачами. Під час скидання навантаження тиск у барабані котла зростає. Обуренням для котла є також зміна подачі поживної води і кількість палива, що подається в топку. Для котлоагрегату ПК-14-2М запізнення, обумовлене впливом топки, становить близько 20-25 с.

Мала інерційність і доступний спосіб вимірювання сигналу теплоти дозволяють використовувати його в системі стабілізації подачі палива. У схемі регулювання «тепло-паливо» витрата газу на горіння змінюється відповідно до сигналу тепла і сигналу тиску пари в загальній магістралі.

Безперервний спосіб вимірювання відхилення теплового навантаження, заснований на використанні наступної залежності:

$$\Delta D_q = C_{\pi} \frac{dp_{\sigma}}{dt} \pm \Delta D_{\pi.\pi},$$



де  $\Delta D_q$ - теплове навантаження котла, що характеризує теплосприйняття випарних поверхонь в одиницю часу,  $\frac{\text{кВт}}{\text{с}}$ ;

$C_{\text{п}}$ - постійна, що характеризує масову акумулюючу здатність пароводяної суміші та металу випарної частини котла;

$\frac{dp_{\text{б}}}{dt}$ - швидкість зміни тиску пари в барабані котла,  $\frac{\text{Па}}{\text{с}}$ ;

$\Delta D_{\text{п.п}}$ - Різниця парових навантажень котла до і після внесення обурення,  $\frac{\text{кВт}}{\text{с}}$ .

Для об'єкта управління, що розглядається, в якому спалюються два види палива, пред'являються додаткові вимоги. Основна з цих вимог полягає в тому, щоб забезпечити так зване буферне споживання газу, тобто таке, при якому спалювалася б максимально можлива кількість доменного газу, а при його нестачі використовувався б природний газ тією мірою, якою це необхідно для підтримки заданого навантаження. Цю вимогу можна задовольнити дією регулятора теплового навантаження через вузол виборчого управління подачею доменного та природного газу.

*Регулювання економічності процесу горіння.* Регулювання економічності процесу горіння має забезпечити підтримку оптимального надлишку повітря, заданого режимною картою котлоагрегату. Регулювання оптимального значення надлишку повітря на горіння газу здійснюється шляхом зміни кількості повітря, що подається в топку за допомогою дутьових вентиляторів.

Регулювання економічності процесу горіння відбувається за співвідношенням «тепло-повітря», тому що для практично всіх енергетичних палив теоретично необхідна кількість повітря приблизно пропорційна теплоті згорання. Для підвищення точності підтримки надлишку повітря в контур регулювання вводиться додатковий коригуючий сигнал щодо вмісту кисню у газах, що відходять.

Підтримання надлишку повітря за співвідношенням тепло-повітря з корекцією по кисню відрізняється надійністю. Слід зазначити, що оптимальний надлишок повітря в загальному випадку визначається не тільки економічністю, але й іншими факторами, такими як інтенсивність корозії поверхонь нагріву, утворення шкідливих сполук і так далі.

*Регулювання розрядження в топці.* У котлоагрегаті ПК-14-2М має місце факельний спосіб спалювання палива. Наявність невеликого (20-30 Па) постійного розрядження у верхній частині топки необхідно за умов нормального режиму топки. Воно перешкоджає вибиванню газів з топки, сприяє стійкості факела і є непрямим показником матеріального балансу між повітрям, що нагнітається в топку, і газами, що йдуть. Об'єкт регулювання по розрядженні являє собою топкову камеру з включеними послідовно з нею газоходами від поворотної камери до патрубків, що всмоктують димососів.



До зовнішніх впливів, що обурюють, відноситься зміна витрати повітря в залежності від теплового навантаження агрегату, до внутрішніх - порушення газоповітряного режиму.

Ділянка по розрядженню не має запізнення, має малу інерційність і значне самовирівнювання. Негативною властивістю ділянки, з точки зору автоматичного регулювання, є коливання регульованої величини близько середнього значення з амплітудою до 30-50 Па та частотою кілька герц. Топкова камера має значне самовирівнювання, так як величина розрядження істотно позначається на величині присосів повітря в топку через нещільності в обмуровці.

Продуктивність димососів у кожний момент часу має відповідати продуктивності дутьових вентиляторів. Регулювання розрядження здійснюється за допомогою зміни кількості відсмоктуються димососами газів. При цьому їх продуктивність регулюють поворотними багатовісними дросельними заслінками. Під час роботи котла в піковому режимі можуть відбуватися часті зміни теплового навантаження та, отже, зміни витрати повітря. Для збільшення швидкодії регулюючого контуру розрядження на його вхід вводиться додатковий вплив, що зникає, від регулюючого контуру витрати загального повітря.

*Регулювання температури перегріву пари.* Температура перегріву пари на виході котла відноситься до найважливіших параметрів, що визначають надійність труб пароперегрівача та економічність роботи турбоповітродувок та турбогенераторів. Відхилення температури гострої пари повинні становити  $-10^{\circ}\text{C}$  -  $+5^{\circ}\text{C}$  від номінального значення.

Температура перегріву пари для барабанних котлів залежить від теплосприйняття пароперегрівача та парового навантаження. При сталості парового навантаження теплосприйняття пароперегрівачів визначається топочним режимом і може змінюватись в залежності від забруднення поверхонь нагріву, надлишку повітря, змін складу палива тощо. Зміни парового навантаження призводять до перерозподілу теплосприйняття між конвективною та радіаційною частиною пароперегрівача та зміною температури пари на виході.

Особливість динамічних характеристик пароперегрівача є запізнення зміни температури пари при нанесенні обурення на вході. При обуренні зміною теплосприйняття або витрати пари запізнення пароперегрівача незначне. Інерційність пароперегрівачів каналом регулюючого впливу в основному залежить від конструкції пароохолоджувача. При регулюванні поверхневим пароохолоджувачем кінцева температура пари змінюється через 5-6 хвилин. При регулюванні впорскує пароохолоджувачем кінцева температура пари зміниться через 1-2 хвилини, так як він ближче розташований по поверхні нагрівання пароперегрівача до вихідного колектора. Запізнення дії пароохолоджувача ускладнює регулювання температури перегрітої пари.



Для регулювання температури перегріву пари проводиться подача потрібної кількості холодоагенту у впорскуючий і поверхневий пароохолоджувач.

*Регулювання рівня води в барабані котла.* Умови безпечної та надійної роботи котла вимагають, щоб рівень води у барабані підтримувався у певних межах. Підвищення рівня за верхню допустиму межу може призвести до закидання води в пароперегрівач та різкого зниження температури перегріву (переливання котла). Зниження рівня за нижню допустиму межу (випуск води з барабана) призводить до порушення циркуляції в екранних трубах та їх перепалу.

Відхилення рівня води в барабані від середнього значення пов'язане з наявністю небалансу між припливом поживної води та витратою пари; воно відбувалося також внаслідок зміни вмісту пари в пароводяній суміші підйомних труб за рахунок коливань тиску насиченої пари в барабані або змін теплосприйняття випарних поверхонь нагріву.

Деякий час після обурення по паровому навантаженню рівень води в барабані зростає в результаті різкого зменшення тиску пари. Це у свою чергу призводить до збільшення парозмісту в підйомних трубах циркуляційного контуру та зростання рівня. Після того, як тиск пари в барабані прийме нове значення, що відповідає новому значенню витрати пари, зміна рівня протікатиме відповідно до рівняння матеріального балансу. Описане явище зветься набухання рівня.

Таким чином, котел як об'єкт регулювання живлення має низку властивостей, що ускладнюють підтримку рівня в перехідних режимах: запізненням, явищем набухання та відсутністю самовирівнювання.

*Регулювання безперервного продування барабана.* Підтримка загального солемісту котлової води в межах норми здійснюється за допомогою безперервної та періодичної продувки з барабана. Втрати котлової води з продувкою повинні поповнюватися живильною водою у кількості, яка визначається рівнем води в барабані.

За динамічними властивостями ділянка регулювання безперервного продування типова для теплових інерційних об'єктів. Концентрація кремнієвої кислоти оцінюється побічно за паровим навантаженням і кількістю води, що продується, або за сигналом датчиків концентрації кремнієвої кислоти.

*Регульовані та контрольовані параметри технологічного процесу.*

Регульовані параметри технологічного процесу в котлоагрегаті:

- витрата води на безперервне продування котла;
- витрати доменного газу до пальників;
- витрати природного газу до пальників;
- теплове навантаження котла;
- витрати загального повітря на котел;
- розрядження у верхній частині топки;
- витрата води харчування котла;
- температура перегрітої пари;
- витрата власного конденсату на упорскування;

- витрата води на поверхневий пароохолоджувач;
- тиск перегрітої пари в паропроводі;
- витрати перегрітої пари з котла.

Основні параметри технологічного процесу, для яких доцільно застосувати дистанційне керування положенням регулюючого органу, відповідального за зміну значення параметра:

- витрата повітря до пальників доменного та природного газу;
- витрата повітря на рециркуляцію гарячого повітря на всмоктування дутьових вентиляторів;
- витрата води на живлення котла під час пуску;
- витрати води на періодичну продування.

Технологічні параметри, для яких необхідна безперервний контроль, а також їх робочі діапазони наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Контрольовані технологічні параметри котла

№ п/п	Найменування параметру	Робочий діапазон	Одиниця виміру
1	Витрата поживної води на котел	140 - 160	т/год
2	Витрата доменного газу	75 - 135	тис. м <sup>3</sup> /год
3	Витрата природного газу	0 – 10	тис. м <sup>3</sup> /год
4	Витрата повітря на горіння доменного газу	30 – 55	тис. м <sup>3</sup> /год
5	Витрати повітря на горіння природного газу	0 – 45	тис. м <sup>3</sup> /год
6	Витрата загального повітря на всмоктуванні вентиляторів	50 – 100	тис. м <sup>3</sup> /год
7	Витрата поживної води на конденсатор	5-10	т/год
8	Витрата води на безперервне продування	5,5 – 6,5	т/год
9	Витрата власного конденсату на упорскування	2 – 7	т/год
10	Витрата поживної води на поверхневий пароохолоджувач	55 -66	т/год
11	Витрата перегрітої пари у ГПЗ	120 – 220	т/год
12	Тиск живильної води на котел	13 - 15	МПа
13	Тиск доменного газу	175 – 210	кПа
14	Тиск природного газу	135 – 160	кПа
15	Тиск насиченої пари в барабані котла	10 - 11,5	МПа
16	Тиск перегрітої пари перед ГПЗ	9 - 10,5	МПа
17	Тиск повітря перед вентиляторами	450 – 2500	Па
18	Розрядження у верхній частині камери згорання	30 - 60	Па
19	Рівень води в барабані котла	-50 - +50	мм
20	Температура гострої пари після ГПЗ	515 – 525	°С
21	Температура перегрітої пари до ГПЗ	515 – 525	°С
22	Температура перегрітої пари до поверхневого пароохолоджувача	315 – 325	°С
23	Температура перегрітої пари після поверхневого пароохолоджувача	360 – 380	°С
24	Температура перегрітої пари після упорскування	480 – 450	°С

25	Температура перегрітої пари після першого ступеня пароперегрівача	415 – 430	°C
26	Температура перегрітої пари після другого ступеня пароперегрівача (до впорскування)	440 – 460	°C
27	Температура повітря до повітропідігрівача	40 - 70	°C
28	Температура повітря до другого ступеня повітропідігрівача	110 - 150	°C
29	Температура холодного повітря після дутьових вентиляторів	50 – 55	°C
30	Температура димових газів за пароперегрівачем	500 – 600	°C
31	Температура димових газів перед димососами	130 – 220	°C
32	Температура живильної води за першим щаблем водяного економайзера	150 – 200	°C
33	Температура живильної води за другим щаблем водяного економайзера	215 – 225	°C
34	Температура поживної води за поверхневим пароохолоджувачем	175 - 180	°C
35	Температура живильної води на котел	140 – 160	°C
36	Температура живильної води до конденсатора	140 - 160	°C
37	Температура живильної води за конденсатором	180 – 190	°C
38	Температура власного конденсату на упорскування	280 – 300	°C
39	Вміст кисню в димових газах	3 – 8	%
40	Солевміст води безперервного продування	1500 – 2000	мг/л

## Опис математичних моделей

*Динамічна модель котлоагрегату.* Парогенератори є дуже складним для моделювання в динаміці об'єкт.

Вибір моделі визначається завданнями аналітичного дослідження та можливостями обчислювальної техніки. При цьому завжди доводиться йти на компроміс між точністю рішення та його простотою та наочністю.

Доведено, що з розрахунку динамічних характеристик парогенераторів можна використовувати одновимірну модель, а деяких випадках модель із зосередженими параметрами. У математичній моделі з зосередженими параметрами всі параметри системи залежить від просторових координат і є функціями лише часу. Маса та енергія таких систем зосереджена у матеріальній точці. Приймається, що параметри системи постійні на кінцевому ділянці. Опір тертя відноситься до вихідного перерізу системи і, таким чином, є місцевим опіром.

Перехід від рівнянь у приватних похідних (для розподілених систем) до звичайних рівнянь (для систем із зосередженими параметрами) спрощує модель, але водночас вносить похибки.



Вибрана у дипломному проектуванні модель є комбінованою. Більшість рішень представлена вигляді перехідних функцій з погляду зосередженості фізичних параметрів на об'єкті, ще, застосований розрахунок деяких технологічних параметрів виходячи з відомих диференціальних рівнянь у повних похідних другого порядку, описують їх поведінка у поступовій динаміці.

Видається природним розглядати не весь парогенератор в цілому, а окремі його елементи, з'єднані структурною схемою. В якості окремих ланок виділені поверхні, що відрізняються своїм конструктивним оформленням та термодинамічний стан робочого тіла.

У динамічних процесах одночасно змінюється вміст речовини та енергії. Однак у першому наближенні вплив їх можна розглядати окремо, що полегшує проведення якісного аналізу.

*Динамічний та стаціонарний режими.* Рівняння динаміки котла, які можуть бути отримані із загальних рівнянь термодинаміки при деяких спрощеннях, записуються у такому вигляді:

- рівняння суцільності

$$\frac{\partial D}{\partial z} + f \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0; \quad (4.1)$$

- рівняння енергії

$$D \frac{\partial i}{\partial z} + f \rho \frac{\partial i}{\partial \tau} = \alpha_B h_B (\theta - t); \quad (4.2)$$

- рівняння теплового балансу

$$q_H - g_m c_m \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha_B h_B (\theta - t); \quad (4.3)$$

- рівняння стану

$$\rho = \rho(p, t); \quad i = i(p, t); \quad (4.4)$$

- рівняння руху

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (4.5)$$

У систему рівнянь (1 - 5) входить п'ять параметрів, значення яких треба обчислити (вихідних величин):  $D, \rho, i, \theta, t$ . Для визначення є п'ять рівнянь (на два рівняння розпадається рівняння стану). У цій системі рівнянь тепловий потік та тиск є незалежними заданими функціями часу. Ці параметри є обурення або вхідні величини. Інші вхідні величини виходять при формулюванні граничних умов: зміна ентальпії і витрати робочого тіла в аналізованій теплообмінник.

Наведена система рівнянь (4.1) – (4.5) визначає як динамічний, і стаціонарний режим. У разі у цих рівняннях похідні за часом слід прирівняти



до нуля. Таким чином, можна отримати рівняння, що описують вихідний рівноважний режим, а також новий стійкий стан теплообмінника, якого він приходить після закінчення перехідного процесу.

Рівняння динаміки склалися елементарного обсягу трубопроводу.

### **Лінеаризація рівнянь**

Система диференціальних рівнянь (1 – 5) є нелінійною, причому тут присутні нелінійності двох типів: добуток функцій та статична залежність (коефіцієнта тепловіддачі від режимних факторів). Знайти у явному вигляді залежності типу  $D = \Phi(z, \tau); i = \Psi(z, \tau)$ , що є аналітичним рішенням системи, у загальному випадку неможливо, тому вдаються до лінеаризації рівнянь, тобто заміні нелінійних рівнянь лінійними.

Лінеаризація рівнянь проводиться у два етапи: кожна змінна величина  $X$  записується через своє значення у початковий момент часу  $X_0$  та приріст  $\Delta X$ , тобто  $X = X_0 + \Delta X$ ; після тотожних перетворень приростами в ступеня більше одиниці та твором прирощень нехтують; на другому етапі з рівняння, що описує нестационарний процес, віднімають це рівняння, записане для вихідного статичного режиму. Лінійні рівняння, що виявилися в результаті, описують динамічний процес для збільшення параметрів над їх значеннями у вихідному режимі.

Таким чином, небагато прирощень, тобто мала ступінь порушення стаціонарного режиму, є основним моментом, що робить коректною лінеаризацію.

### **Моделювання динаміки елементів пароводяного тракту**

Пароводяний тракт парогенератора виконується у вигляді системи послідовно та паралельно включених елементів. Умови роботи елементів різні, але в межах кожного з них конструктивні та режимні фактори передбачаються однаковими для всіх труб, що працюють паралельно.

У котлах типу ПК-14-2М до конвективних теплообмінників відносять перший ступінь пароперегрівача, водяний економайзер та повітропідігрівач. Радіаційними теплообмінниками вважаються пакети другого ступеня пароперегрівача. У чистому вигляді радіаційних та конвективних теплообмінників у парогенераторі не існує. Подібний поділ проводиться з міркувань зручності. При цьому в кожному окремому випадку або нехтують однією зі складових потоку тепла, або включають в іншу.

Для елементів пароводяного тракту котла приймається, що потік робочого тіла однофазний і слабкий. Для парогенеруючих каналів маса перегрітої пари в порівнянні з масою металу пароперегрівача мізерно мала. Відповідно і кількість тепла, що міститься в парі, невелика і воно в розрахунках не враховується. З цієї ж причини нехтується акумуляцією тепла в насиченій парі. Таким чином, тепла енергія в основному зосереджена у воді та металі всіх поверхонь нагріву.

Нестационарні в елементах пароводяного тракту описуються системою рівнянь (4.1) – (4.5).

### Радіаційний теплообмінник

Радіаційний теплообмінник є фізичною системою, що складається з потоку робочого тіла і оболонки його обмежує. Закон тепlopідведення до оболонки ззовні заданий.

*Зміна температури робочого тіла.* Вважаючи витрату та тиск у межах теплообмінника незмінними, і рівними їх вхідним значенням, запишемо рівняння динаміки радіаційного теплообмінника як об'єкта із зосередженими параметрами:

$$D_B c_{pB}(t - t_1) + G_B c_{pB} \frac{dt}{d\tau} + G_B c_{tB} \frac{dp}{d\tau} = \alpha_B H_B (\theta - t); \quad (4.6)$$

$$Q - G_M c_M \frac{d\theta}{d\tau} = \alpha_B H_B (\theta - t).$$

Тут враховано рівняння стану

$$di = \frac{\partial i}{\partial t} dt + \frac{\partial i}{\partial p} dp, \quad (4.7)$$

а також позначено

$$c_{pB} = \left( \frac{\partial i}{\partial t} \right)_p = \text{const}; \quad c_{tB} = \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_t = \text{const}; \quad (4.8)$$

надалі покладемо для простоти позначень  $c_B = c_{pB}$ . Теплоємність потоку та металу приймаємо незмінною.

Від рівнянь із змінними коефіцієнтами перейдемо до рівнянь із постійними коефіцієнтами, застосувавши лінеаризацію. Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_B$  береться за середнім значенням для теплообмінника, його залежність від витрати описується співвідношенням

$$\alpha_B = KD^n. \quad (4.9)$$

Показник ступеня  $n$  залежить від виду омивання, а коефіцієнт  $K$  від температури, тиску та геометричних розмірів каналу.

Нехтуючи при лінеаризації малими в ступенях вище за першу, вираз для відхилення коефіцієнта тепловіддачі:

$$\Delta \alpha_B = n \alpha_{B0} \frac{\Delta D_B}{\Delta D_{B0}}. \quad (4.10)$$

З урахуванням рівності (4.9) та статички системи (4.6):

$$\left. \begin{aligned} D_{B0}c_B(t - t_{10}) &= \alpha_{B0}H_B(\Theta_0 - t_0); \\ Q_0 &= \alpha_{B0}H_B(\Theta_0 - t_0) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

отримуємо, що лінеаризація призводить до наступної системи рівнянь для відхилень:

$$\left. \begin{aligned} (L_B + 1)\Delta t - L_B\Delta t_1 + T_B \frac{d\Delta t}{d\tau} - T_B K_p \frac{d\Delta p_1}{d\tau} - (1 - n)K_B\Delta D_{B1} &= \Delta\Theta; \\ \Delta t + K_Q\Delta Q + nK_B\Delta D_{B1} &= T_M \frac{d\Delta\Theta}{d\tau} + \Delta\Theta. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Тут введено такі позначення для комплексів режимних та конструктивних параметрів:

$$\left. \begin{aligned} L_B &= \frac{D_{B0}c_B}{\alpha_{B0}H_B}; \quad T_B = \frac{G_{Bc_B}}{\alpha_{B0}H_B}; \quad T_M = \frac{G_{Mc_M}}{\alpha_{B0}H_B}; \\ K_Q &= \frac{1}{\alpha_{B0}H_B}; \quad K_B = -L_B \frac{t_0 - t_{10}}{D_{B0}}; \quad K_p = -\frac{\frac{\partial i}{\partial p}}{\frac{\partial i}{\partial t}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Винятком однієї із змінних, наприклад  $\Delta\Theta$ , Система (4.11) зводиться до одного звичайного диференціального рівняння другого порядку з правою частиною, інтегрування якого легко виконати різними методами. Застосування для цієї мети перетворення Лапласа в задачах динаміки краще, оскільки можна послідовно отримати рішення в області зображень і в часовій області. В області комплексного змінного  $s$  відхилення температури робочого тіла пов'язане із зовнішніми впливами наступною залежністю:

$$\Delta t(s) = W_{tt_1}\Delta t_1(s) + W_{tQ}\Delta Q(s) + W_{tD_{B1}}\Delta D_{B1}(s) + W_{tp_1}\Delta p_1(s),$$

де відповідні передавальні функції мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} W_{tt_1} &= \frac{T_M s + 1}{\Lambda(s)}; \quad W_{tQ} = \frac{\xi K_Q}{\Lambda(s)}; \\ W_{tD_{B1}} &= \frac{\xi K_B (v s + 1)}{\Lambda(s)}; \quad W_{tp_1} = \frac{\xi T_B K_p s (T_M s + 1)}{\Lambda(s)}. \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

Тут

$$\xi = \frac{1}{L_B}; \quad v = (1 - n)T_M; \quad (4.15)$$

$\Lambda(s)$  - зображення лівої частини диференціального рівняння щодо  $\Delta t$  (Характеристичне рівняння):

$$\Lambda(s) = \xi T_M T_B s^2 + [\xi(T_M + T_B) + T_M]s + 1. \quad (4.16)$$

Можна знайти аналітичні вирази перехідних функцій різними каналами передачі збурень для температури робочого тіла:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{tt_1} = 1 - \frac{s_1 c_2 e^{s_2 \tau} - s_2 c_1 e^{s_1 \tau}}{s_1 - s_2}; \\ h_{tQ} = 1 - \frac{s_1 e^{s_2 \tau} - s_2 e^{s_1 \tau}}{s_1 - s_2}; \\ h_{tD_{B1}} = h_{tQ} + \nu s_1 s_2 \frac{e^{s_1 \tau} - e^{s_2 \tau}}{s_1 - s_2}; \\ h_{tp_1} = \frac{c_1 e^{s_1 \tau} - c_2 e^{s_2 \tau}}{c_1 - c_2}. \end{array} \right. \quad (4.17)$$

$$\text{Тут } c_{1,2} = 1 + T_M s_{1,2}. \quad (4.18)$$

Значення  $s_1$  і  $s_2$ , що входять у перехідні функції, є корінням характеристичного рівняння.

$$\Lambda(s) = \xi T_M T_B (s - s_1)(s - s_2) = 0; \quad (4.19)$$

$$s_{1,2} = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - R}, \quad (4.20)$$

де

$$A = \frac{\xi(T_M + T_B) + T_M}{\xi T_M T_B}; \quad R = \frac{1}{\xi T_M T_B}. \quad (4.21)$$

*Зміна витрати робочого тіла.* При постійному значенні витрати на вході в теплообмінник його величина на виході може змінюватися через стисливість робочого тіла: термічну (при зміні температури) та гідромеханічну (при зміні тиску). Флуктуації температури і тиску щодо витрати вважаються вхідними впливами, тому коливання витрати можна визначити, вирішуючи рівняння суцільності ізольовано з інших рівнянь.

Рівняння суцільності для об'єкта із зосередженими параметрами має вигляд:

$$D_B - D_{B1} + V \frac{d\rho}{d\tau} = 0, \quad (4.22)$$

або у відхиленнях

$$\Delta D_B = \Delta D_{B1} + \chi_p \frac{d\Delta t}{d\tau} + \chi_t \frac{d\Delta p_1}{d\tau}, \quad (4.23)$$

де

$$\chi_p = -V \frac{\partial \rho}{\partial t}; \quad \chi_t = -V \frac{\partial \rho}{\partial p}. \quad (4.24)$$

Підставляючи перехідні функції температури потоку (4.17..4.23) отримаємо перехідні функції по різних каналах передачі збурень для витрати робочого тіла:

$$\left. \begin{aligned} h_{D_B t_1} &= \frac{\Delta D_B}{\chi \Delta t_1} = h_{tp_1}; \\ h_{D_B Q} &= \frac{\Delta D_B}{\chi \xi K_Q \Delta Q} = \frac{e^{s_1 \tau} - e^{s_2 \tau}}{c_1 - c_2}; \\ h_{D_B D_{B1}} &= \frac{\Delta D_B}{\chi \xi K_B \Delta D_{B1}} = \frac{1}{\chi \xi K_B} + h_{D_B Q} \text{ (при } n = 1); \\ h_{D_B p_1} &= \frac{\Delta D_B}{\chi K_p \Delta p_1} = (\text{sign } \Omega) \delta(\tau) + \xi T_B \frac{c_1 s_1 e^{s_1 \tau} - c_2 s_2 e^{s_2 \tau}}{c_1 - c_2}. \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

Тут

$$\chi = -\frac{D_{B0}}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t}; \quad \Omega = 1 - \frac{\frac{\partial \rho}{\partial p} / \frac{\partial \rho}{\partial t}}{\frac{\partial i}{\partial p} / \frac{\partial i}{\partial t}}, \quad (4.26)$$

де  $\delta(\tau)$ - Імпульсна функція Дірака.

Відповідні передавальні функції каналами запишуться у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} W_{D_B t_1} &= \chi \frac{s(s+a_0)}{(s-s_1)(s-s_2)}; \\ W_{D_B Q} &= \frac{\chi \xi K_Q}{T_M} \frac{s}{(s-s_1)(s-s_2)}; \\ W_{D_B D_{B1}} &= 1 + \frac{\chi \xi K_B}{T_M} \frac{s}{(s-s_1)(s-s_2)}; \\ W_{D_B p_1} &= \chi_p K_p s \left[ \Omega - \frac{1+\xi}{\xi T_B} \frac{s+b_0}{(s-s_1)(s-s_2)} \right], \end{aligned} \right\} \quad (4.27)$$

де

$$a_0 = \frac{1}{T_M}; \quad b_0 = \frac{1}{(1+\xi)T_M}. \quad (4.28)$$

*Зміна тиску робочого тіла.* Тиск пов'язується зі зміною інших параметрів та зовнішніх впливів рівнянням руху, яке при зневазі до інерційного члена має вигляд:

$$p_1 - p = \xi \frac{D_1^2}{\rho} \quad (4.29)$$

або у відхиленнях

$$\Delta p_1 - \Delta p = \frac{2\delta p_1}{D_{B0}} \Delta D_B - \frac{\delta p_1}{\rho_0} \Delta \rho, \quad (4.30)$$

де  $\delta p_1 = p_{10} - p_0$ . Вважатимемо, що динамічні процеси протікають при тиску  $p_1$ . Тоді тиск за теплообмінником:

$$\Delta p = \left(1 + \frac{\delta p_1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial p}\right) \Delta p_1 + \frac{\delta p_1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t - \frac{2\delta p_1}{D_{B0}} \Delta D_B.$$

Закон зміни у нестационарному процесі температури  $\Delta t$  та витрати  $D_B$  знайдено вище. Підставляючи в (4.31) залежності (4.17) та (4.25), визначимо перехідні функції для тиску при відповідних збуреннях:

$$\left. \begin{aligned} h_{pt_1} &= \frac{\Delta p}{\bar{\chi} \Delta t} = 2h_{tp_1} + h_{tt_1}; \\ h_{pQ} &= \frac{\Delta p}{\bar{\chi} \xi K_Q \Delta Q} = 2h_{D_B Q} + h_{tQ}; \\ h_{pD_{B1}} &= \frac{\Delta p}{\bar{\chi} \xi K_B \Delta D_{B1}} = \frac{2}{\chi} + h_{pQ}; \\ h_{pp_1} &= \frac{\Delta p}{\bar{\chi} K_p \Delta p_1} = \frac{1}{\bar{\chi} K_p} + \Omega - 1 + h_{D_B p_1} - \xi (h_{tp_1} - h_{D_B Q}) \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

Тут

$$\bar{\chi} = \frac{p_{10} - p_0}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t}; \quad \chi = \frac{t_0 - t_{10}}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (4.33)$$

Передатні функції можна знайти, виходячи з перехідних функцій (4.32) або перетворюючи за Лапласом рівняння (4.31) і підставляючи зображення впливів, що обурюють:

$$\left. \begin{aligned} W_{pt_1} &= 2\bar{\chi} \frac{(s+a_0)(s+c_0)}{(s-s_1)(s-s_2)}; \\ W_{pQ} &= \frac{2\bar{\chi} \xi K_Q}{T_M} \frac{s+c_0}{(s-s_1)(s-s_2)}; \\ W_{pD_{B1}} &= \frac{2\bar{\chi}}{\chi} + \frac{2\bar{\chi} \xi K_B}{T_M} \frac{s+c_0}{(s-s_1)(s-s_2)}; \\ W_{pp_1} &= 1 + \bar{\chi} K_p (\Omega - 1) + \bar{\chi} K_p s \left[ 2\xi T_B \Omega - (2\xi + 1) \frac{s+d_0}{(s-s_1)(s-s_2)} \right], \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

тут

$$c_0 = \frac{1}{2\xi T_B}; \quad d_0 = \frac{1}{(2\xi + 1) T_M}. \quad (4.35)$$

Моделі конвективного теплообмінника, колектора упорскування, динаміки камери згоряння та циркуляційного контуру складні та не наведені.

*Моделювання контурів регулювання контролера.* Контури регулювання моделі імітують роботу ПІД-регуляторів. Закон формування керуючого впливу для такого типу регуляторів:

$$Y(\tau) = K_p \left( X(\tau) + \frac{1}{T_i} \int_0^\tau X(\tau) d\tau + T_D \frac{dX(\tau)}{d\tau} \right), \quad (4.36)$$

де  $X(\tau)$ - поточне значення регульованої величини;  
 $Y(\tau)$ - керуючий вплив;  
 $T_{\text{и}}$ - час інтегрування;  
 $T_{\text{п}}$ - час запобігання;  
 $K_p$ - коефіцієнт передачі регулятора.

У разі квантування безперервної функції регульованої величини за часом вираз (4.36) набуде вигляду:

$$Y(\tau_i) = K_p \left( e_n + \frac{t}{T_{\text{и}}} \sum_1^n e_n + \frac{T_{\text{п}}}{t} (e_n - e_{n-1}) \right), \quad (4.37)$$

де  $e_n$ - значення помилки регулювання у момент квантування  $n$ ;  
 $e_{n-1}$ - значення помилки регулювання у момент квантування  $n - 1$ ;  
 $t$ - період квантування контуру регулювання, с.

### Робота з програмою

Тут і далі назви елементів програми виділені курсивом. Детальна інструкція користувача щодо роботи з програмою знаходиться в теці ДОПОМОГА, файл *Інструкція користувача.doc*.

Програма запускається подвійним натисканням лівої кнопки миши на піктограмі файлу *Chamber.exe*.

Власне імітаційна модель запускається вибором пункту *Старт/Рестарт* із підменю *Моделювання*. У цьому починається відлік часу, побудова графіків тощо. У будь-який момент модель може бути зупинена вибором пункту *Пауза* з того ж меню. Продовження роботи – повторний вибір *Пауза*. У режимі паузи можлива зміна будь-яких параметрів моделі, реакція на ці дії виникне відразу після продовження роботи моделі. Скидання всіх графіків, параметрів контурів регулювання та повторний старт моделі здійснюється в будь-який момент часу вибором пункту *Старт/Рестарт* із підменю *Моделювання*.

Співвідношення реального та модельного часу можна зробити на сторінці *Масштаби часу* пункту меню *Установки*. Там можна вказати масштаб тимчасової осі на всіх графіках моделі.

Під час моделювання кожного з основних елементів котлоагрегату будуються графіки зміни технологічних параметрів у часі, які можна переглянути, вибираючи пункти підменю *Графіки головного меню*. Поточні значення всіх технологічних параметрів моделі, згруповані за конструктивними елементами котла, можна переглянути, вибравши пункт *Усі поточні значення* з підменю *Технологічні параметри*.

Журнал роботи сигналізації можна переглянути шляхом вибору пункту *Журнал попереджувальної та захисної сигналізації* з підменю *Сигналізація*. Кожен рядок у журналі відповідає події включення або вимкнення



сигналізації. Налаштування імітації сигналізації здійснюється на сторінці *Сигналізація* пункту *Налаштування* з підменю *Моделювання*.

За промовчаням програма не формує жодного звіту, оскільки це потребує додаткових системних ресурсів. Якщо виникає потреба у формуванні звітів, їх потрібно вказати в підменю *Звіти*. Налаштування видачі програмою звітів здійснюється на сторінці *Звіти* пункту *Налаштування* підменю *Моделювання*.

Слід врахувати, що запуск або перезапуск моделі не призводить до чищення файлів. Очистити файли звітів можна шляхом повторного вибору їх у меню *Звіти*.

Вплив користувача на модель може здійснюватися двома способами: імітацією зовнішніх збурень або зміною параметрів контурів, що регулюють. Вибір способу впливу визначається положенням елемента управління в нижній правій частині мнемосхеми. При старті і перезапуску моделі перемикач встановлюється в положення *Контролер*. У кожний момент часу модель сприймає зміни положення елементів управління у вікні *Контур* регулювання або у вікні завдання ступінчастих багатопараметричних збурень, що визначається положенням елемента управління *Управління моделлю*. Необхідно звернути увагу на той факт, що в режимі керування за допомогою збурень робота контурів регулювання не припиняється, а продовжується при постійних налаштуваннях.

Доступ до контурів регулювання АСУ та їх налаштувань можна отримати шляхом вибору пунктів підменю *Контур* регулювання контролера. Кнопки ручного управління виконавчим механізмом доступні лише при ручному режимі роботи контуру регулювання, під час роботи з ними імітується робота кінцевих вимикачів.


Для технологічних параметрів, для яких потрібно задати ступінчасте обурення, перемикач *Обурення* необхідно перевести в положення *Знач*, після чого ввести в поле праворуч від нього нове значення параметра. Після натискання кнопки *Подати обурення* програма встановить нові значення вибраних технологічних параметрів, при цьому слід звернути увагу, що перемикачі *Обурення* не змінять свого значення, доки користувач не змінить їх.

Ті параметри, якими можна керувати безпосередньо, позначені піктограмою як ключа. Піктограма у вигляді двох стрілок вказує на те, що технологічний параметр, будучи вхідним для даного конструктивного елемента котлоагрегату, обчислюється в той же час як вихідний для іншого конструктивного блоку.

Деякі нюанси роботи з програмою, пов'язані з тим, що програма написана достатньо давно:

1) Для того, щоб виставляти запис даних (ця кнопка не сильно помітно змінюється, і не зовсім зрозуміло, чи вона натиснута чи ні), необхідно перейти у вкладку *Звіти*.

2) перемикач *Управління моделлю* може мати два стану: *Контролер* та *Обурення*. Кнопка *Контролер* знаходиться внизу ліворуч від зображення двигуна (її можна бачити), а кнопка *Обурення* знаходиться за зображенням



двигуна, її не видно через те, що на неї наїхало зображення двигуна, мабуть тому, що програма писалася під 4:3 монітори, а зараз 16 : 9. Щоб її натиснути, треба навести курсор миши на закінчення слова (4 кінцевих букви ).

**Критерії оцінювання виконаної роботи:** знання конструкції та технології, основні контрольовані та регульовані параметри, функції АСУТП, використовувані моделі, якість обробки та побудови графіків, правильність висновків.

**Зміст звіту:** Звіт оформляється в Microsoft Word поточної версії та завантажується в Moodle. Звіт повинен містити детальний опис дій, відповідні графіки та висновки. Якщо це потрібно, в звіт можна додавати копії екрану монітора з поясненнями.

**Захист роботи.** Після завантаження звіту у Moodle викладач перевіряє звіт. У випадку відсутності суттєвих помилок робота оцінюється 60% від максимально можливої кількості балів, що зазвичай наведена в семестровому графіку. Для підвищення оцінки здобувач повинен публічно захистити роботу.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Котел ТЕЦ. Призначення. Конструкція. Технологія.
2. Перелік контрольованих параметрів.
3. Основні контури регулювання.
4. АСУ теплоагрегатом, основні підсистеми,
5. Статична та динамічні (інформаційні, керуючі) моделі АСУТП конвертерної плавки, їх призначення.
6. Алгоритми управління котлоагрегатом.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравченко В. П., Койфман О. О., Сімкін О. І. Автоматизація технологічних процесів і виробництв у чорній металургії : навчальний посібник. Одеса : Олді+, 2023. 276 с.  
URI: <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/482>.
2. СТАНДАРТ АСУ ТП 2.0. Вид. офіц. Київ : ТОВ «МЕТІНВЕСТ ДІДЖИТАЛ», 2020. 50 с.

*ПРИКЛАД ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА*

**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Кафедра АВЕРС**

**Звіт  
з лабораторної роботи №\_  
<Назва лабораторної роботи>**

з навчальної дисципліни

**«АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ  
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ»**

Здобувача групи ХХХ-ХХ-Х  
Прізвище Ім'я По батькові

Керівник:  
Доцент., к.т.н.,                      О.О. Койфман

Запоріжжя, 20ХХ



*Навчально-методичне видання*

**Сімкін Олександр Ісакович  
Койфман Олексій Олександрович  
Давиденко Олег Віталійович**

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ  
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ**

**методичні вказівки до виконання лабораторних робіт**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції