

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Металургії чавуну і сталі»

В авторській редакції

**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Навчально-методичні рекомендації
до лабораторних і практичних занять

Електронне видання

ДНІПРО
2025

УДК 669.18(076.5)

М 74

Упорядники:

О. М. Стоянов, Є. В. Синегін, В. О. Рубан, С. В. Журавльова

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
G10.2.01 «Металургійні процеси одержання та обробки металів та сплавів»
Протокол №3 від 08.09.2025 р.

М 74 Моделювання та оптимізація технологічних процесів сталеплавильного виробництва : навчально-методичні рекомендації до лабораторних і практичних занять / упоряд. О. М. Стоянов, Є. В. Синегін, В. О. Рубан, С. В. Журавльова ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 55 с.

В навчально-методичних рекомендаціях викладено методичні настанови до вивчення дисципліни «Моделювання та оптимізація технологічних процесів сталеплавильного виробництва», наведено рекомендації до самостійної роботи студентів при вивченні дисципліни, робочу програму дисципліни та методичні рекомендації для виконання лабораторних і практичних занять.

Навчально-методичні рекомендації призначені для опанування освітньої компоненти «Моделювання та оптимізація технологічних процесів сталеплавильного виробництва» за спеціальністю G10 «Металургія» для ОПП «Технології та обладнання виробництва металів і сплавів» освітнього рівня магістр.

© Стоянов О. М. та ін., упорядкування, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ЗМІСТ

1	МЕТА І ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ	4
2	РОЗПОДІЛ ГОДИН ЗА ВИДАМИ НАВЧАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ.....	6
3	ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ.....	8
	Лабораторна робота №1 Розподіл елементів в системі метал-шлак	8
	Лабораторна робота №2 Моделювання та розрахунок коефіцієнту розподілу сірки.....	13
4	ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ	23
	Практична робота №1 Розрахунок дозвукового струменю.....	23
	Практична робота №2 Розрахунок понадзвукового струменю.....	27
	Практична робота №3 Розрахунок взаємодії газового струменю з ванною	32
	Практична робота №4 Розрахунок барботажної системи	39
	Практична робота №5 Складання масиву даних та його обробка за обраною моделлю.	44
	Практична робота №6 Оптимізація киснево-конвертерного процесу	49

1 МЕТА І ЗАВДАННЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

1.1 Мета навчальної дисципліни

Засвоєння знань та придбання навичок в питаннях з побудови і використання моделей сталеплавильних систем і оптимізації технологій сталеплавильних процесів.

1.2 Компетентності, формування яких забезпечується

Навчальна дисципліна сприяє набуттю таких передбачених освітньою програмою компетентностей:

ЗК 1. Здатність проводити досліджень на відповідному рівні.

ФКН 1. Здатність розробляти та реалізовувати проекти в сфері металургії, а також дотичні до неї міждисциплінарні проекти.

ФКН 4. Здатність аналізувати і вдосконалювати технологічні процеси в металургії.

ФКН 6. Здатність оцінювати технічні, економічні, екологічні, безпекові та інші ризики при плануванні або впровадженні нових технологічних процесів.

ФКН 7. Здатність планувати і виконувати експериментальні дослідження в металургії та інтерпретувати їх результати.

ФКН 8. Здатність приймати ефективні рішення в металургії.

ФКН 9. Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми металургії в широких та мультдисциплінарних контекстах, у нових або незнайомих середовищах за наявності неповної або обмеженої інформації з урахуванням аспектів соціальної та етичної відповідальності.

ФКН 11. Здатність демонструвати розуміння широкого міждисциплінарного інженерного контексту і його основних принципів при вирішенні металургійних проблем.

ФКН 13. Уміння грамотно здійснювати аналіз і синтез при вивченні технічних систем у металургії.

ФКН 14. Здатність демонструвати розуміння відповідних кодексів практики і промислових стандартів у металургійному виробництві та наукових дослідженнях в сфері металургії.

ФКН 15. Здатність оцінювати ризики при плануванні або впровадження нових технологічних процесів.

Здатність демонструвати розуміння базових знань з основних методів оптимізації процесів виробництва сталі відповідно до конкретних виробничих умов.

ФКД 3. Здатність застосовувати на практиці методи моделювання та оптимізації металургійних систем відповідно до конкретних умов сталеплавильного виробництва

ФКД 11. Здатність прогнозувати поведінку об'єкту досліджень при зміні параметрів його стану, обґрунтовувати та визначати основні структурно-технологічні зв'язки в умовах сучасного металургійного виробництва.

1.3 Програмні результати навчання, що забезпечуються

Відповідно до освітньої програми дисципліна спільно з іншими освітніми компонентами має забезпечити досягнення таких програмних результатів навчання:

РН2. Збирати необхідну інформацію, використовуючи науково-технічну літературу, бази даних та інші джерела, аналізувати і оцінювати її, обирати оптимальні методи та здійснювати статистичний аналіз даних.

РН7. Аналізувати енергетичну ефективність технологічних процесів та обладнання, відповідно до спеціалізації, та розробляти заходи з енергозбереження.

РН16. Аналізувати і вирішувати складні інженерні проблеми в металургії.

РНД 4. Знати основні види моделей сталеплавильних систем, їх вади, переваги.

РНД 5. Знати порядок вирішення задачі на оптимізацію та можливості щодо оптимізації сталеплавильних процесів у галузі конвертерного виробництва, позапічної обробки та розливки сталі

РНД 6. Вміти обрати та користуватися моделлю відповідно до задачі, визначити фактори, що впливають на цільову функцію.

РНД 7. Вміти скласти та вирішити задачу на оптимізацію ґрунтуючись на аналізі моделі сталеплавильного процесу.

1.4 Міждисциплінарні зв'язки

Навчальна дисципліна є обов'язковою для вивчення студентами, які здобувають освітній ступінь магістра за освітньою програмою «Металургійні процеси одержання та обробки металів та сплавів» за професійним спрямуванням *Металургія сталі (МЕ02)*.

Передумовами вивчення дисципліни є базові знання з основних видів металургійної сировини та вимог до неї у сталеплавильному виробництві та розуміння основ термодинаміки та кінетики відновних та окисних металургійних процесів, чому сприяє опанування обов'язкових для вивчення навчальних дисциплін «Фізика», «Хімія», «Основи металургії», «Спеціальні розділи теорії металургійних процесів», «Спеціальні розділи аглодоменного виробництва», «Спеціальні розділи сталеплавильного виробництва», «Спеціальні розділи електromеталургійного виробництва», «Технологія сталеплавильних процесів».

Досягнуті по вивченні дисципліни результати навчання та набуті практичні навички можуть стати на користь при вивченні професійних дисциплін, виконанні кваліфікаційної роботи магістра та у практичній роботі магістра після закінчення навчального закладу.

2 РОЗПОДІЛ ГОДИН ЗА ВИДАМИ НАВЧАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Денна форма навчання

Види навчальної діяльності	Усього	Семестри	
		2.1	2.2
Усього годин за навчальним планом	180	60	120
у тому числі:			
Аудиторні заняття	64	24	40
– лекції	32	16	16
– лабораторні роботи	8	8	-
– практичні заняття	24	-	24
– семінарські заняття	0	-	-

Види навчальної діяльності	Усього	Семестри	
		2.1	2.2
Самостійна робота	116	36	80
– підготовка до аудиторних занять	32	12	20
– виконання та захист курсової роботи	-	-	-
– виконання та захист індивідуальних завдань	-	-	-
– підготовка та складання екзаменів	-	-	-
– підготовка до інших контрольних заходів	36	12	24
– опрацювання розділів, які не викладаються на лекціях	48	12	36
Форма семестрового контролю		Дифзалік	Дифзалік

Заочна форма навчання

Види навчальної діяльності	Усього	Семестри	
		1	
Усього годин за навчальним планом	120	120	
у тому числі:			
Аудиторні заняття	16	16	
– лекції	12	12	
– лабораторні роботи			
– практичні заняття	4	4	
– семінарські заняття			
Самостійна робота	104	104	
– підготовка до аудиторних занять	8	8	
– виконання та захист курсової роботи			
– виконання та захист індивідуальних завдань	6	6	
– підготовка та складання екзаменів	15	15	
– підготовка до інших контрольних заходів			
– опрацювання розділів, які не викладаються на лекціях	75	75	
Форма семестрового контролю		Екзамен	

3 ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ

Лабораторна робота №1

Розподіл елементів в системі метал-шлак

Вступ

Дослідження розподілу елементів у системі метал-шлак є важливим для розуміння термодинаміки металургійних процесів. Вивчення розподілу елементів у системі метал-шлак дає можливість зрозуміти закономірності протікання реакцій між фазами та оцінити умови видалення домішок, що є досить важливим для оптимізації процесів плавки та підвищення якості сталі.

Мета роботи: ознайомитись з методикою визначення розподілу елементів у системі метал-шлак.

1. Теоретична частина

Вивчення рівноваги хімічних реакцій в системах з металами, їх оксидами, сульфідами і іншими з'єднаннями дозволяє отримати не тільки рівноважні дані як межі взаємодії речовин, що досліджуються, але і визначити по цим даним термодинамічні характеристики реагентів. Останні використовують для розрахунків інших процесів і систем з участю досліджених реагентів, скорочуючи тим самим об'єм робіт по проведенню нових експериментів. Таким чином, дослідження рівноваги металургійних реакцій представляє не тільки теоретичний, але і практичний інтерес.

На основі рівноважних даних для приватних реакцій і більш простих систем можуть бути виявлені термодинамічні умови відновлення оксидів, окислення домішок металів і інших процесів в складних системах з різними фазами.

Критерієм досягнення рівноваги в системах при заданих постійних зовнішніх умовах (температурі і тиску) є постійність складу фази, що досліджується. Однак ця ознака є тільки необхідним, але недостатнім.

Потрібно враховувати можливість виникнення помилкової і метастабільних рівноваги. Частіше всього при низьких температурах хімічні реакції в системі протікають настільки повільно, що склад взаємодіючих фаз

практично не змінюється у часі. Внаслідок сильного кінетичного гальмування має місце так звану помилкову рівновагу, усунути яке в багатьох випадках можна підвищенням температури з подальшим поверненням до початкових умов. Виникнення метастабільних рівноваги пов'язане з утворенням метастабільних конденсованих фаз, перехід яких в стабільні загальмований кінетичними чинниками. У цьому випадку також доцільне проведення додаткового циклу зміни умов, сприяючого отриманню стабільної фази.

2. Методика.

У тиглі міститься метал і шлак певного хімічного складу. У металі на початку експерименту створюється певна концентрація елемента шляхом додання відповідного матеріалу. Метал і шлак витримуються при визначеній температурі певний час (звичайно близько години), протягом якого елемент частково окислюється, а його оксид переходить до шлаку. З часом система метал-шлак приходить до рівноваги, а склад фаз визначається шляхом відбору проб металу і шлаку. Такі досліди проводять при різних температурах 1300-1700 °С, за якими метал і шлак залишаються розплавленими.

За рівнянням реакції перерозподілу елемента визначається вираз константи рівноваги. За складом шлаку визначається активність компонентів, обчислюється величина константи рівноваги, будується залежність її від температури.

3. Розрахункова частина

За допомогою комп'ютерної програми «Розподіл елементів» виконати серію експериментів по встановленню перерозподілу марганцю в системі метал-шлак згідно номеру варіанта (табл.2).

Для цього потрібно на дисплеї ПЕВМ в таблицю “ВМІСТ ЕЛЕМЕНТІВ В ШЛАЦІ” і “ТЕМПЕРАТУРА РОЗПЛАВУ” занести свої значення. Потім виконується команда “ПУСК” і отримуються експериментальні показання вмісту марганцю в металі, після досягнення системи метал-шлак рівноваги. Для проведення наступного дослідження необхідно натиснути на кнопку “СБРОС”. Кожен студент згідно свого завдання проводить серію дослідів для конкретного складу шлаку змінюючи температуру в інтервалі від 1300-1700 °С, результати експерименту заносить в табл.1.

Далі проводиться розрахунок η за виразом 1 і заноситься у табл.1.

Таблиця 1

Перерозподіл марганцю у системі метал-шлак

№	Склад шлаку, %				Рівноважній марганець в металі (%) при температурі				
	CaO	SiO ₂	FeO	MnO	1300	1400	1500	1600	1700

Розрахуйте константу рівноваги для реакції



$$K_{\text{Mn}} = a_{\text{MnO}} / a_{\text{Mn}} \cdot a_{\text{FeO}} \quad (2)$$

і побудуйте графік залежності $\text{Lg } K_{\text{Mn}}$ від $1/T$. Активність оксиду заліза і оксиду марганцю знаходять користуючись псевдотройними діаграмами (рис 1., рис. 2).

За виразом

$$\text{Lg } K_{\text{Mn}} = 6440 / T - 2,95 \quad (3)$$

розрахуйте $\text{Lg } K_{\text{Mn}}$ і також нанесіть на рис.2. У звіті викладіть свої думки, щодо причин відхилень результатів експерименту у табл.1. від залежності, що отримані у інших дослідженнях.

4. Звіт з роботи повинен містити:

- схему експериментального обладнання;
- методику виконання роботи;
- таблицю вихідних даних і результатів розрахунків;
- рисунки;
- аналіз результатів.

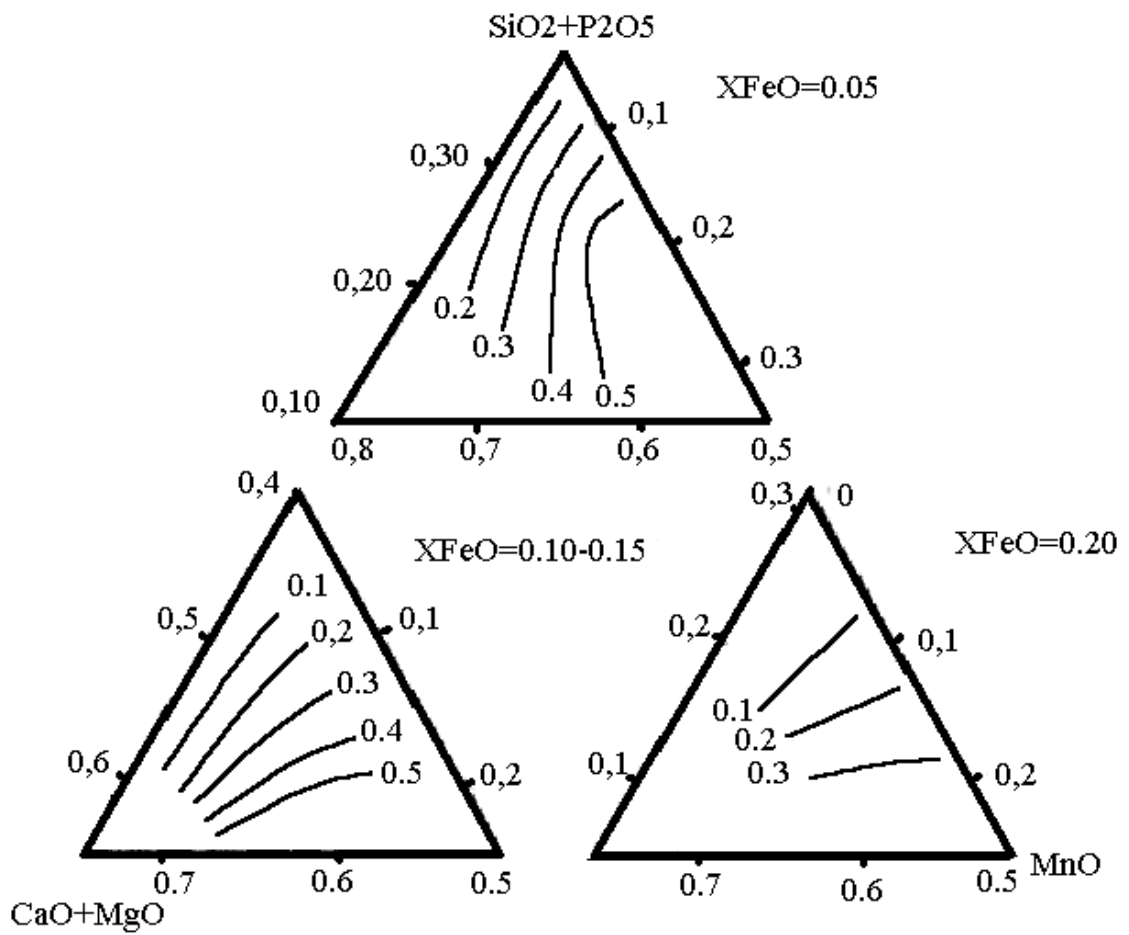


Рис.1 Псевдопотрійна діаграма активності оксиду марганцю

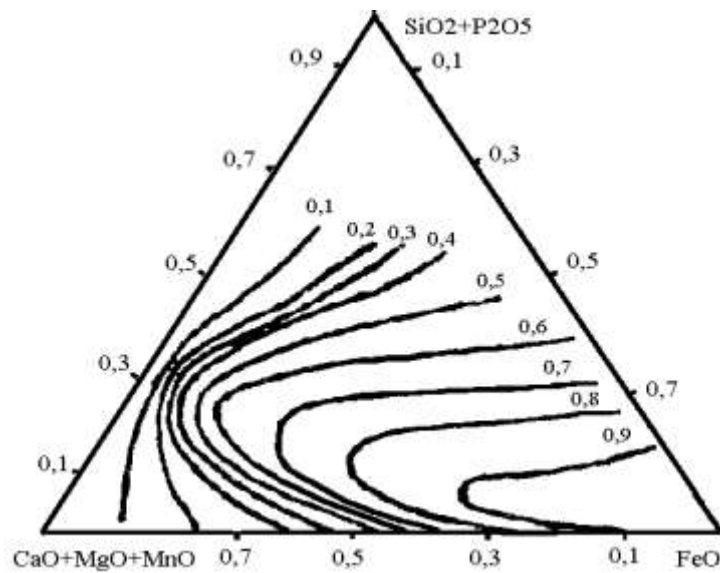


Рис.2 Псевдопотрійна діаграма активності оксиду заліза

Варіанти завдань

№	СКЛАД ШЛАКУ, %			
	СаО	SiO ₂	FeO	MnO
1	20	30	25	12
2	21	29.5	24	5
3	22	29	23	12
4	23	28.5	22	11
5	24	28	21	11
6	25	27.5	20	6
7	26	27	19	9
8	27	26.5	18	14
9	28	26	17	6
10	29	25.5	16	9
11	30	25	15	6
12	31	24.5	14	10
13	32	24	13	12
14	33	23.5	12	4
15	34	23	11	5
16	35	22.5	10	6
17	36	22	11	9
18	37	21.5	12	14
19	38	21	13	9
20	39	20.5	14	5
21	40	20	15	10
22	41	19.5	16	8
23	42	19	17	12
24	43	18.5	18	6
25	44	18	19	4
26	45	17.5	20	4
27	46	17	21	10
28	47	16.5	22	7
29	48	16	23	11
30	49	15.5	24	10
31	50	15	25	4

Лабораторна робота №2

Моделювання та розрахунок коефіцієнту розподілу сірки

Вступ

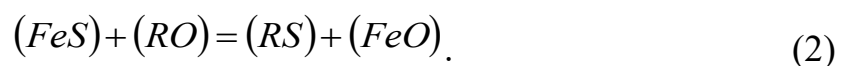
Видалення сірки з рідкого металу - одна з головних умов виробництва якісної і високоякісної сталі. Така сталь містить не більше 0,02% сірки. У шихтових матеріалах кількість сірки (% до маси металу) зазвичай перевищує допустиме в готовій сталі, крім того, в деяких випадках метал поглинає сірку з газової фази. З'являється необхідність видалення сірки з металу на заключній стадії виробництва - при випуску і на ділянці позапічної обробки.

Розробку моделі процесу десульфурації металу порошкоподібними і кусковими ТШС необхідно почати з прийняття методики розрахунку коефіцієнта розподілу сірки між шлаком і металом, найбільш повно відображає дійсність. Це дозволить прогнозувати результати обробки сталі і розробляти високоефективні технології позапічної обробки металу. Тому необхідно розглянути існуючі методики розрахунку коефіцієнта розподілу сірки (L_s) та їх відповідність практичних результатів.

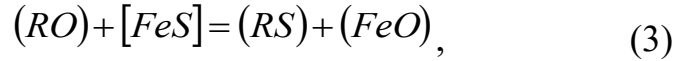
Мета роботи: засвоєння методики моделювання та розрахунку коефіцієнта розподілу сірки між металом і шлаком на основі різних теоретичних підходів.

1. Моделювання та розрахунок розподілу сірки на основі молекулярної теорії будови шлакового розплаву

У світлі молекулярної теорії будови шлаків розроблений ряд методик визначення коефіцієнта розподілу сірки. Прихильники цієї теорії вважають, що десульфурація металу при його контакті з шлаком, що містить основні оксиди, протікає за наступними молекулярним реакцій, кожній з яких передують розподіл між металом і шлаком добре розчинної в обох фазах сульфиду заліза:



Сумарна реакція описується рівнянням



константа рівноваги якої

$$K_{RS} = \frac{a_{(RS)} a_{(FeO)}}{a_{[FeS]} a_{(RO)}}, \quad (4)$$

де RO – CaO, MgO, MnO і т.п.; RS – CaS, MgS, MnS і т.п.

Грант і Чіпмен досліджували вплив хімічного складу чавуну на Ls після досягнення рівноваги в плавках, проведених в індукційній печі під нейтральною атмосферою. Однакова температура шлаку і металу забезпечувалася за рахунок тепла, що виділяється підвішеним над шлаком графітовим кільцем, яке нагрівалася індуктованими в ньому струмами. Ці автори встановили прямолінійну залежність коефіцієнта розподілу сірки (LS) від надлишку основних оксидів в шлаку $n_{изб.осн}$, моль / 100 г шлаку:

$$L_S = \frac{(\%S)}{[\%S]} = 1,4 + 16n_{изб.осн}, \quad (5)$$

де

$$n_{изб.осн} = (n_{(CaO)} + n_{(MgO)} + n_{(MnO)}) - (2n_{(SiO_2)} + 4n_{(P_2O_5)} + 2n_{(Al_2O_3)} + n_{(Fe_2O_3)}). \quad (6)$$

Вплив (% FeO) на коефіцієнт розподілу сірки ними не було встановлено. З цієї причини оксид заліза не включений в суму основних оксидів і зроблено висновок, що реакція $[FeS] + (CaO) = (CaS) + (FeO)$ не регулює процес десульфурації і більш імовірно простий розподіл

$$[FeS] = (FeS); \quad K_S = \frac{a_{(FeS)}}{a_{[FeS]}} = \frac{a_{(S)}}{a_{[S]}}. \quad (7)$$

З урахуванням, що $a_{(S)}=(\%S) \cdot \gamma_{(S)}$ и $a_{[S]}=[\%S] \cdot f_{[S]}$ отримуємо:

$$L_S = \frac{(\%S)}{[\%S]} = K_S \frac{f_{[S]}}{\gamma_{(S)}} \quad (8)$$

Роль основних оксидів в процесі десульфурації металу полягає в тому, що зі зростанням їх концентрації зменшується $\gamma_{(S)}$. Тому коефіцієнт розподілу сірки збільшується з підвищенням коефіцієнта активності сірки в металі ($f_{[S]}$) і зі зниженням коефіцієнта активності сірки в шлаку ($\gamma_{(S)}$).

Узагальнивши данні Гранта і Чипмена, виходячи з молекулярних схем утворення (CaS), (MnS), (MgS) і впливу (ΣFeO) на співвідношення (FeS)/[FeS], А.Н. Морозов отримав полуемпіричне рівняння

$$L_S = \frac{(\%S)}{[\%S]} = \left[0,5 + 2,25 \Sigma n_{(FeO)} \right] \left[1 + \frac{4n_{(CaO)'} + 2,5n_{(MnO)}}{\Sigma n_{(FeO)}} \right] \quad (9)$$

де n – число молей відповідного оксиду на 100 г шлаку; (CaO)' – “вільний” оксид кальцію;

$$n_{(CaO)'} = \Sigma n_{(CaO)} - 2n_{(SiO_2)} - 3n_{(P_2O_5)} - n_{(Al_2O_3)}, \quad (10)$$

$$\Sigma n_{(FeO)} = n_{(FeO)} + 2n_{(Fe_2O_3)}. \quad (11)$$

Значення коефіцієнта розподілу сірки, розраховані за рівнянням (9), набагато менше отриманих за методом Гранта і Чіпмен, так як А. Н. Морозов нехтує десульфуруючою здатністю (MgO) і передбачає, що (MnO) слабкіше впливає на L_S , ніж (CaO) .

З рівнянь, заснованих на молекулярній теорії шлаків, заслуговує на увагу рівняння Л. Дарка і Б. Ларсена:

$$L_S = \frac{(\%S)}{[\%S]} = N_\Sigma \left\{ 2,6 + 1,6 \frac{n_{(CaO)}}{\Sigma n_{(FeO)}} (V' - 2) + 11,2 [\%Mn] \right\}, \quad (12)$$

де $n_{(CaO)'} = \Sigma n_{(CaO)} - 4n_{(P_2O_5)}$; $V' = \frac{\Sigma n_{(CaO)} - 4n_{(P_2O_5)}}{\Sigma n_{(FeO)}}$ – коефіцієнт основності;

$\Sigma n_{(FeO)} = n_{(FeO)} + 3n_{(Fe_2O_3)}$; $N_\Sigma = n_{(SiO_2)} + n_{(P_2O_5)} + n_{(MnO)} + \Sigma n_{(FeO)} + 0,21(V' - 2)n_{(CaO)}$ – загальне число молів в 100 г шлаку (з урахуванням утворення з'єднань).

Вплив основності шлаку і вмісту в ньому оксиду заліза на L_S , за розглянутими даними, такі, зі збільшенням (% FeO) до 5 - 8 коефіцієнт розподілу сірки різко знижується. При подальшому зростанні (% FeO) зменшення L_S незначно. Ці дані відносяться до плавок з добре уварену гомогенними шлаками. При однаковій основності шлаку зростання (% FeO) сприяє підвищенню коефіцієнта розподілу сірки, оскільки збільшує ступінь розчинення вапна в шлаку.

2. Моделювання та розрахунок розподілу сірки по іонній теорії будови шлакового розплаву

Іонна теорія більш правильно відображає структуру шлаку (хоча в ньому і є угруповання типу молекул) і механізм процесів. Крім того, всю сукупність молекулярних реакцій переходу сірки з металу в шлак можна висловити однією іонної реакцією



константа рівноваги якої

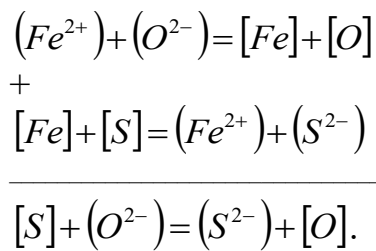
$$K_S = \frac{a_{(Fe^{2+})} a_{(S^{2-})}}{[\%S] f_{[S]}}. \quad (14)$$

Процес десульфурації металу можна уявити як взаємодію на поверхні контакту фаз атомів сірки в металі з іонами кисню в шлаку з утворенням іонів сірки в шлаку і атомів кисню в металі,



що відображає той же механізм процесу десульфурації металу.

Це підтверджується тим, що, підсумовуючи вираз (13) з рівнянням процесу розподілу кисню між шлаком і металом, отримуємо формулу (15)



За даними А. М. Самаріна, Л. А. Шварцмана і М. І. Тьомкіна

$$\lg K_S = -\frac{3160}{T} + 0,46 \quad (16)$$

В межах температур сталеплавильної ванни KS майже не залежить від температури і дорівнює 0,05 - 0,06. Так як

$$a_{(Fe^{2+})} = \frac{n_{(FeO)} \gamma_{(Fe^{2+})}}{\Sigma(n^+)}, \quad (17)$$

$$a_{(S^{2-})} = \frac{n_{(S)} \gamma_{(S^{2-})}}{\Sigma(n^-)} = \frac{(\%S) \gamma_{(S^{2-})}}{32 \Sigma(n^-)}, \quad (18)$$

то з формули (14)

$$K_S = \frac{n_{(FeO)} (\%S) \gamma_{(Fe^{2+})} \gamma_{(S^{2-})}}{32 [\%S] f_{[S]} \Sigma(n^+) \Sigma(n^-)}. \quad (19)$$

Коефіцієнт розподілу сірки між металом і шлаком

$$L_S = \frac{(\%S)}{[\%S]} = \frac{32K_s \Sigma(n^+) \Sigma(n^-) f_{[S]}}{n_{(FeO)} \gamma_{(Fe^{2+})} \gamma_{(S^{2-})}}, \quad (20)$$

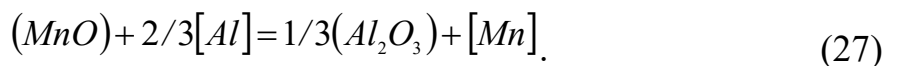
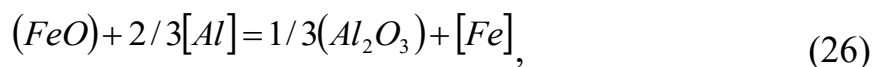
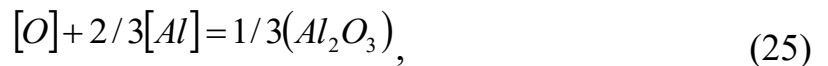
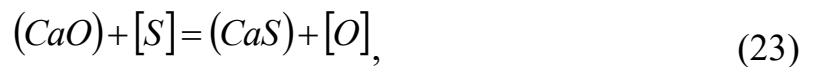
де

$$\Sigma(n^+) = n_{(CaO)} + n_{(MgO)} + n_{(MnO)} + n_{(FeO)}, \quad (21)$$

$$\Sigma(n^-) = \Sigma(n^+) - n_{(SiO_2)} - n_{(P_2O_5)} - n_{(Al_2O_3)} + n_{(Fe_2O_3)} + n_{(S)}. \quad (22)$$

Відповідно до рівняння (20) підвищення коефіцієнта розподілу сірки сприяють: збільшення основності шлаку, що забезпечує зростання активності аніонів кисню, $\Sigma(n^+)$ и $\Sigma(n^-)$; збільшення коефіцієнта активності сірки в металі $f_{[S]}$ за допомогою підвищення в ньому концентрації вуглецю і кремнію; зменшення активності оксиду заліза (FeO) і коефіцієнта активності аніонів сірки $\gamma_{(S^{2-})}$ в результаті підвищення надлишку основних оксидів в шлаку.

Якщо шлак містить MnO і MgO не більше 10% (кожного), то LS без значної похибки можна розрахувати за рівнянням Гранта і Чіпмен (5) або за виразом (20), заснованому на іонній теорії і враховує $\gamma_{(Fe^{2+})}$ и $\gamma_{(S^{2-})}$. На границі розділу метал-шлак протікають реакції:



З урахуванням реакцій (23) – (27) розрахунки по визначенню концентрації (FeO) в прикордонному шарі практично неможливі. Тому значення n (FeO) в рівнянні (20) свідомо буде неточним, що не відповідає дійсності, що робить іонну теорію непридатною для випадку позапічної десульфурації стали жужільними расплавами з низьким вмістом оксиду заліза, так як незначні похибки в розрахунку n (FeO) призводять до істотних змін в значенні коефіцієнта розподілу сірки.

Загальним недоліком розрахунку за рівнянням Гранта і Чіпмен (5) і вираженню (20) є нівелювання обезсірковуючої властивостей основних оксидів або катіонів (у другому випадку цей недолік можна компенсувати, враховуючи різний вплив кожного з катіонів на $\gamma_{(S^{2-})}$). Тут також слід зазначити, що незначні неточності у визначенні (% FeO) призводять до істотних теоретичним погрішностей даної моделі.

3. Моделювання процесу десульфурації на основі теорії оптичної основності шлакового розплаву

Альтернативним методом розгляду процесу десульфурації металу є використання методики, заснованої на понятті сульфідної ємності шлакового розплаву.

Сіркопоглинаючу здатність шлаків при парціальному тиску кисню менше 10-6 ат характеризують їх сульфідної ємністю CS . Масовий коефіцієнт розподілу сірки між шлаком і металом LS залежить від величини CS . З урахуванням виразів для вільної енергії Гіббса реакцій розчинення газоподібного сірки і кисню в рідкому залозі ця залежність має вигляд

$$\lg L_S = \lg C_S + \frac{2361}{T} - 0,367 + \lg f_S - \lg f_O - \lg [\%O] \quad (28)$$

где f_S и f_O – коефіцієнти активності сірки і кисню в залізі.

Таким чином, визначення CS дозволяє прогнозувати, з урахуванням температури і складу металу, ефективність процесів десульфурації.

Встановлено, що сульфідна ємність оксидних розплавів визначається їх оптичної основністю. Концепція останньої базується на наявності зсуву в

спектрах введених в оксидну матрицю пробних іонів Ti^{2+} , Pb^{2+} або Bi^{3+} , що мають електронну конфігурацію $d^{10}s^2$. Зрушення викликані розширенням зовнішніх орбіталей зазначених іонів внаслідок донорної дії іона кисню. Згідно досліджень, оптична основність індивідуального оксиду λ_i пов'язана з електронегативністю металу по Паулінгу:

$$\lambda_i = \frac{0,74}{(x - 0,26)}, \quad (29)$$

Що дозволяє представити λ складних оксидних систем сумою доданків $\lambda_i x_i$. Тут x_i – ефективні катіонні долі, які розраховуються:

$$x_i = \frac{v_i Z_i N_i}{\sum_{i=1}^m v_i Z_i N_i}, \quad (30)$$

де v_i - валентність аніону; Z_i – число в формулі оксиду і N_i – мольна частка останнього.

Запропоновано також розрахунок оптичної основності, де використовується величина середньої електронної щільності D , яка дорівнює

$$D = \alpha z / r^3, \quad (31)$$

де α – параметр аніону, z – валентність катіону і r – середня відстань між аніоном і катіоном.

Для оксидів прийнято $\alpha = 1$; для фторидів і хлоридів лужноземельних металів відповідно $\alpha = 3,7$ і $4,9$. Тим самим можуть бути просто розраховані значення D , а величина оптичної основності оксидів або галогенідів визначена зі співвідношення

$$\lambda = \frac{0,745}{(D + 0,6)}. \quad (32)$$

Неадекватність запропонованої розрахунку оптичної основності оксидів і галогенідів доведена, так як для таких оксидів, як BaO, Al₂O₃, CaO, FeO і MgO розбіжності величин λ отриманих за формулами (29) і (32), значні і можуть становити від 3% (Al₂O₃) до 27% (MgO). А так як від λ лінійно залежить логарифм сульфідної ємності:

$$\lg C_S = \frac{(22690 - 54640\lambda)}{T} + 43,6\lambda - 25,2, \quad (33)$$

то зазначене розбіжність вказує на неможливість застосування формули (32) для розрахунку сульфідної ємності металургійних шлаків.

У зв'язку з цим зіставили експериментальні і розрахункові за формулою (32), значення сульфідної ємності ряду подвійних і потрійних систем, що дозволило зробити деякі висновки.

Оптичні основності шлаків були виміряні. Порівняння порядку оксидів за шкалою оптичної основності, розрахованої з катіонній електронегативності по Паулінгу, по відношенню до інших пропонованих способів каже, що ступінь відповідності зі значеннями, розрахованими по міцності оксиду, найбільш висока.

Тому в подальшому при розрахунках використовували значення шкали оптичної основності для розрахунку сульфідної ємності шлаків.

Для визначення теоретичного рівноважного коефіцієнта розподілу сірки L_S^T в системі покривний шлак - метал використовували сучасну методику розрахунку L_S^T через сульфідну ємність шлаку C_S , що дає хороші результати для шлаків малої окисленості.

$$\lg \frac{(S)}{[S]} = \lg \frac{C_S k_2 f_{[S]}}{a_{[O]} k_1}, \quad (34)$$

де k_1 і k_2 – константи рівноваги реакцій: $1/2\{S_2\} = [S]$ і $1/2\{O_2\} = [O]$; $a_{[O]}$ – активність кисню в металі; $f_{[S]}$ – коефіцієнт активності сірки в металі.

По рівнянню:

$$\lg \frac{(S)}{[S]} = -\frac{770}{T} + 1,15 + \lg C_s - \lg a_{[O]} + \lg f_{[S]} \quad (35)$$

Визначення сульфідної ємності шлаків C_s можна виконувати по добре зарекомендованій методиці І.Д. Соммервіля з використанням поняття і величин оптичної основності шлакового розплаву λ .

Активність кисню в металі розраховували по рівновазі з алюмінієм, активність глинозему в прикордонному шарі шлаку визначали з урахуванням протікання реакцій (23) - (27).

Виконується розрахунок за трьома теоріями кількість варіантів для розрахунку № варіанту + 3 наступних.

Таблиці 1

Завдання для розрахунку лабораторної роботи №2

№	Хімічний склад сталі, %				Хімічний склад ковшового шлаку, %						
	Спoch	Скін	Al ст	T ст	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	S _{ch}
1	0,023	0,012	0,036	1585	46,5	9,75	11,2	19,8	2,36	0,21	0,45
2	0,027	0,02	0,058	1590	49,7	6,6	14,77	12,8	9	3,57	0,3
3	0,03	0,021	0,033	1615	57,2	8,25	12	21,4	1,45	0,3	0,86
4	0,046	0,027	0,071	1625	54,3	7,5	16,45	14,3	2,27	0,85	0,54
5	0,025	0,016	0,048	1605	51,5	6,75	15,1	24,4	1,89	0,55	0,448
6	0,029	0,026	0,052	1590	49,7	4	18,9	17,4	3,71	4,5	0,22
7	0,016	0,015	0,056	1580	49,9	4,4	20,1	22,3	1,75	1,65	0,211
8	0,03	0,028	0,045	1600	48,7	2,8	22,4	20,4	3,29	3,53	0,33
9	0,028	0,024	0,054	1590	44,25	7,4	12,3	34	1,08	0,42	0,331
10	0,029	0,022	0,081	1575	45,05	8,35	15,6	23,2	4,8	1,65	0,335
11	0,018	0,01	0,068	1610	51,4	7,7	12,9	21,4	2,9	1	0,325
12	0,008	0,005	0,051	1615	54,6	9	8,4	23,8	1,8	0	0,36
13	0,006	0,003	0,057	1600	53,2	9,4	8	24,6	1,4	0	0,253
14	0,007	0,003	0,097	1600	59,3	6,6	8,1	20,2	0,6	0,2	0,228
15	0,006	0,003	0,064	1605	52,4	8,1	9,6	22,3	1,4	0,23	0,2
16	0,006	0,004	0,054	1608	47,5	7,6	9,3	26,8	1,4	0,92	0,26
17	0,01	0,006	0,047	1580	56,3	6,47	10,1	22,7	1,97	0,15	0,335
18	0,009	0,005	0,072	1595	55,1	10,1	9,1	21,4	2,4	0,3	0,312
19	0,007	0,005	0,062	1600	55,2	7,6	9,4	20	2	0	0,26
20	0,006	0,005	0,103	1610	51,8	10,3	7,1	26	2	0	0,381

4 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

Практична робота №1

Розрахунок дозвукового струменя

Мета роботи: засвоїти методику розрахунку параметрів дозвукового газового струменя при витіканні з сопла та оцінити його вплив на процес переміщення ванни.

Завдання роботи: У процесі виконання роботи необхідно визначити густину газу, розрахувати параметр неізотермічності й довжину початкової ділянки струменя, обчислити витрати газу через сопло та масові витрати ежектованої атмосфери. Також потрібно встановити відстань, на якій утворюється стехіометрична.

Газ 1, який має температуру $t_1 = 20$ °С, є метаном, витікає з циліндричного сопла діаметром $d = 1$ см, під початковим тиском $P_1^{\text{поч}} = 7$ атм, у навколишню атмосферу, яка є сумішшю O_2-N_2 , що містить газ 2 (25 % O_2), має температуру $t_2 = 1200$ °С і знаходиться під атмосферним тиском.

Розрахунок

Густина газу 1 за нормальних умов

$$\rho_1^{\text{норм}} = \frac{M_1}{22.4} = \frac{16}{22.4} = 0.7143 \text{ кг/м}^3, \quad (1)$$

де, M_1 – маса 1 кг-молю газу, кг, 22,4 – об’єм останнього, м³,
 $T_1 = t_1 + 273 = 20 + 273 = 293$ °С.

Початкова густина газу 1 становить:

$$\rho_1^{\text{поч}} = \rho_1^{\text{норм}} \cdot \frac{273}{T_1} \cdot P_1^{\text{поч}} = 0.7143 \cdot \frac{273}{293} \cdot 7 = 4.6587 \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

Густина газу 2 за нормальних умов:

$$\text{[Redacted]} \text{ кг/м}^3. \quad (3)$$

Густина навколишньої атмосфери становить

$$\rho_2 = \rho_2^{\text{норм}} \cdot \frac{273}{T_2} = 1,2946 \cdot \frac{273}{1200+273} = 0,2399 \text{ кг/м}^3. \quad (4)$$

Параметр неізотермічності струминної течії газу,

$$\rho_1^{\text{вих}} \approx 0,63 \cdot \rho_1^{\text{поч}} = 0,63 \cdot 4,6587 = 2,9350 \text{ кг/м}^3, \quad (5)$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_2}{\rho_1^{\text{вих}}} = \frac{0,2399}{2,9350} = 0,0818. \quad (6)$$

Початкова ділянка звукового струменю дорівнює

$$\bar{l} \equiv \frac{l_n}{d} = 7,1 \cdot \bar{\rho}^{-0,22} = 7,1 \cdot 0,0818^{-0,22} = 12,3171 \text{ калібрів}, \quad (7)$$

$$l_n = \bar{l} \cdot d = 12,3171 \cdot 1 = 12,3171 \text{ см}. \quad (8)$$

Витрати газу крізь сопло дорівнюють

$$q_1 = \frac{35}{M_1} \cdot f \cdot P_1^{\text{поч}} = \frac{35}{16} \cdot 0,7854 \cdot 7 = 12,0264 \text{ м}^3/\text{хв.}, \quad (9)$$

де f – площа сопла $f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,7854 \text{ см}^2$,

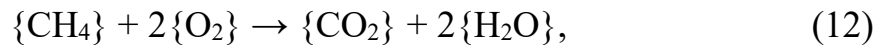
На відстані X від сопла завдяки перемішуванню газів 1 та 2 масові витрати ежектованої навколишньої атмосфери становитимуть

$$\frac{G_2}{G_1} = 0,078 \cdot \bar{\rho}^{1/2} \cdot \frac{X}{d}, \quad (10)$$

де G_1 – масові витрати газу 1, що розраховуються по q_1

$$G_1 = q_1 \cdot \rho_1^{\text{вих}} = 12.0264 \cdot 2.9350 = 35.2975 \text{ кг/хв.} \quad (11)$$

Якщо горіння газу відбувається за рівнянням



То можна визначити масові витрати ежектованої навколишньої атмосфери $G_2^{\text{стех}}$, які необхідні для створення стехіометричної суміші з газом 1, що спалюється, а потім відстань X , яка для цього потрібна.

$$G_2^{\text{стех}} = 2 \cdot \frac{G_1 \cdot M_2}{M_1} = 2 \cdot \frac{35.2975 \cdot 29}{32} = 63.9764 \text{ кг/хв.} \quad (13)$$

Враховуючи, що у газі 2 лише 25 % O_2

$$G_2 = \frac{G_2^{\text{стех}}}{0.25} = \frac{63.9764}{0.25} = 255.9055 \text{ кг/хв,} \quad (14)$$

$$X = \frac{G_1 \cdot d}{0.078 \cdot \rho^{1/2} \cdot G_2} = \frac{35.2975 \cdot 1}{0.078 \cdot 0.0818^{1/2} \cdot 255.9068} = 6.1847 \text{ см.} \quad (15)$$

Звичайно, повне спалення газу досягається на відстані, що удвічі перевищує необхідну для створення стехіометричної суміші

$$2 \cdot 6.1828 = 12.3656 \text{ см.} \quad (16)$$

Вихідні дані

№ п/п	$t_1, ^\circ\text{C}$	d, cm	$p_1^{\text{ном}}$, атм	$\gamma_{\text{гази 2}}$ $\text{O}_2, \%$	$t_2, ^\circ\text{C}$
1.	0	1	3	21	1000
2.	5	2	4	22	1100
3.	10	3	5	23	1200
4.	15	4	6	24	1100
5.	20	5	7	25	1000
6.	15	6	8	24	1100
7.	10	5	9	23	1200
8.	5	4	8	22	1100
9.	0	3	7	21	1000
10.	5	2	6	22	1100
11.	10	1	5	23	1200
12.	15	2	4	24	1100
13.	20	3	3	25	1000
14.	15	4	4	24	1100
15.	10	5	5	23	1200
16.	5	6	6	22	1100
17.	0	5	7	21	1000
18.	5	4	8	22	1100
19.	10	3	9	23	1000
20.	15	2	8	24	1100
21.	20	1	7	25	1200
22.	15	2	6	24	1100
23.	10	3	5	23	1000
24.	5	4	4	22	1100
25.	0	5	3	21	1200
26.	5	6	4	22	1100
27.	10	5	5	23	1000
28.	15	4	6	24	1100
29.	20	3	7	25	1200
30.	15	2	8	24	1100

Практична робота №2

Розрахунок понадзвукового струменя

Мета роботи: розрахунок параметрів надзвукового струменя газу, який витікає з сопла Лавалю, а також дослідження його взаємодії з навколишнім середовищем.

Завдання роботи: розрахувати вихідний діаметр сопла Лавалю, визначити параметри газу та навколишньої атмосфери. Обчислити подовженість струменя та масові витрати газів у суміші, а також визначити стехіометричні витрати та кінцевий склад струменя.

Розрахунок

Понадзвуковий струмінь газу 1, який є киснем, з температурою $t_1 = 20$ °С, витікає з сопла Лавалю, яке має критичний діаметр $d_{кр} = 5$ см. Початковий тиск газу 1 становить $P_1^{поч} = 9$ атм. Для досягнення коефіцієнту швидкості $\lambda_1 = 1,40$ необхідно мати вихідний діаметр сопла Лавалю, який розраховується з виразу

$$\frac{d_{вих}^2}{d_{кр}^2} = \frac{1}{\lambda_1} \cdot \left[\frac{2/(k+1)}{1 - (k-1)\lambda_1^2/(k+1)} \right]^{k-1},$$

де k – адіабатична стала ($k = 1,4$).

$$d_{вих} = \sqrt{\frac{d_{кр}^2}{\lambda_1} \cdot \left[\frac{2/(k+1)}{1 - (k-1)\lambda_1^2/(k+1)} \right]^{k-1}} = \sqrt{\frac{5^2}{1,40} \cdot \left[\frac{2/(1,4+1)}{1 - (1,4-1) \cdot 1,40^2/(1,4+1)} \right]^{1,4-1}} = 5,5162 \text{ см}$$

В цьому випадку вихідний тиск газу буде дорівнювати

$$\frac{P_{вих}}{P_{поч}} = \left[1 - \frac{(k-1) \cdot \lambda_1^2}{(k+1)} \right]^{\frac{k}{k-1}};$$

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{поч}} \cdot \left[1 - \frac{(k-1) \cdot \lambda_1^2}{(k+1)} \right]^{\frac{k}{k-1}} = 9 \cdot \left[1 - \frac{(1.4-1) \cdot 1.40^2}{(1.4+1)} \right]^{\frac{1.4}{1.4-1}} = 2,2545 \text{ атм}$$

Густина газу 1 за нормальних умов $\rho_1^{\text{норм}} = \frac{M_1}{22.4} = \frac{32}{22.4} = 1,4286 \text{ кг/м}^3$, M_1 – маса 1 кг-молю газу, кг, 22,4 – об’єм останнього, м³, $T_1 = t_1 + 273 = 20 + 273 = 293 \text{ }^\circ\text{C}$

Його густина

$$\frac{\rho_{\text{вих}}}{\rho_{\text{поч}}} = \left[1 - \frac{(k-1) \cdot \lambda_1^2}{(k+1)} \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

Початкова густина газу 1 становить

$$\rho_1^{\text{поч}} = \rho_1^{\text{норм}} \cdot \frac{273}{T_1} \cdot P_1^{\text{поч}} = 1,4286 \cdot \frac{273}{293} \cdot 9 = 11,9795 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{вих}} = \rho_{\text{поч}} \cdot \left[1 - \frac{(k-1) \cdot \lambda_1^2}{(k+1)} \right]^{\frac{1}{k-1}} = 11,9795 \cdot \left[1 - \frac{(1.4-1) \cdot 1.40^2}{(1.4+1)} \right]^{\frac{1}{1.4-1}} = 4,4567 \text{ кг/м}^3$$

Навколишня атмосфера, до якої витікає понадзвуковий струмінь, складається з газу 2, який є моно оксидом вуглецю, має температуру $t_2 = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ і знаходиться під атмосферним тиском. Подовженість початкової ділянки понадзвукового струменю розраховується за виразом

$$\bar{l} \equiv \frac{l_n}{d} = 6.8 \cdot \bar{\rho}^{-1/2},$$

де $\bar{\rho}$ – параметр неізотермічності струминної течії газу,

Густина газу 2 за нормальних умов

$$\rho_2^{\text{норм}} = \frac{M_2}{22.4} = \frac{28}{22.4} = \frac{28}{22.4} = 1,25 \text{ кг/м}^3,$$

Густина навколишньої атмосфери становить

$$\rho_2 = \rho_2^{\text{норм}} \cdot \frac{273}{T_2} = 1,25 \cdot \frac{273}{1600 + 273} = 0,1822 \text{ кг/м}^3,$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_2}{\rho_1^{\text{вих}}} = \frac{0,1822}{4,4567} = 0,0409,$$

$$\bar{i} \equiv \frac{l_n}{d} = 6,8 \cdot 0,0409^{-1/2} = 33,6317 \text{ калібрів},$$

$$l_n = \bar{i} \cdot d_{\text{вих}} = 33,6317 \cdot 5,5162 = 185,52 \text{ см},$$

Понадзвуковий струмінь ежектує газ 2 і на відстані $X = 105$ см масові витрати у суміші газу 2 становитимуть величину, яка розраховується за виразом

$$\frac{G}{G_1} = 0,3 \cdot \bar{\rho}^{1/2} \cdot \frac{X}{d_{\text{вих}}} = 0,3 \cdot 0,0409^{1/2} \cdot \frac{105}{5,5162} = 1,1546$$

де G_1 – масові витрати газу 1, G – сума витрат газу 1 і 2 (навколишньої атмосфери).

Витрати газу 1 крізь сопло дорівнюють

$$q_1 = \frac{35}{M_1} \cdot f_{\text{кр}} \cdot P_1^{\text{поч}} = \frac{35}{32} \cdot 19,6350 \cdot 7 = 193,2816 \text{ м}^3/\text{хв.},$$

$$\text{де } f - \text{ площа сопла } f = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5^2}{4} = 19,6350 \text{ см}^2,$$

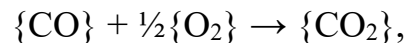
Масові витрати газу 1 становлять

$$G_1 = q_1 \cdot \rho_1^{\text{вих}} = 19,6350 \cdot 4,4567 = 861,4008 \text{ кг/хв.}$$

Тоді фактичні витрати навколишньої атмосфери становлять

$$G_2 = G_1 \cdot \left(\frac{G}{G_1} - 1 \right) = 861.4008 \cdot (1.1546 - 1) = 133.1663 \text{ кг/хв,}$$

Стехіометричні витрати газу 1 за реакцією



становлять

$$G_1^{\text{стех}} = \frac{G_2 \cdot M_1}{2 \cdot M_2} = \frac{133.1663 \cdot 32}{2 \cdot 28} = 76.0950 \text{ кг/хв.}$$

Частка газу 1, яка витрачається на спалення газу 2 становить

$$\frac{G_1^{\text{стех}}}{G_1} = \frac{76.0950}{861.4008} = 0.0883 \text{ або } 8,83 \%$$

Оскільки на спалення СО витрачається лише частка кисню, що вдувається, то у системі існує надлишок кисню і на відстані Х вона загалом складається з O_2 і CO_2 .

Середній склад газу у струмені, мас. %:

- вміст O_2 $\frac{G_1 - G_1^{\text{стех}}}{G_1 + G_2} \cdot 100\% = \frac{861.4008 - 76.0950}{861.4008 + 133.1663} \cdot 100\% = 78.9596\%$
- вміст CO_2 $100 - \% \text{O}_2 = 100 - 78.9596 = 21.0404\%$

Вихідні дані

№№ п/п:	$t_1, ^\circ\text{C}$	$d_{\text{кр}}, \text{см}$	$p_1^{\text{ноч}}, \text{атм}$	λ_1	$t_2, ^\circ\text{C}$	$X_3, \text{см}$
1.	0	1	9	1,40	1400	15
2.	5	2	6	1,42	1450	30
3.	10	3	7	1,44	1500	60
4.	15	4	5	1,46	1550	68
5.	20	5	6	1,48	1600	100
6.	15	6	7	1,50	1550	150
7.	10	7	8	1,52	1500	210
8.	5	5	9	1,54	1450	180
9.	0	5	10	1,56	1400	120
10.	5	4	11	1,58	1450	100
11.	10	3	12	1,60	1500	90
12.	15	2	11	1,58	1550	60
13.	20	1	10	1,56	1600	30
14.	15	2	9	1,54	1550	50
15.	10	3	8	1,52	1500	60
16.	5	4	7	1,50	1450	110
17.	0	5	6	1,48	1400	125
18.	5	6	9	1,46	1450	140
19.	10	7	7	1,44	1500	20
20.	15	6	6	1,42	1550	150
21.	20	5	9	1,40	1600	105
22.	15	4	7	1,42	1550	70
23.	10	3	8	1,44	1500	65
24.	5	2	5	1,46	1450	50
25.	0	1	6	1,48	1400	25
26.	5	2	7	1,50	1450	60
27.	10	3	8	1,52	1500	85
28.	15	4	9	1,54	1550	90
29.	20	5	10	1,56	1600	140
30.	15	6	11	1,58	1550	200

Практична робота №3

Розрахунок взаємодії газового струменя з ванною

Мета роботи: розрахунок параметрів взаємодії надзвукового газового струменя з рідким металом, визначення глибини його занурення у ванну та встановлення режиму взаємодії.

Завдання роботи: Розрахувати швидкість газу та діаметр сопла, визначити глибину занурення струменя в металеву ванну. Обчислити критерій Казанцева та інші параметри, щоб визначити режим взаємодії. Розрахувати витрати та імпульс струменя.

Розрахунок

Понадзвуковий струмінь кисню температурою $t_1 = 10^\circ\text{C}$ витікає з сопла Лаваля, яке має критичний діаметр $d_{\text{кр}} = 1$ см і нахилене до вертикалі на кут $\alpha = 15^\circ$, знаходиться на відстані $h = 35$ см від металевої ванни і занурюється в останню на глибину L . Навколишня атмосфера є моно оксидом вуглецю з температурою $t_2 = 1550$.

Глибина занурення може бути обчислена за рівнянням

$$L = -\frac{2}{3} \cdot h + \frac{1}{6} \cdot \left[8 \cdot h^3 + 108 \cdot f + 12 \cdot (12 \cdot h^3 \cdot f + 81 \cdot f^2)^{1/2} \right]^{1/3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{h^2}{\left[8 \cdot h^3 + 108 \cdot f + 12 \cdot (12 \cdot h^3 \cdot f + 81 \cdot f^2)^{1/2} \right]^{1/3}}$$

де $f = 2 \cdot C_D \cdot \cos \alpha \cdot \dot{m}_n^2 \cdot k \cdot d^3 / \pi \cdot n$; $K \equiv \frac{(\rho \cdot w^2)_{\text{вих}}}{\rho_m \cdot g \cdot d_{\text{вих}}}$ – число Казанцева; C_D , n – постійні ($C_D \approx 1$, $n \approx 0,70$); $w_{\text{вих}}$ – швидкість газу 1 на виході з сопла ($w_{\text{вих}} = \lambda \cdot w_{\text{зв}}$); $w_{\text{зв}}$ – швидкість звуку, яка розраховується за виразом

$$w_{\text{зв}} = \left(\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot \frac{8319}{M_1} \cdot T_{\text{Поч}} \right)^{1/2} = \left(\frac{2 \cdot 1.4}{1.4+1} \cdot \frac{8319}{32} \cdot 283 \right)^{1/2} = 292.9727 \text{ м/с}$$

M_1 – маса 1 кг-молю газу, кг, 22,4 – універсальна газова стала останнього ($k = 1,4$), T_1 – абсолютна температура газу 1, К.

$$T_1 = t_1 + 273 = 10 + 273 = 283 \text{ }^\circ\text{C}$$

ρ_M – густина металу;

λ_1 – коефіцієнт швидкості який розраховується, виходячи з умови, що сопло Лавалю є розрахунковим, тобто, $P_{\text{вих}} = 1 \text{ атм.}$

$$\lambda = \left\{ \frac{k+1}{k-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{\text{вих}}}{P_1^{\text{поч}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{1,4+1}{1,4-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{13} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = 1,7654$$

Тоді швидкість газу 1 на виході з сопла дорівнює

$$w_{\text{вих}} = \lambda \cdot w_{\text{зв}} = 1,7654 \cdot 292,9727 = 517,2237 \text{ м/с}$$

Вихідний діаметр сопла дорівнює

$$d_{\text{вих}} = \sqrt{\frac{d_{\text{кр}}^2}{\lambda_1} \cdot \left[\frac{2/(k+1)}{1 - (k-1)\lambda_1/(k+1)} \right]^{\frac{1}{k-1}}} = \sqrt{\frac{1^2}{1,7654} \cdot \left[\frac{2/(1,4+1)}{1 - (1,4-1) \cdot 1,7654^2 / (1,4+1)} \right]^{\frac{1}{1,4-1}}} = 1,4477 \text{ см}$$

Густина газу 1 нормальна, початкова і на виході становить відповідно

$$\rho_1^{\text{норм}} = \frac{M_1}{22,4} = \frac{32}{22,4} = 1,4286 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_1^{\text{поч}} = \rho_1^{\text{норм}} \cdot \frac{273}{T_1} \cdot P_1^{\text{поч}} = 1,4286 \cdot \frac{273}{283} \cdot 13 = 17,9152 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{вих}} = \rho_{\text{поч}} \cdot \left[1 - \frac{(k-1) \cdot \lambda_1^2}{(k+1)} \right]^{\frac{1}{k-1}} = 17,9152 \cdot \left[1 - \frac{(1,4-1) \cdot 1,7654^2}{(1,4+1)} \right]^{\frac{1}{1,4-1}} = 2,8678 \text{ кг/м}^3$$

Густина газу 2 за нормальних умов

$$\rho_2^{\text{норм}} = \frac{M_2}{22.4} = \frac{28}{22.4} = \frac{28}{22.4} = 1,25 \text{ кг/м}^3,$$

Густина навколишньої атмосфери становить

$$\rho_2 = \rho_2^{\text{норм}} \cdot \frac{273}{T_2} = 1,25 \cdot \frac{273}{1550 + 273} = 0,1872 \text{ кг/м}^3,$$

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_2}{\rho_1^{\text{вих}}} = \frac{0,1872}{2,8678} = 0,0653,$$

$$\bar{l} \equiv \frac{l_n}{d} = 6,8 \cdot 0,0653^{-1/2} = 26,6158 \text{ калібрів}$$

$$l_n = \bar{l} \cdot d_{\text{вих}} = 26,6158 \cdot 1,4477 = 39,8634 \text{ см},$$

Критерій Казанцева дорівнює

$$K \equiv \frac{(\rho \cdot w^2)_{\text{вих}}}{\rho_M \cdot g \cdot d_{\text{вих}}} = \frac{2,8678 \cdot 517,2237^2}{7000 \cdot 9,81 \cdot 1,4477 \cdot 10^{-2}} = 745,9381$$

$$f = 2 \cdot C_D \cdot \cos \alpha \cdot \bar{l}_n^2 \cdot k \cdot d^3 / \pi \cdot n = 2 \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 26,6158^2 \cdot 745,9381 \cdot 1,4477^3 / 3,1416 \cdot 0,7 = 1,5596$$

$$L = -\frac{2}{3} \cdot 0,35 + \frac{1}{6} \cdot \left[8 \cdot 0,35^3 + 108 \cdot 1,5596 + 12 \cdot \left(12 \cdot 0,35^3 \cdot 1,5596 + 81 \cdot 1,5596^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{0,35^2}{\left[8 \cdot 0,35^3 + 108 \cdot 1,5596 + 12 \cdot \left(12 \cdot 0,35^3 \cdot 1,5596 + 81 \cdot 1,5596^2 \right)^{1/2} \right]^{1/3}} = 0,9389 \text{ м}$$

Взаємодія газового струменю з рідким металом може відбуватись у режимах:

- відкритого кратеру;
- відкритого кратеру з розбризканням рідкого металу;

- глибокого проникнення;

Межа між першим та другим режимами визначається за рівнянням

$$\bar{L} \cdot \left[\frac{\beta_{\sigma}^{1/3}}{2^{5/6} \cdot Kr^{1/3}} \right] \cdot \left(\frac{\rho_{вих}}{\rho_m} \right)^{1/2} \cdot Ka^{11/36} \cdot \bar{L}^{13/36} \geq 2^{5/4} \cdot \pi^{3/4} \cdot Ka^{1/12} \cdot Kr^2 \cdot \beta_{\sigma}^{1/2} \quad (1)$$

де $\bar{L} = \frac{L}{d_{вих}} = \frac{0.9389}{1.4477 \cdot 10^{-2}} = 62.6854$ калібрів;

Kr – співвідношення швидкості зворотнього потоку газу на глибині L ($Kr = 0,3$), яка знаходиться з виразу

$$W_L = \frac{W_{вих} \cdot l_n}{h + L} = \frac{517.2237 \cdot 39.8634 \cdot 10^{-2}}{0.35 + 0.9389} = 159.9732 \text{ м/с,}$$

$$Kr = \frac{W_L}{W_{вих}} = \frac{159.9732}{517.2237} = 0.3093$$

$$Ka \equiv \frac{\sigma^3 \cdot \rho_m}{\mu_m \cdot g} = \frac{1.6^3 \cdot 7000}{0.006 \cdot 9.81} = 487121.9844 \text{ – критерій Капиці;}$$

де $\sigma = 1,6 \text{ Н/м}^2$ – поверхневий натяг металу; $\mu_m = 0,006 \text{ Па}\cdot\text{с}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості металу; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – гравітаційне прискорення; $\beta_{\sigma} = 1,4$ – коефіцієнт парусності.

Приводимо рівняння (1) до вигляду

$$\bar{L} - a \cdot \bar{L}^{13/36} \geq b, \quad (2)$$

Де

$$a = \left[\frac{\beta_{\sigma}^{1/3}}{2^{5/6} \cdot Kr^{1/3}} \right] \cdot \left(\frac{\rho_{вих}}{\rho_m} \right)^{1/2} \cdot Ka^{11/36} = \left[\frac{1.4^{1/3}}{2^{5/6} \cdot 0.3093^{1/3}} \right] \cdot \left(\frac{2.8678}{7000} \right)^{1/2} \cdot 487121.9844^{11/36} = 1.0276$$

$$b = 2^{5/4} \cdot \pi^{3/4} \cdot Ka^{1/12} \cdot Kr^2 \cdot \beta_{\sigma}^{1/2} = 2^{5/4} \cdot 3.1416^{3/4} \cdot 487121.9844^{1/12} \cdot 0.3093^2 \cdot 1.6^{1/2} = 2.0226$$

Вирішуємо рівняння (2) графічним методом, для цього знаходимо значення його лівої частини при значеннях $\bar{L} = 20 \dots 100$ з кроком 20 і будуємо графік, на абсцисі якого відкладають обрані величини \bar{L} , а на ординаті – розраховані величини лівої частини рівняння, які з'єднують лінією. А також проводиться лінія, що відповідає величині правої частини рівняння. Точки перетину ліній відповідають кореням рівняння (2), з яких треба обрати найбільш вірогідний.

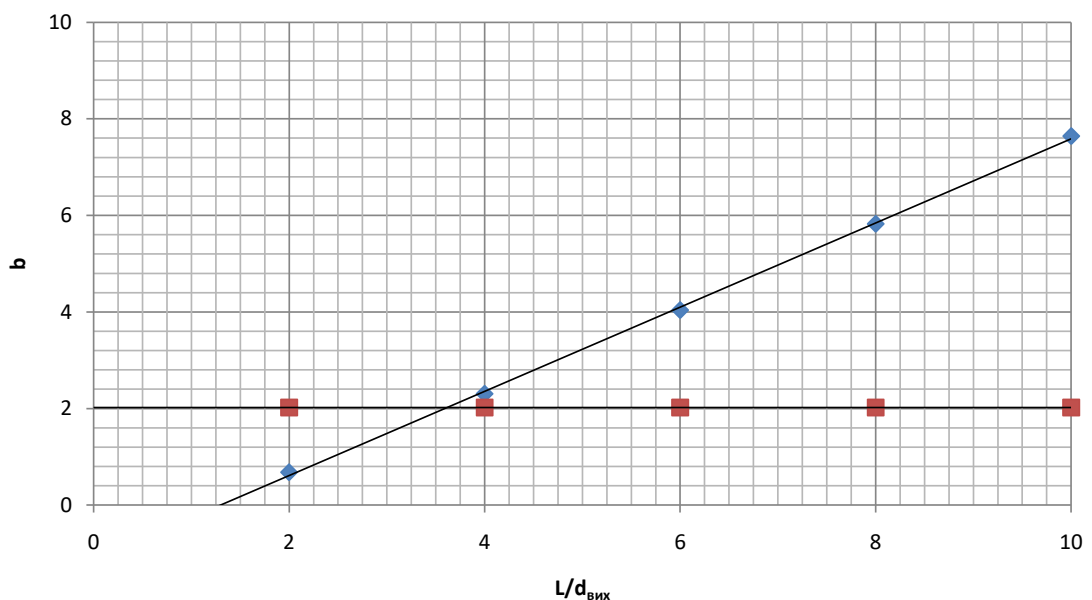
$$\bar{L} = 2 \quad \bar{L} - a \cdot \bar{L}^{13/36} = 2 - 1.0381 \cdot 2^{13/36} = 0.6801$$

$$\bar{L} = 4 \quad \bar{L} - a \cdot \bar{L}^{13/36} = 4 - 1.0381 \cdot 4^{13/36} = 2.3047$$

$$\bar{L} = 6 \quad \bar{L} - a \cdot \bar{L}^{13/36} = 6 - 1.0381 \cdot 6^{13/36} = 4.0374$$

$$\bar{L} = 8 \quad \bar{L} - a \cdot \bar{L}^{13/36} = 8 - 1.0381 \cdot 8^{13/36} = 5.8225$$

$$\bar{L} = 10 \quad \bar{L} - a \cdot \bar{L}^{13/36} = 10 - 1.0381 \cdot 10^{13/36} = 7.6398$$



З графіку отримуємо $\bar{L} = 2.6$. Оскільки фактичне значення $\bar{L} = 62.6854 > 2.6$, то взаємодія газового струменю з рідким металом відбувається у 2 або 3 режимах.

Межа між другим та третім режимами взаємодії обчислюється за рівнянням

$$L \geq \pi \cdot D_a \quad (3)$$

де D_a – еквівалентний діаметр зони взаємодії, що знаходиться з виразу

$$D_a = \left(\frac{6 \cdot i}{\pi \cdot k_m \cdot \rho_M \cdot g} \right)^{1/3}$$

де i – імпульс струменю газу; k_m – коефіцієнт приєднаної маси ($k_m = 0,5$).

Витрати газу 1 крізь сопло дорівнюють

$$q_1 = \frac{35}{M_1} \cdot f_{кр} \cdot P_1^{поч} = \frac{35}{32} \cdot 0,7854 \cdot 13 = 11,1674 \text{ м}^3/\text{хв.},$$

де $f_{кр}$ – площа критичного перерізу сопла $f_{кр} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,7854 \text{ см}^2$,

Масові витрати газу 1 становлять

$$G_1 = \frac{q_1 \cdot \rho_1^{вих}}{60} = \frac{11,1674 \cdot 2,8678}{60} = 0,5338 \text{ кг/с.}$$

Імпульс струменю розраховується з рівняння

$$i = G_1 \cdot W_{вих} + (P_{вих} - 1) \cdot 9,81 \cdot f_{вих} \cdot 10 = 0,5338 \cdot 517,2237 + (13 - 1) \cdot 9,81 \cdot 1,7618 \cdot 10 = 2350,0784 \text{ Н}$$

де $f_{вих}$ – площа вихідного перерізу сопла $f_{вих} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,4977^2}{4} = 1,7618 \text{ см}^2$.

$$D_a = \left(\frac{6 \cdot i}{\pi \cdot k_m \cdot \rho_M \cdot g} \right)^{1/3} = \left(\frac{6 \cdot 2350,07}{3,1416 \cdot 0,5 \cdot 7000 \cdot 9,81} \right)^{1/3} = 0,5075$$

$$\pi \cdot D_a = 3,1416 \cdot 0,5075 = 1,5944$$

Оскільки фактичне значення $\bar{L} = 62.6854 > 1.5944$, то взаємодія газового струменю з рідким металом відбувається у 3 режимі.

Вихідні дані

№ п/п	$t_1, ^\circ\text{C}$	$d_{\text{кр}}, \text{см}$	$p_1^{\text{нов}}, \text{атм}$	$d, \text{раг}$	$h, \text{см}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
1.	20	5	15	0	100	1350
2.	15	4	14	5	100	1400
3.	10	3	13	8	90	1450
4.	5	2	12	12	50	1500
5.	10	1	11	15	30	1550
6.	15	2	10	18	60	1600
7.	20	3	9	20	75	1650
8.	15	4	8	18	120	1600
9.	10	5	7	15	110	1550
10.	5	4	6	12	150	1500
11.	0	3	7	8	100	1450
12.	5	2	8	5	70	1400
13.	10	1	9	0	20	1350
14.	15	2	10	5	55	1400
15.	20	3	11	8	60	1450
16.	15	4	12	12	110	1500
17.	10	5	13	15	250	1550
18.	5	4	14	18	115	1600
19.	0	3	15	20	66	1650
20.	5	2	14	18	52	1600
21.	10	1	13	15	35	1550
22.	15	2	12	12	53	1500
23.	20	3	11	8	72	1450
24.	15	4	10	5	125	1400
25.	10	5	9	0	180	1550
26.	5	4	8	5	200	1300
27.	0	3	7	8	105	1350
28.	5	2	6	12	58	1400
29.	10	1	7	15	40	1450
30.	15	3	8	18	48	1500

Практична робота №4

Розрахунок барботажної системи

Мета роботи: розрахунок барботажних систем продувки та оцінка їх впливу на якість перемішування металеві ванни.

Завдання роботи: визначити основні параметри барботажного процесу, розрахувати кількість і розміри газових бульбашок, оцінити інтенсивність перемішування та тепломасообміну у ванні.

Розрахунок

Приклад: $I = 0,6 \text{ м}^3/\text{год}$; $H_b = 2,4 \text{ м}$, $D_b = 1,9 \text{ м}$; $i = 3 \%$.

Якщо сопло для витоку газу занурено до металеві ванни, що має форму циліндра, то при барботажі утворюються газові об'єми (бульби), що мають розміри

$$D_b = K_D \cdot q^{2/5} \cdot g^{-1/5},$$

де q – витрати газу через сопло, K_D – постійна, що дорівнює 1,19; 1,38; 1,59 при підводі газу знизу, збоку або зверху відносно ванни. $I = 0,6 \text{ м}^3/\text{год} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$.

$$D_b^{\text{знизу}} = K_D \cdot q^{2/5} \cdot g^{-1/5} = 1.19 \cdot 0.01^{2/5} \cdot 9.81^{-1/5} = 0.1195 \text{ м}$$

$$D_b^{\text{збоку}} = K_D \cdot q^{2/5} \cdot g^{-1/5} = 1.38 \cdot 0.01^{2/5} \cdot 9.81^{-1/5} = 0.1385 \text{ м}$$

$$D_b^{\text{зверху}} = K_D \cdot q^{2/5} \cdot g^{-1/5} = 1.59 \cdot 0.01^{2/5} \cdot 9.81^{-1/5} = 0.1596 \text{ м}$$

Спливаючи на поверхню, бульби створюють зону барботажу, поперековий розмір якої D_h можна розрахувати з виразу

$$\frac{D_h}{D_b} = 1 + \left(\frac{\pi \cdot C_D}{8} \right) \cdot \left(\frac{h}{D_b} - \frac{1}{2} \right)$$

де C_D – постійна ($C_D \approx 1,12$); h – глибина занурення сопла, обирається виходячи з заданої глибини ванни.

$$h_{\text{знизу}} = H_B = 2.4 \text{ м}$$

$$h_{\text{збоку}} = 0.75 \cdot H_B = 0.75 \cdot 2.4 = 1.8 \text{ м}$$

$$h_{\text{зверху}} = 0.5 \cdot H_B = 0.5 \cdot 2.4 = 1.2 \text{ м}$$

$$D_h^{\text{знизу}} = D_6 \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot C_D}{8} \right) \cdot \left(\frac{h}{D_6} - \frac{1}{2} \right) \right] = 0.1195 \cdot \left[1 + \left(\frac{3.1416 \cdot 1.12}{8} \right) \cdot \left(\frac{2.4}{0.1195} - \frac{1}{2} \right) \right] = 1.1488 \text{ м}$$

$$D_h^{\text{збоку}} = D_6 \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot C_D}{8} \right) \cdot \left(\frac{h}{D_6} - \frac{1}{2} \right) \right] = 0.1385 \cdot \left[1 + \left(\frac{3.1416 \cdot 1.12}{8} \right) \cdot \left(\frac{1.8}{0.1385} - \frac{1}{2} \right) \right] = 0.8997 \text{ м}$$

$$D_h^{\text{зверху}} = D_6 \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot C_D}{8} \right) \cdot \left(\frac{h}{D_6} - \frac{1}{2} \right) \right] = 0.1596 \cdot \left[1 + \left(\frac{3.1416 \cdot 1.12}{8} \right) \cdot \left(\frac{1.2}{0.1596} - \frac{1}{2} \right) \right] = 0.6523 \text{ м}$$

Барботаж газу при підводі знизу викликає рух металу, середня швидкість якого у площі перерізу зони барботажу визначається за рівняннями відповідно для підводу газу через одне сопло

$$\bar{W}_M = \left(\frac{2^3}{\pi \cdot C_D^{2/3}} \right) \cdot \left(\frac{q \cdot g}{h} \right)^{1/3} = \left(\frac{8}{3.1416 \cdot 1.12^{2/3}} \right) \cdot \left(\frac{0.01 \cdot 9.81}{2.4} \right)^{1/3} = 0.8134 \text{ м/с}$$

Через кілька сопел (обираю 6), що розташовані у лінію довжиною $l = 1,8$ м, діаметру ванни у завданні

$$\bar{W}_M = \left(\frac{2^4}{\pi \cdot C_D} \right)^{1/3} \cdot (i_1 \cdot g)^{1/3} = \left(\frac{16}{3.1416 \cdot 1.12} \right) \cdot (0.0056 \cdot 9.81)^{1/3} = 0,6281 \text{ м/с}$$

$$\text{де } q = \frac{I}{n_c} = \frac{0.01}{6} = 0.0017 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$i_1 = \frac{n_c \cdot q}{1} = \frac{6 \cdot 0.0017}{1.8} = 0.0056 \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{м}$$

Через кілька сопел (обираю 9), що розташовані на площі $F=2,2698 \text{ м}^2$, яка обирається виходячи з розмірів ванни

$$\bar{W}_M = (2)^{1/3} \cdot (\bar{W} \cdot g \cdot h)^{1/3} = (2)^{1/3} \cdot (0.0397 \cdot 9.81 \cdot 2.4)^{1/3} = 1.2314 \text{ м/с}$$

$$\text{де } \bar{W} = \frac{n_c \cdot q}{F} = \frac{9 \cdot 0.01}{2.2698} = 0.0397 \text{ м/с}$$

Витрати металу через барботажную зону $I_M = \bar{W}_M \cdot \frac{\pi \cdot D_h^2}{4}$, які становлять для підводу газу через 1 сопло

$$I_M = \pi^2 \cdot C_D^{4/3} \cdot k_D^{5/3} \cdot \left(\frac{h}{D_6}\right)^{5/3} \cdot \frac{q}{32} = 3.1416^2 \cdot 1.12^{4/3} \cdot 1.19^{5/3} \cdot \left(\frac{2.4}{0.1195}\right)^{5/3} \cdot \frac{0.01}{32} = 0.7118 \text{ м}^3/\text{с}$$

Через кілька сопел розташованих у лінію довжиною l

$$I_M = \left(\frac{\pi^2 \cdot C_D^2}{32}\right)^{2/3} \cdot n_c \cdot q \cdot \left(\frac{h^3 \cdot g}{i_1^2}\right)^{1/3} = \left(\frac{3.1416^2 \cdot 1.12^2}{32}\right)^{2/3} \cdot 6 \cdot 0.0017 \cdot \left(\frac{2.4^3 \cdot 9.81}{0.0056^2}\right)^{1/3} = 0.8696 \text{ м}^3/\text{с}$$

Через кілька сопел, що розташовані на площі F ,

$$I_M = (2)^{1/3} \cdot n_c \cdot q \cdot \left(\frac{g \cdot h}{\bar{W}^2}\right)^{1/3} = (2)^{1/3} \cdot 9 \cdot 0.0011 \cdot \left(\frac{9.81 \cdot 2.4}{0.0044^2}\right)^{1/3} = 1.3437 \text{ м}^3/\text{с}$$

Підведення газу зверху або збоку здійснюється через одне сопло. Якщо об'єм металу у ванні V_m , який треба розрахувати, то подовженість одного циклу перемішування металу становить

- одне сопло знизу: $\tau_c = \frac{V_m}{I_m} = \frac{6.8047}{0.7118} = 9.56 \text{ с}$

- кілька сопел розташованих у лінію:

$$\tau_c = \frac{V_m}{I_m} = \frac{6.8047}{0.8696} = 7.8247 \text{ с}$$

- кілька сопел розташованих на площі F:

$$\tau_c = \frac{V_m}{I_m} = \frac{6.8047}{1.3437} = 5.0642 \text{ с}$$

$$\text{де } V_m = \frac{\pi \cdot D_B^2}{4} \cdot H_B = \frac{3.1416 \cdot 1.9^2}{4} \cdot 2.4 = 6.8047 \text{ м}^3$$

Якщо відносна нерівномірність хімічного складу металу з даного елемента не повинна перевищувати i відсотків, то подовженість переміщення повинна становити

$$\tau_m = \tau_c \cdot \ln\left(\frac{100}{i}\right)$$

- одне сопло знизу: $\tau_m = 9.56 \cdot \ln\left(\frac{100}{3}\right) = 33.5228 \text{ с}$

- кілька сопел розташованих у лінію:

$$\tau_m = 7.8247 \cdot \ln\left(\frac{100}{3}\right) = 27.4378 \text{ с}$$

- кілька сопел розташованих на площі F:

$$\tau_m = 5.0642 \cdot \ln\left(\frac{100}{3}\right) = 17.7580 \text{ с}$$

Проведені розрахунки свідчать, що для усереднення ванни металу за хімічним складом найбільш ефективною є донна продувка, оскільки при ній створюється зона барботажу більша за продувку збоку чи зверху. Найраціональніше здійснювати продувку через декілька сопел розташованих на деякій площі, оскільки такий спосіб забезпечує найшвидше усереднення ванни за хімічним складом.

Вихідні дані

№ п/п	$J, \text{м}^3/\text{год}$	$H, \text{м}$	$D, \text{м}$	$i, \text{вигн.} \% \text{ с}$
1.	0,2	1,0	0,8	1
2.	0,4	1,3	1,1	2
3.	0,6	1,6	1,3	3
4.	0,8	1,9	1,5	4
5.	1,0	2,2	1,8	5
6.	1,2	2,5	2,0	4
7.	1,4	2,8	2,2	3
8.	1,6	3,1	2,5	2
9.	1,8	3,4	2,7	1
10.	2,0	3,7	3,0	2
11.	1,8	3,7	3,0	3
12.	1,6	3,7	3,0	4
13.	1,4	3,7	3,0	5
14.	1,2	3,7	3,0	6
15.	1,0	3,7	3,0	5
16.	0,8	3,7	3,0	4
17.	0,6	3,0	2,4	3
18.	0,4	2,5	2,0	2
19.	0,2	2,0	1,8	1
20.	0,4	2,2	1,8	2
21.	0,6	2,4	1,9	3
22.	0,8	2,6	2,1	4
23.	1,0	2,8	2,2	5
24.	1,2	3,0	2,4	6
25.	1,4	3,2	2,6	5
26.	1,6	3,4	2,7	4
27.	1,8	3,6	2,9	3
28.	2,0	3,8	3,0	2
29.	1,8	4,0	3,2	1
30.	1,6	4,2	3,4	2

Практична робота №5

Складання масиву даних та його обробка за обраною моделлю.

Мета роботи: опанувати навички аналізу статистичних даних за допомогою описової статистики, розв'язання оптимізаційних задач і проведення регресійного аналізу даних у пакеті MS Excel.

Завдання роботи: за допомогою MS Excel та надбудови Аналіз даних провести аналіз вибірки та регресійний аналіз даних.

1. Знайомство з надбудовою Аналіз даних MS Excel.

Для проведення комплексного статистичного або інженерного аналізу даних використовують надбудову Аналіз даних, що містить розширений перелік аналітичних макрофункції. Деякі інструменти надбудови дозволяють представити результати аналізу в графічному вигляді.

Щоб виконати статистичний аналіз даних за допомогою цієї надбудови, необхідно перейти на вкладку Дані, в меню групи Аналіз обрати кнопку Аналіз даних.

Якщо надбудова Аналіз даних відсутня, її можна встановити (підключити) за допомогою команд Файл / Параметри / Надбудови / Пакет аналізу VBA (Analysis ToolPak VBA).

З метою опанування навичок аналізу статистичних даних за допомогою описової статистики та проведення регресійного аналізу даних у пакеті MS Excel.

MS Excel має інструмент, за допомогою якого здійснюється оброблення даних з цілого ряду основних статистичних показників. Це Описова статистика (Descriptive Statistics). З його допомогою можна швидко обробити масиви даних та отримати інформацію щодо значимості основних статистичних критеріїв.

Під описовою статистикою розуміють систематизацію емпіричних даних з цілого ряду основних статистичних критеріїв. Причому на основі отриманого результату з цих підсумкових показників можна сформулювати загальні висновки про досліджуваний масив даних.

Інструмент Описова статистика пропонує таблицю основних статистичних характеристик для однієї або декількох множин вихідних

значень. Вихідний інтервал цього інструменту містить такі статистичні характеристики: середнє значення, стандартна помилка, медіана, мода, стандартне відхилення, дисперсія, коефіцієнт ексцесу, коефіцієнт асиметрії, інтервал (розмах), мінімальне та максимальне значення, сума, кількість значень, k-е найбільше і найменше значення (для будь-якого заданого значення k) та рівень значущості для середнього.

Встановіть прапорець Підсумкова статистика, якщо потрібен повний список характеристик, в іншому випадку виберіть конкретні характеристики, які мають бути присутніми у вихідній таблиці. Більшість з отриманих характеристик також можна отримати за допомогою вбудованих статистичних формул MS Excel.

Асиметричність (міра відхилення розподілу частоти від симетричного розподілу). Якщо спостереження підкоряються нормальному розподілу, то асиметрія дорівнює нулю. Для перевірки на нормальний розподіл можна застосовувати таке правило: якщо асиметрія значно відрізняється від нуля, то гіпотезу про те, що дані взяті з нормально розподіленої генеральної сукупності, слід відкинути. Якщо коефіцієнт асиметрії більше нуля, то розподіл ймовірностей є асиметричним і має правобічний нахил. Якщо коефіцієнт асиметрії менше нуля, асиметрія від'ємна, ряд розподілу на графіку буде мати лівобічний нахил.

Інтервал - це розмах варіації у вибірці.

Мінімум - це мінімальне значення ознаки у вибірці.

Максимум - це максимальне значення ознаки у вибірці.

Стандартне відхилення - це міра розкиду вимірних величин. Воно дорівнює квадратному кореню з дисперсії.

Дисперсія вибірки - це квадрат стандартного відхилення. Ця характеристика також є мірою розкиду вимірних величин.

Сума - це сумарне значення елементів вибірки.

нормального розподілу: якщо ексцес додатній, то крива теоретичного має вищу та "гострішу" вершину ніж крива нормального; якщо ексцес від'ємний, то крива теоретичного має нижчу та "плоскішу" вершину, ніж крива нормального.

Середнє значення (арифметичне середнє значень, що аналізуються) визначається як сума значень, поділена на їхню кількість.

Стандартна помилка визначається як стандартне відхилення, поділене на квадратний корінь з обсягу вибірки.

Медіана - це значення ознаки в статистичній одиниці, що стоїть у середині ранжованого ряду та ділить сукупність на дві рівні за чисельністю частини.

Мода - це значення, що найчастіше зустрічається в сукупності.

Рахунок - це обсяг вибірки.

Рівень надійності (95,4 %) - це гранична помилка вибірки, оцінена з заданим рівнем надійності.

Проаналізувавши отримані результати, користувач має загальне уявлення щодо статистичних характеристик досліджуваних показників, закономірності розподілу, тобто може оцінити ступінь однорідності сукупності, що є передумовою використання інших статистичних методів.

2. Регресійний аналіз у MS Excel.

Проведемо регресійний аналіз, тобто застосуємо метод визначення відокремленого і спільного впливу факторів на результативну ознаку та кількісної оцінки цього впливу шляхом використання відповідних критеріїв. Регресійний аналіз проводиться на основі побудованого рівняння регресії та визначає внесок кожної незалежної змінної у варіацію досліджуваної (прогнозованої) залежної змінної величини.

Основним завданням регресійного аналізу є визначення впливу факторів на результативний показник (в абсолютних показниках). Передусім для цього необхідно підібрати та обґрунтувати рівняння зв'язку, що відповідає характеру аналітичної стохастичної залежності між досліджуваними ознаками. Рівняння регресії показує, як в середньому змінюється результативна ознака (Y) під впливом зміни факторних ознак (Xi).

У загальному вигляді рівняння регресії можна подати так:

$$Y_x = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

де Y_x - залежна змінна величина;

x - незалежні змінні величини (фактори).

Залежно від кількості змінних величин розрізняють два види регресійного аналізу (однофакторний та багатофакторний). У нашому випадку досліджується вплив декількох незалежних (екзогенних) змінних X на одну

залежну (ендогенну) змінну Y . Отже, виконаємо багатофакторний регресійний аналіз в MS Excel. Для цього викликаємо надбудову Аналіз даних, обираємо режим (функцію) Регресія та задаємо основні параметри регресії.

У діалоговому вікні режиму Регресія задаються такі параметри:

1. Вхідний інтервал Y - вводяться посилання на клітинки, що містять дані за результативною ознакою. Діапазон має складатися з одного стовпця.

2. Вхідний інтервал X - вводиться посилання на клітинки, що містять факторні ознаки. Максимальна кількість вхідних діапазонів (стовпців) дорівнює 16.

3. Мітки - команда активізується, якщо перший рядок (стовпець) у вхідному діапазоні містить заголовки. Якщо заголовки відсутні, необхідно її деактивізувати. В цьому випадку будуть автоматично створені стандартні назви для даних вихідного діапазону.

4. Рівень надійності - активізується, якщо в полі, яке розташовано нав-проти, необхідно ввести рівень надійності відмінний від рівня 95 %. Встановлений рівень надійності використовується для перевірки значущості коефіцієнта детермінації R^2 і коефіцієнтів регресії a^i

5. Константа-нуль - активізується, якщо потрібно, щоб лінія регресії йшла через початок координат.

6. Вихідний інтервал / Новий робочий лист / Нова робоча книга.

У полі Вихідний інтервал активізується поле, в яке необхідно ввести посилання на ліву верхню клітинку вихідного діапазону. Розмір вихідного діапазону буде визначений автоматично, й на екрані з'явиться повідомлення у випадку можливого накладення вихідного діапазону на вхідні дані.

У полі Новий робочий лист відкривається новий лист, на якому починаючи з клітинки A1, демонструються результати аналізу.

У полі Нова робоча книга відкривається нова книга, на першому листі якої, починаючи з клітинки A1, вставляються результати аналізу.

7. Залишки - активізується, якщо потрібно включити в вихідний діапазон стовпець із залишками.

8. Стандартизовані залишки - активізується, якщо потрібно включити в вихідний діапазон стовпець із стандартизованими залишками.

9. Графік залишків - активізується, якщо потрібно вивести на робочий лист графіки залежності залишків від факторних ознак (x_i).

10. Графік підбору - активізується, якщо потрібно вивести на робочий лист графіки залежності теоретичних результативних значень (y) від факторних ознак (x_i).

11. Графік нормальної ймовірності - активізується, якщо потрібно вивести на робочий лист графік залежності значень, що спостерігаються (y) від інтервалів персентилей, які автоматично формуються.

Розраховані показники, отримані в режимі Регресія :

Отримані результати з регресійної статистики відповідають таким статистичним показникам:

множинний R - коефіцієнт кореляції);

R -квадрат - коефіцієнт детермінації);

стандартна помилка - залишкове стандартне відхилення;

спостереження - кількість спостережень (n).

Результати дисперсійного аналізу використовуються для перевірки значущості коефіцієнта детермінації R^2 . Стовпці мають таку інтерпретацію:

стовпець df - кількість ступенів свободи. Для рядка Регресія кількість ступенів свободи визначається кількістю факторних ознак t у рівнянні регресії $k\Phi = t$. Для рядка Залишки кількість ступенів свободи визначається кількістю спостережень i і кількістю змінних u у рівнянні регресії. Для рядка Разом кількість ступенів свободи визначається сумою $k_u = k\Phi + k_0$;

стовпець SS - сума квадратів відхилень. Для рядка Регресія - це сума квадратів відхилень теоретичних даних від середнього: $SS_{\Phi} = \sum (y_i - \bar{y})^2$. Для рядка Залишки - це сума квадратів відхилень емпіричних даних від теоретичних: $SS^2 = \sum (y_i - \hat{y})^2$;

Для рядка Регресія - це факторна дисперсія a^2 . Для рядка Залишки – це залишкова дисперсія a^2 ;

стовпець F - розраховане значення F -критерію Фішера

MB (Регресія) , p MB (Залишки) ’

стовпець F - значення рівня значущості, відповідає розрахованому значенню F_p .

Отримані результати аналізу містять значення коефіцієнтів регресії a_i та їхні статистичні оцінки.

Інтерпретація стовпців:

1. Коефіцієнти - значення коефіцієнтів a_i .

2. Стандартна похибка - стандартні похибки коефіцієнтів a_i .
3. Розраховані значення критерію:
4. Р-значення - значення рівнів значущості, відповідні розрахованим значенням t_p .

5. Нижні 95 % і верхні 95 % - відповідно нижні та верхні межі довірчих інтервалів для коефіцієнтів регресії a_i . Для знаходження меж довірчих інтервалів

Нижні 95 % = Коефіцієнт - Стандартна похибка;

Верхні 95 % = Коефіцієнт + Стандартна похибка.

Звіт розрахованих залишків містить генеровані теоретичні значення у результативної ознаки у й значення залишків. Остання розраховується як різниця між емпіричним у та теоретичним у значеннями результативної ознаки у.

Для прикладу рівняння регресії буде мати вигляд:

$$y = 3p + ax + a_2x_2.$$

Завдання:

1. Використовуючи надані (статистичні дані за обраною тематикою) та аналітичні інструменти MS Excel, необхідно:

1.1. Розрахувати основні описові статистики для показників, що досліджуються. Оцінити ступінь однорідності сукупності та зробити висновок щодо закономірності розподілу досліджуваної сукупності.

1.2. Побудувати багатофакторну регресійну модель.

Практична робота №6

Оптимізація киснево-конвертерного процесу

Мета роботи: проведення оптимізації киснево-конвертерного процесу, порівняння верхньої та комбінованої продувок, а також їх техніко-економічних показників на основі виробничих даних.

Зміст роботи включає: характеристику об'єкта оптимізації, факторизацію об'єкта, перевірку статистичної достовірності, проведення пасивного експерименту з використанням практичних даних, аналіз результатів, перевірку та впровадження отриманих результатів.

1. Вступ

Киснево-конвертерний процес є найбільш продуктивним методом виробництва сталі. Існують різні варіанти киснево-конвертерного процесу. Найбільш поширені – технології продувки конвертерної ванни зверху і комбінованої – зверху і знизу. Кожен з цих способів продувки має свою специфіку протікання фізико-хімічних процесів, що впливає на техніко-економічні показники процесу.

У ході технологічної гри передбачається на виробничих даних вивчити методику проведення роботи з оптимізації технологічних процесів, порівняти верхню та комбіновану продувки в кисневому конвертері та їх техніко-економічні показники.

2. Вихідні дані

Розглядається киснево-конвертерний процес, що здійснювався у 250 т конвертерах Дніпровського металургійного комбінату.

Продувка зверху здійснюється киснем через водоохолоджуючу фурму, що вводиться через горловину конвертера, а комбінована – через цю ж фурму і кілька фурм, встановлених у днищі конвертера, з подачею кисню по центральній трубі та природного газу через щілинну шпарину.

По кожному із способів продувки складений масив даних, що включає 100 плавок. У масивах представлені такі параметри:

- кількість сопел у верхній фурмі n_v та кількість донних фурм n_d ;
- вміст у чавуні кремнію $Si_{ч}$, марганцю $Mn_{ч}$, сірки S та фосфору P , %, температура чавуну $t_{ч}$;
- маси чавуну $M_{ч}$, брукхту M_b , вапна $M_{вап}$, плавикового шпату $M_{шп}$, витрачених на плавку, т;
- Інтенсивність верхньої продувки J_{O_2} , м/хв, об'єм продутого таким чином кисню V_O , м.
- Висота фурми над рівнем спокійної ванни в початковий $h_{ф}$ і номінальний $h_{ф}$, під час продування, м;
- Інтенсивність подачі кисню знизу J_{O_2} , м/хв і обсяг продутого таким чином кисню V_O , м³; інтенсивність подачі знизу природного газу $J_{пр}$, м³/хв;
- Тривалість продування $\tau_{прод}$, хв;

- вміст у металі на першій повалці вуглецю C_1 , марганцю сірки S_1 та фосфору P_1 , %; температура металу t_1 , °C;
- вміст у шлаку на повалці оксидів кальцію CaO , кремнію SiO_2 , заліза FeO , магнію MgO , %; основність шлаку $B = CaO/SiO_2$;
- маса присаджених у ківш на випуску феромарганцю M_{FeMn} , силікомарганцю M_{SiMn} , феросиліцію M_{FeSi} ;
- вміст готової сталі вуглецю $C_{ст}$, марганцю $Mn_{ст}$, кремнію $Si_{ст}$, сірки $S_{ст}$, фосфору $P_{ст}$, %;
- Маса готової сталі $M_{ст}$, т.

3. *Вирішення завдання з оптимізації киснево-конвертерного процесу.*

Група студентів ділиться на дві підгрупи, які досліджують відповідно верхню та комбіновану продувку.

Як цільові функції, критеріїв оптимізації, використовуються $M_ч$, $M_б$, $M_{вап}$, $M_{шп}$, $\tau_{прод}$ (час прод.), S , P , FeO , B , MgO , $M_{ст}$, $(V_{O_2}^{верх} + V_{O_2}^{дон})$, J_{O_2} (верх), $J_{пр}$ (дон), t_1 і похідні цих параметрів, наприклад, вихід придатної сталі, засвоєння елементів розкислювачів і т.д. Для порівняльного аналізу в кожній підгрупі має бути по одному студенту, який вивчає той самий параметр для відповідних способів продувки.

3.1 *Характеристика об'єкта оптимізації*

Дати характеристику даного способу продувки та даного параметра, для останнього визначити свої очікування (максимізація, мінімізація) його величини. Перевірити відповідність цільової функції вимогам, що висуваються до неї:

- це має бути лише одна величина;
- вона повинна мати одиниці виміру;
- мати ступеня свободи, тобто може змінюватися при керуючих впливах;
- бути статистично достовірною величиною.

3.2 *Факторизація об'єкта оптимізації*

Необхідно проаналізувати відомості про цільову функцію та вплив факторів, що впливають на неї. Серед останніх є такі, які, як відомо, у певному діапазоні значень збільшують / зменшують / величину цільової функції, а в іншому діапазоні – навпаки: зменшують / збільшують / її з досягненням деякої

екстремальної величини цільової функції потрібного, з погляду оптимізації, характеру екстремуму. Саме такі фактори необхідно розглядати насамперед.

Якщо відомості про такі фактори невідомі, необхідно послідовно обміркувати можливість такої залежності цільової функції від кожного з параметрів масиву даних. Слід пам'ятати, що фактор при цьому відіграє роль причини, а цільова функція – наслідку, і про те, як співвідносяться у часі причина та наслідок.

Збільшення кількості аналізованих факторів збільшує ймовірність виявлення такого, що забезпечить оптимізацію цільової функції, але водночас ускладнює аналіз.

Факторизація об'єкта може здійснюватися шляхом спільної роботи представників обох альтернативних варіантів.

3.3 Перевірка статистичної достовірності.

Після отримання завдання на гру кожен студент виписує з масиву даних свого варіанту продукції значення своєї цільової функції і тих факторів, які він обрав в процесі факторизації об'єкта і які, на його думку, здатні – оптимізувати величину цільової функції.

Необхідно визначити діапазон величин цільової функції, розбити цей діапазон на рівні за величиною інтервали так, щоб кількість випадків у крайніх інтервалах була не менше 2-3% (зазвичай 5-7), розрахувати частку випадків у кожному інтервалі у відсотках і по вісі абсцис – відмітки відповідних інтервалів, по вісі ординат – відсоток випадків.

У випадку, якщо отримана крива подібна за формою до кривої Гаусса, то можна вважати цільову функцію статистично достовірною величиною. Іноді на кривій спостерігається не один, а два максимуми. Це означає, що на практиці спостерігається два принципово різних випадки формування величини цільової функції. У зв'язку з цим необхідно розділити масив даних на два масиви, в межах яких цільова функція є статистично достовірною величиною. Надалі необхідно вирішувати задачу на оптимізацію цільової функції в межах кожного з нових масивів окремо. Необхідно ще раз провести факторизацію об'єкта, обміркувавши вплив обраних факторів на цільову функцію в межах кожного з нових масивів з урахуванням дії того фактора, який викликав необхідність поділу початкового масиву на два нових.

3.4 Проведення експерименту

У даній технологічній грі застосовується пасивний експеримент, оскільки використовуються дані практики без втручання у виробничий процес.

Виписані значення цільової функції та факторів аналізуються графічним та розрахунковим шляхом. Необхідно побудувати залежності цільової функції від кожного з обраних факторів. Значення фактора відкладається по вісі абсцис, а цільової функції – по вісі ординат. На кожній з осей необхідно проставити позначки значень через рівні інтервали. Для кожної пари значень цільова функція – фактор на графік наноситься точка. Після нанесення всіх точок проводиться усереднення величин цільової функції в межах кожного інтервалу. При попаданні точки на межу інтервалів вона зараховується до групи точок, що передують межі інтервалу. Необхідно проставити усереднені точки в середині інтервалу, вказавши біля них кількість усереднених значень.

При аналізі отриманої залежності необхідно звернути увагу на ті екстремуми, які відповідають очікуванням для цільової функції, визначивши, наскільки виражений екстремум, його достовірність. У тому випадку, якщо кількість усереднених значень невелика, достовірність точки – незначна, відповідна частина лінії, що з'єднує усереднені значення, наноситься пунктиром і вважається проблематичною. У процесі аналізу необхідно пояснити причини екстремальності залежності функції від аргументу.

Необхідно розрахувати середнє значення цільової функції і факторів в межах досліджуваного масиву даних. Ці величини, а також оптимальні значення цільової функції і факторів, що оптимізують її, є головними характеристиками відповідного технологічного варіанту.

Зіставлення цих величин обох технологічних варіантів є підставою для визначення кращого з них за даною цільовою функцією.

Узагальнення даних за всіма функціями дозволить визначити кращий з двох технологічних варіантів: верхньої та комбінованої продувки.

3.5 Перевірка результатів

Кожен учасник гри повинен представити та описати, яким чином і як довго буде здійснюватися перевірка результатів експериментів.

3.6 Впровадження результатів

Також необхідно представити та описати впровадження результатів за своєю цільовою функцією.

4. Організація технологічної гри

Викладач, який проводить заняття, визначає підгрупи, що аналізують технологічні варіанти, цільові функції для кожного з учасників гри, та призначає з числа студентів керівників кожного колективу.

Учасники гри вирішують завдання на оптимізацію і готують звіт, зміст якого є послідовним викладом процесу розв'язання відповідно до пункту 3. Керівники підгруп викладають у своїх звітах результати порівняльного аналізу за всіма цільовими функціями і роблять загальний висновок щодо перспективності в цілому свого і альтернативного варіанту.

Колективне обговорення результатів проводиться наступним чином. На дошці в табличному вигляді по кожній цільовій функції для обох варіантів вписуються середнє і оптимальне значення цільової функції, а також символ фактора, що забезпечує оптимізацію.

За кожною цільовою функцією учасники гри демонструють аудиторії частотну характеристику, що підтверджує статистичну достовірність цільової функції і залежність цільової функції від аргументу, що забезпечує її оптимізацію, пояснює причини залежності, порівнює свої дані з даними альтернативного варіанту і робить висновки про те, який з них кращий.

Після обговорення кожної цільової функції керівники підгруп доповідають результати порівняльного аналізу технологічних варіантів та свої висновки.

Викладач оцінює роботу кожного учасника гри за вмінням вирішувати завдання на оптимізацію, викладати свої результати в доповіді та звіті.

Навчально-методичне видання

Стоянов Олександр Миколайович,
Синегін Євген Володимирович,
Рубан Володимир Олександрович,
Журавльова Світлана Валеріївна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Навчально-методичні рекомендації
до лабораторних і практичних занять

Електронне видання

Експертний висновок склав канд. техн. наук, доц. Валерій МАМЕШИН

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 68 від 03.10.2025)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка В. О. Рубан

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 3,18. Обл.-вид. арк. 3,23.
Зам. № 108.

Видавець: Український державний університет науки і технологій.
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010