


ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛУРГІЇ:

**методичні рекомендації
до виконання практичних та індивідуальних завдань**

Запоріжжя 2026



УДК 669.02(072)
Т30

Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 7 від 04.06.2026 р.)

Укладач:

Малій О.Г. викладач циклової комісії з автоматизації металургійного виробництва та механічного обладнання

Т30 Теоретичні основи процесів металургії : методичні рекомендації до виконання практичних та індивідуальних завдань / уклад. О. Г. Малій. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 47 с.

Методичні рекомендації містять теоретичні відомості, практичні та індивідуальні завдання з дисципліни «Теоретичні основи процесів металургії». У розробці розглянуто основи поверхневих явищ у металургійних системах, процеси горіння газоподібного палива, термодинаміку хімічних реакцій, визначення константи рівноваги, а також закономірності шлакового рафінування металу. Наведено методики розрахунків, приклади розв'язання задач, вихідні дані для індивідуальних варіантів та рекомендовану літературу. Методичні рекомендації призначені для здобувачів фахової передвищої освіти спеціальності G10 «Металургія».

УДК 669.02(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТИНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026



ЗМІСТ

ВСТУП	4
ПРАКТИЧНА РОБОТА №1 ВСТАНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ЗАЛІЗА	5
ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 ВСТАНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ШЛАКУ	10
ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГОРІННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	15
ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 РОЗРАХУНОК КОНСТАНТИ РІВНОВАГИ ТА АНАЛІЗ САМОДОВІЛЬНОСТІ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ ЗА ЕНЕРГІЄЮ ГІББСА	21
ПРАКТИЧНА РОБОТА №5 РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДАЛЕННЯ ДОМІШОК У ШЛАКОВУ ФАЗУ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПРОЦЕСАХ	24
ПРАКТИЧНА РОБОТА №6 РОЗРАХУНОК УМОВ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ ЗАЛІЗА В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ	30
ПРАКТИЧНА РОБОТА №7 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОТВОРНОЇ ЗДАТНОСТІ СУМІШІ ГАЗІВ	33
МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ	37
Додаток А Приклад оформлення титульного листа індивідуального завдання	41
Додаток Б Приклади оформлення бібліографічних посилань	42



ВСТУП

Методичні рекомендації до виконання практичних та індивідуальних завдань з дисципліни «Теоретичні основи процесів металургії» розроблені з метою формування у здобувачів освіти практичних навичок розрахунку та аналізу основних фізико-хімічних процесів, що мають місце у металургійному виробництві. Особливу увагу приділено питанням поверхневих явищ у металевих і шлакових розплавах, термодинаміці хімічних реакцій, процесам горіння газоподібного палива, відновленню оксидів металів та закономірностям шлакового рафінування.

У методичних рекомендаціях наведено короткі теоретичні відомості, необхідні для виконання розрахунків, приклади розв'язання типових задач, варіанти індивідуальних завдань та рекомендовану літературу. Запропоновані практичні роботи орієнтовані на розвиток у здобувачів освіти навичок використання законів термодинаміки, матеріального балансу, хімічної рівноваги та фізичної хімії для аналізу й прогнозування перебігу металургійних процесів.

Виконання практичних та індивідуальних завдань сприятиме формуванню професійних компетентностей у сфері металургії, розвитку інженерного мислення, уміння аналізувати технологічні процеси та приймати обґрунтовані технічні рішення в умовах сучасного металургійного виробництва.



ПРАКТИЧНА РОБОТА №1 ВСТАНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ЗАЛІЗА

Мета роботи – ознайомитись з методикою визначення поверхневого натягу металу; встановити вплив вмісту кисню в розплаві заліза на поверхневий натяг металу.

Короткі теоретичні відомості

При виробництві чавуну і сталі поверхневі явища грають важливу, а іноді і вирішальну роль:

- Адгезія — це сила зчеплення між різними фазами (наприклад, металу до футерівки, шлаку до металу, неметалевих включень до стінок ковша). Визначає: знос футерівки, прилипання шлаку, втрати металу.

- Когезія — це сили зчеплення між частинками однієї фази (міжатомні Fe–Fe зв'язки).

- Адсорбція — це накопичення атомів або молекул на поверхні розділу фаз. Кисень, сірка, азот адсорбуються на поверхні рідкого металу; змінюють поверхневий натяг; впливають на дегазацію.

- Змочування — це здатність однієї рідини розтікатися по поверхні іншої фази. У виробництві сталі змочування футерівки металом, змочування включень металом, змочування металу шлаком. Добре змочування включень → їх важче видалити. Погане змочування → полегшується флотація.

- Коалесценція — це злиття дрібних крапель або бульбашок в більші. У сталеплавильному процесі: злиття бульбашок CO, укрупнення крапель металу в шлаку, злиття неметалевих включень. Важлива для: дегазації, видалення включень, формування пінистого шлаку.

- Коагуляція — це злипання дрібнодисперсних частинок у більші агрегати. У металургії: злипання неметалевих включень, укрупнення оксидів Al_2O_3 , шлакових частинок. Полегшує їх спливання у шлак.

- Пінення — це утворення стійкої піни з газових бульбашок у шлаку. характерне для: киснево-конвертерного процесу, електродугових печей (через перемішування розплав газом, магнітним полем). Кероване пінення → захист футерівки, Надмірне → викиди шлаку

- Флотація — це спливання частинок або включень на поверхню під дією сил поверхневого натягу. У сталі: видалення неметалевих включень, очищення металу.

Всі ці явища взаємопов'язані та важливі в різних процесах: рафінуванні, дегазації, десульфурзації, видаленні включень, зносі футерівки, стабільності шлаку.

Якщо звернути увагу на фізичний зміст поверхневих явищ, то ми приходимо до такого поняття поверхневий натяг - сила, що діє вздовж поверхні та прагне зменшити її площу. Атоми в середині розплану

неврівноважені і виникає надлишкова енергія, візуально це спостерігається як «натягнута плівка» між атомами розплаву. Саме ця енергія і визначає всі ті поверхневі явища, про які ми щойно згадували, саме ця енергія визначає поведінку металу при продувці, рафінуванні та контакті зі шлаком та всіх інших процесах.

Значення поверхневого натягу характеризує рівень енергетичних витрат, пов'язаних із перебігом певного поверхневого явища. Тому для виконання розрахунків поверхневих процесів необхідно знати величини поверхневого натягу для різних сталеплавильних систем: тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина, рідина – газ та рідина – рідина.

У цій роботі для визначення поверхневого натягу застосовується статистичний метод максимального тиску газового пухирця, який видувається у метал (рис. 1).

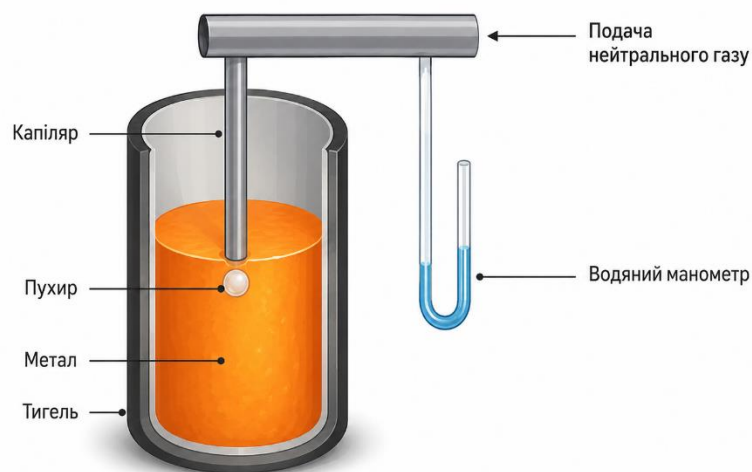


Рисунок 1 – Принципова схема визначення поверхневого натягу

Загальний тиск в пухирі газу Δp_{\max} :

$$\Delta p_{\max} = p_{\max} - (\rho_p - \rho_g) \cdot h \cdot g$$

де ρ_p – щільність розплаву (кг/м^3);

ρ_g – щільність газу (кг/м^3);

h – глибина занурення капіляру (м);

g – прискорення вільного падіння (м/с^2).

Поверхневий натяг:

$$\delta = \Delta p_{\max} \cdot r / 2$$

де r – радіус капіляру (м).

На значення поверхневого натягу істотно впливає кисень, оскільки він є сильною поверхнево-активною домішкою та суттєво змінює енергетичний стан поверхневого шару металу і його стабільність. Кисень характеризується високою спорідненістю до заліза, унаслідок чого утворюються зв'язки типу Fe–O. При цьому він не розподіляється рівномірно в усьому об'ємі металу, а переважно накопичується на поверхні. Навіть незначний вміст кисню (0,01–0,1 %) спричиняє помітне зменшення поверхневого натягу.

Завдання: відповідно до варіанту (табл. 1) визначити значення поверхневого натягу заліза.

Таблиця 1 – Вихідні дані до практичної роботи 1

№ варіанту	Значення тиск в пухирі газу Δr_{max} (мм вод.ст.) в залежності від вмісту кисню O (%) в металі					
	O (%)	0,008	0,027	0,1	0,108	0,181
1	Δr_{max} (мм вод.ст.)	218	208	150	145	115
	O (%)	0,06	0,027	0,065	0,126	0,153
2	Δr_{max} (мм вод.ст.)	215	195	170	140	130
	O (%)	0,008	0,025	0,082	0,133	0,178
3	Δr_{max} (мм вод.ст.)	210	200	160	135	125
	O (%)	0,007	0,033	0,097	0,113	0,144
4	Δr_{max} (мм вод.ст.)	212	190	155	148	135
	O (%)	0,006	0,032	0,064	0,116	0,151
5	Δr_{max} (мм вод.ст.)	215	192	170	142	132
	O (%)	0,006	0,048	0,074	0,135	0,164
6	Δr_{max} (мм вод.ст.)	215	180	165	138	128
	O (%)	0,006	0,039	0,072	0,12	0,197
7	Δr_{max} (мм вод.ст.)	215	185	168	150	118
	O (%)	0,007	0,025	0,063	0,125	0,149
8	Δr_{max} (мм вод.ст.)	212	200	172	140	133
	O (%)	0,008	0,013	0,08	0,123	0,147
9	Δr_{max} (мм вод.ст.)	210	205	162	142	135
	O (%)	0,008	0,009	0,095	0,119	0,162
10	Δr_{max} (мм вод.ст.)	210	208	152	145	130
	O (%)	0,008	0,047	0,069	0,12	0,199
11	Δr_{max} (мм вод.ст.)	210	182	168	150	115
	O (%)	0,006	0,012	0,087	0,132	0,143
12	Δr_{max} (мм вод.ст.)	215	206	158	138	134
	O (%)	0,006	0,023	0,053	0,135	0,147
13	Δr_{max} (мм вод.ст.)	215	198	175	138	133
	O (%)	0,006	0,009	0,086	0,109	0,191
14	Δr_{max} (мм вод.ст.)	215	208	158	148	120
	O (%)	0,008	0,017	0,087	0,119	0,166
15	Δr_{max} (мм вод.ст.)	210	202	158	145	128

16	О (%)	0,006	0,023	0,093	0,111	0,172
	Δртах (мм вод.ст.)	215	198	154	147	126
17	О (%)	0,007	0,027	0,054	0,132	0,152
	Δртах (мм вод.ст.)	212	195	174	138	132
18	О (%)	0,008	0,038	0,073	0,102	0,172
	Δртах (мм вод.ст.)	210	188	166	152	126
19	О (%)	0,007	0,025	0,057	0,114	0,198
	Δртах (мм вод.ст.)	212	200	172	148	118
20	О (%)	0,007	0,029	0,059	0,103	0,161
	Δртах (мм вод.ст.)	212	192	170	150	130
21	О (%)	0,007	0,038	0,084	0,112	0,199
	Δртах (мм вод.ст.)	212	188	158	148	115
22	О (%)	0,008	0,014	0,091	0,116	0,191
	Δртах (мм вод.ст.)	210	205	155	146	120
23	О (%)	0,008	0,044	0,067	0,127	0,194
	Δртах (мм вод.ст.)	210	185	170	140	118
24	О (%)	0,007	0,034	0,085	0,135	0,151
	Δртах (мм вод.ст.)	212	190	158	138	132
25	О (%)	0,008	0,012	0,089	0,12	0,174
	Δртах (мм вод.ст.)	210	206	156	150	125
26	О (%)	0,008	0,028	0,063	0,127	0,178
	Δртах (мм вод.ст.)	210	192	172	140	125
27	О (%)	0,005	0,042	0,094	0,127	0,181
	Δртах (мм вод.ст.)	218	185	154	140	120
28	О (%)	0,005	0,037	0,068	0,124	0,151
	Δртах (мм вод.ст.)	218	188	168	142	132
29	О (%)	0,008	0,013	0,065	0,124	0,172
	Δртах (мм вод.ст.)	210	205	170	142	126
30	О (%)	0,005	0,011	0,1	0,121	0,199
	Δртах (мм вод.ст.)	210	195	150	145	120

Приклад розв'язку завдання

Вихідні дані

О (%)	0,005	0,011	0,1	0,121	0,199
Δртах (мм вод. ст.)	210	195	150	145	120

1. Так як тиск прийнято вимірювати у Па, переводимо розмірність Δртах з «мм вод.ст.» у «Па» (1 мм вод. ст. = 9,81 Па):

Δртах (мм вод.ст.)	210	195	150	145	120
Δртах (Па)	2060	1913	1472	1423	1177

2. Розрахуємо поверхневий натяг δ. Прийmemo r – радіус капіляру 0,0025 м (тобто 2,5 мм).

$$\text{Для } O = 0,005 \% \text{ при } \Delta r_{\text{тах}} = 210 \text{ мм вод.ст.} = 2060 \text{ Па} \rightarrow \\ \delta = 2060 \cdot 0,0025 / 2 = 2,575 \text{ Н/м}$$

Аналогічна розрахуємо для всіх значень та отримаємо:

O (%)	0,005	0,011	0,1	0,121	0,199
δ (Н/м)	2,575	2,391	1,84	1,779	1,471

3. Побудуємо графік залежності поверхневого натягу заліза від вмісту в ньому кисню $\delta = f(O)$:

O (%)	0,005	0,011	0,1	0,121	0,199	координата x
δ (Н/м)	2,575	2,391	1,84	1,779	1,471	координата y

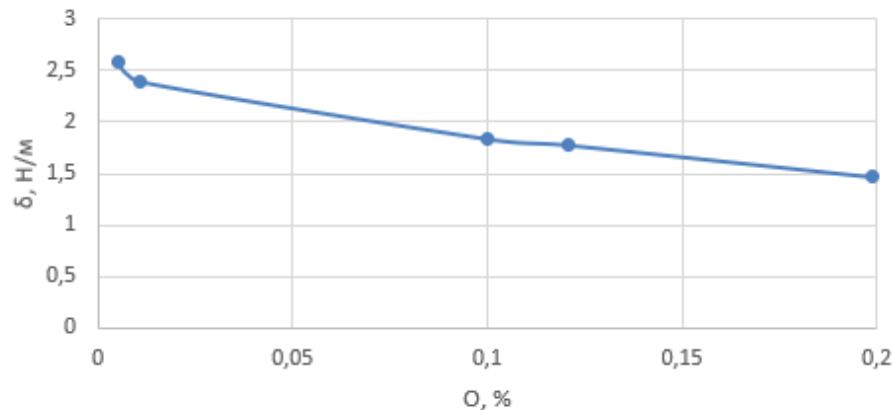


Рисунок 2 – Графік залежності поверхневого натягу заліза від вмісту кисню

Висновок

Зменшення поверхневого натягу рідкого заліза зі збільшенням вмісту кисню це прояв поверхнево-активної дії кисню в металевому розплаві. Зменшення поверхневого натягу δ при зростанні вмісту кисню пояснюється адсорбцією кисню на поверхні рідкого заліза, тобто його вибіркоким накопиченням у поверхневому шарі.

Рекомендована література

1. Поверхневі явища. Сорбційні процеси та їх практичне застосування : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДМУ, 2020. 112 с.
2. Великонська Н. М., Надточій А. А. Поверхневі явища та дисперсні системи : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2018. 124 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 ВСТАНОВЛЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ШЛАКУ

Мета роботи – ознайомитись з методикою визначення поверхневого натягу сталеплавильного шлаку та визначити фактори, що на нього впливають, і характер цього впливу.

Короткі теоретичні відомості

Поверхневий натяг σ — це фізична величина, що характеризує енергію поверхні розділу фаз (шлаку та газу або металу).

Для металургійних шлаків $\sigma = 300\dots700$ мН/м (префікс «м» означає одну тисячну (10^{-3}), «мілі»).

Основні компоненти шлаку:

- SiO_2 → знижує поверхневий натяг;
- CaO → підвищує поверхневий натяг;
- FeO → знижує поверхневий натяг.

Для аналізу властивостей багатокомпонентних систем, зокрема шлакових і оксидних розплавів, широко застосовуються трикутні діаграми. У даному випадку представлена потрійна система $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ (рис. 3), де кожна вершина трикутника відповідає 100 % одного компонента, а будь-яка точка всередині діаграми характеризує певний хімічний склад суміші. Такий спосіб подання дозволяє наочно визначати співвідношення компонентів та оцінювати зміну фізико-хімічних властивостей системи залежно від складу.

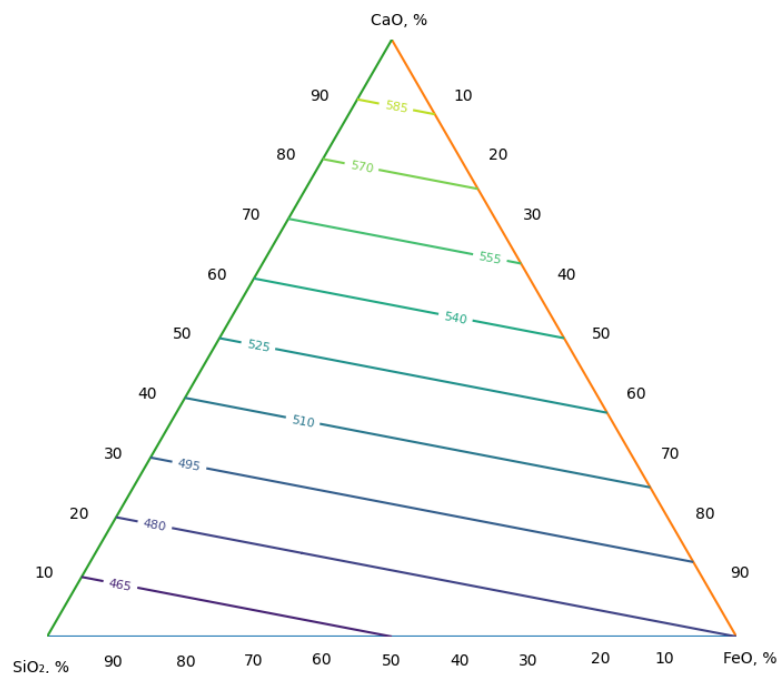


Рисунок 3 – Приклад трикутної діаграми $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ з ізолініями поверхневого натягу σ (мН/м) (при $\approx 1600\text{--}1700^\circ\text{C}$)

На діаграмі нанесені ізолінії поверхневого натягу — лінії, що з'єднують точки з однаковими значеннями поверхневого натягу σ . Аналіз розташування ізоліній дає можливість встановити, як зміна вмісту оксидів CaO, SiO₂ та FeO впливає на поверхневі властивості розплаву. Поверхневий натяг є важливою характеристикою металургійних систем, оскільки визначає умови змочування, формування шлакової плівки, перебіг масообмінних процесів і стабільність межі поділу фаз.

Із діаграми видно, що зі зміною складу шлаку значення поверхневого натягу змінюється нерівномірно. Підвищення вмісту оксиду кальцію, як правило, сприяє збільшенню поверхневого натягу, тоді як зростання частки SiO₂ може призводити до його зниження через формування більш розвиненої силікатної структури розплаву. Вміст FeO також суттєво впливає на енергетичний стан поверхні, змінюючи фізико-хімічну активність компонентів системи.

Використання таких діаграм у металургійній практиці дозволяє прогнозувати поведінку шлакових систем при високих температурах, оптимізувати склад шлаку та забезпечувати необхідні технологічні властивості процесу плавки і рафінування металу.

Завдання: відповідно до варіанту (табл. 2) визначити значення поверхневого натягу шлаку.

Таблиця 2 – Вихідні дані до практичної роботи 2

Варіант№	CaO, %	SiO ₂ , %	FeO, %
1	45.0	22.0	20.0
2	48.0	20.0	22.0
3	50.0	18.0	24.0
4	42.0	25.0	18.0
5	47.0	21.0	23.0
6	52.0	17.0	21.0
7	49.0	19.0	22.0
8	53.0	16.0	20.0
9	46.0	23.0	21.0
10	51.0	18.0	22.0
11	44.0	24.0	19.0
12	54.0	15.0	21.0
13	48.0	20.5	23.0
14	52.5	17.5	20.0
15	47.5	22.0	21.5
16	50.5	19.0	22.5
17	46.5	23.5	20.0
18	53.5	16.5	21.0

19	49.5	18.5	22.0
20	51.5	17.0	23.0
21	45.5	24.5	19.0
22	54.0	15.5	22.0
23	48.5	21.0	22.5
24	52.0	18.0	21.0
25	47.0	22.5	20.5
26	50.0	20.0	21.5
27	46.0	23.0	22.0
28	53.0	17.0	20.5
29	48.0	21.5	21.0
30	49.0	15.5	24.0

Приклад розв'язку завдання
Вихідні дані

Компонент	CaO	SiO ₂	FeO
Вміст, %	49	15,5	24

1. Знайдемо масову частку кожного компоненту в шлаку w ?

$$w_i = (m_i / m_{\text{заг}}) \cdot 100\%,$$

де m_i - маса компоненту, $m_{\text{заг}}$ - загальна маса шлаку.

$m_{\text{заг}} = 49 + 15.5 + 24 = 88.5\%$ - сума компонентів в шлаку.

$w_{\text{CaO}} = (49/88.5) \cdot 100 = 55.37\%$ - масова частка оксиду кальцію в шлаку.

$w_{\text{SiO}_2} = (15.5/88.5) \cdot 100 = 17.51\%$ - масова частка оксиду кальцію в шлаку.

$w_{\text{FeO}} = (24/88.5) \cdot 100 = 27.12\%$ - масова частка оксиду кальцію в шлаку.

2. Знайдемо молярні маси оксидів M які обчислюються через атомні маси елементів з періодичної таблиці.

$$M = \sum(A_i \cdot n_i),$$

де A_i — атомна маса елемента,

n_i — кількість атомів у хімічній формулі.

Молярна маса оксиду кальцію:

$$\text{CaO } M_{\text{CaO}} = (40.078 * 1) + (15.999 * 1) = 56,08 \text{ г/моль,}$$

де 40.078 та 15.999 — атомна маса Ca та O з таблиці Менделєєва відповідно, 1 та 1 — кількість атомів Ca та O в хімічній формулі CaO (тобто Ca₁O₁).

Молярна маса оксиду кремнію:

$$\text{SiO}_2 \text{ } M_{\text{SiO}_2} = (28.086 * 1) + (15.999 * 2) = 60.08 \text{ г/моль}$$

Молярна маса оксиду залізу:

$$\text{FeO } M_{\text{FeO}} = (55.547 * 1) + (15.999 * 1) = 71.85 \text{ г/моль}$$

3. Знайдемо кількість речовини (молів) n на 100 г шлаку:

$$n_i = w_i / M_i,$$

де w_i - масова частка компонента, M_i – молярна маса компонента.

$$n_{\text{CaO}} = 55.37 / 56.08 = 0.988 \text{ молів оксиду кальцію.}$$

$$n_{\text{SiO}_2} = 17.51 / 60.08 = 0.291 \text{ молів оксиду кремнію.}$$

$$n_{\text{FeO}} = 27.12 / 71.85 = 0.378 \text{ молів оксиду заліза.}$$

4. Знайдемо мольні частки кількості речовини компонента в шлаку (тобто яка частина всіх молів припадає на певний компонент) X_i :

$$X_i = (n_i / \sum n_i) * 100\%,$$

де n_i - кількість молів компонента; $\sum n_i$ – загальна кількість молів.

$$\sum n_i = 0.988 + 0.291 + 0.378 = 1.657 \text{ молів}$$

$X_{\text{CaO}} = (0.988 / 1.657) * 100\% = 59.6\%$ мольна частка оксиду кальцію.

$X_{\text{SiO}_2} = (0.291 / 1.657) * 100\% = 17.6\%$ мольна частка оксиду кремнію.

$$X_{\text{FeO}} = (0.378 / 1.657) * 100\% = 22.8\% \text{ мольна частка оксиду заліза.}$$

5. Визначення поверхневого натягу за допомогою системи CaO–SiO₂–FeO: треба на трикутній діаграмі знайти перетин точок $X_{\text{CaO}} = 59.6\%$, $X_{\text{SiO}_2} = 17.6\%$, $X_{\text{FeO}} = 22.8\%$.

Порядок побудови точки:

- На шкалі CaO (ліва сторона) знайти значення 59.6%; провести промінь через точку паралельно стороні, що лежить навпроти вершини CaO (тобто паралельно горизонтальній стороні трикутника).

- На шкалі FeO (права сторона) знайти значення 22.8%; провести промінь через точку паралельно стороні, що лежить навпроти вершини FeO (тобто паралельно лівій стороні трикутника).
- На шкалі SiO₂ (нижня сторона): знайти значення 17.6%; провести промінь через точку паралельно стороні, що лежить навпроти вершини SiO₂ (тобто паралельно правій стороні трикутника).

Перетин 3х променів (рис. 4) це шукана область зміни значення поверхневого натягу для даного складу шлаку, та складає ≈ 540....550 мН/м.

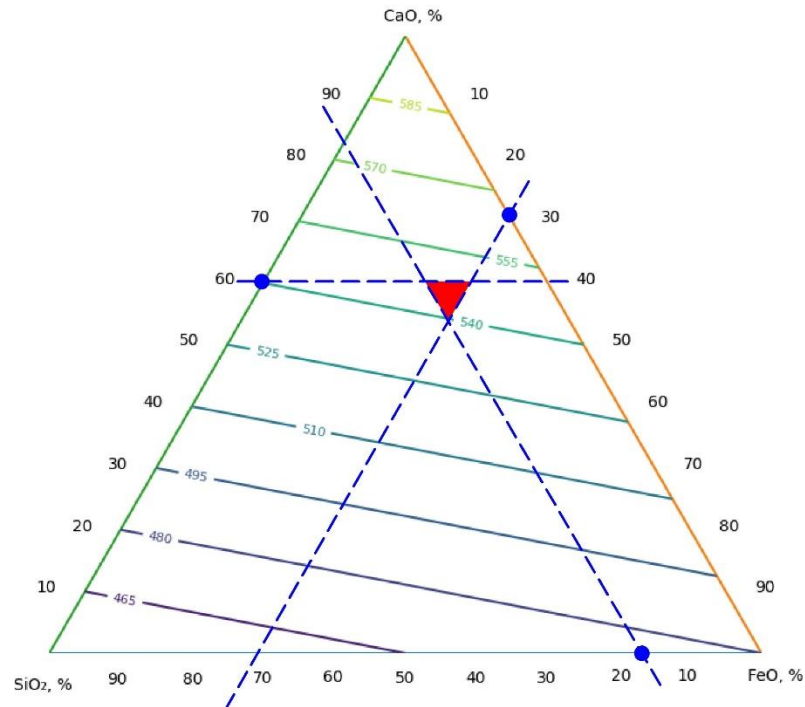


Рисунок 4 – Визначення поверхневого натягу шлаку

Рекомендована література

1. Поверхневі явища. Сорбційні процеси та їх практичне застосування : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДМУ, 2020. 112 с.
2. Великонська Н. М., Надточій А. А. Поверхневі явища та дисперсні системи : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2018. 124 с.



ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГОРІННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Мета роботи – набуття практичних навичок розрахунку параметрів процесу горіння газоподібного палива (природного газу) за заданим елементарним складом, зокрема визначення складу робочого палива, теоретично необхідної та дійсної кількості повітря, об'ємів і складу продуктів повного згоряння, а також аналізу впливу коефіцієнта надлишку повітря та вологості на характеристики процесу горіння.

Короткі теоретичні відомості

Процеси горіння палива є основою більшості теплотехнічних і металургійних агрегатів, зокрема доменних печей, нагрівальних і термічних печей, котлів-утилізаторів, сушильних установок та енергетичних котлів. Ефективність роботи таких агрегатів безпосередньо залежить від правильного підбору режимів горіння, зокрема кількості повітря, що подається, та умов змішування палива з окиснювачем. Саме тому розрахунок параметрів горіння є необхідним етапом при проектуванні, налагодженні та експлуатації теплотехнічного обладнання.

Виконання даного розрахунку дозволяє визначити теоретично необхідну та дійсну витрату повітря для повного згоряння палива, встановити об'єм і склад продуктів горіння, а також оцінити наявність надлишкового кисню в димових газах. Отримані результати дають можливість оптимізувати процес горіння, забезпечити повноту згоряння палива, знизити втрати теплоти та мінімізувати викиди шкідливих компонентів у навколишнє середовище.

Практичне значення таких розрахунків полягає у їх широкому використанні в металургії, енергетиці та хімічній промисловості. Зокрема, вони застосовуються при розрахунку теплових балансів агрегатів, визначенні температури горіння, підборі режимів роботи паливних пристроїв, розрахунку газоходів і систем очищення димових газів, а також при впровадженні енергоефективних та екологічно безпечних технологій.

Розрахунок параметрів горіння газоподібного палива базується на законах збереження маси та елементного складу, а також на співвідношеннях хімічних реакцій окиснення вуглеводнів.

Запропонована методика передбачає поетапне визначення всіх основних характеристик процесу горіння, починаючи з приведення складу палива до робочого стану та закінчуючи встановленням об'єму і складу продуктів згоряння.

Коефіцієнт перерахунку сухого газу на вологий K — це безрозмірна величина, яка враховує наявність водяної пари (вологи) у газі та дозволяє перейти від складу сухого газу до робочого (вологого):

$$K = \frac{1}{1 + 0,00124 \cdot f_g}$$

де f_g — вміст вологи (водяної пари) в газі, г/м³;
 0,00124 — це перехідний коефіцієнт, який переводить вміст вологи f_g з одиниць г/м³ у об'ємну частку водяної пари в газі.

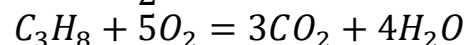
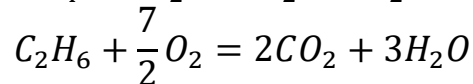
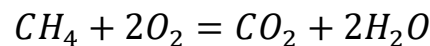
Сухий газ — це газ без урахування водяної пари. Робочий (вологий) газ — це реальний газ, який містить як горючі компоненти, так і водяну пару.

Волога “розбавляє” газову суміш, тому частки CH_4, CO, H_2 у вологому газі менші, ніж у сухому; теплота згоряння також зменшується.

Коефіцієнт K показує, у скільки разів потрібно зменшити об'ємні частки компонентів, щоб перейти до реального (вологого) стану.

Для повного згоряння газоподібного палива необхідно підвести певну мінімальну кількість кисню, яка забезпечує повне окиснення всіх горючих компонентів газу. Цю кількість називають теоретично необхідною витратою кисню. Вона визначається на основі рівнянь реакцій горіння, у яких встановлюється точне кількісне співвідношення між об'ємами або кількістю речовини горючого компонента та кисню.

У природному газі основними горючими компонентами є метан CH_4 , етан C_2H_6 і пропан C_3H_8 . Для кожного з них реакції повного горіння мають вигляд:



Із цих рівнянь видно, що:

- для спалювання 1 м³ метану потрібно 2 м³ кисню;
- для спалювання 1 м³ етану потрібно 3,5 м³ кисню;
- для спалювання 1 м³ пропану потрібно 5 м³ кисню.

Оскільки об'ємні співвідношення газів за однакових умов пропорційні кількості молей, стехіометричні коефіцієнти можна безпосередньо використовувати для інженерних розрахунків об'ємів газів. Тому теоретична витрата кисню на 1 м³ газового палива визначається як сума добутків об'ємних часток окремих горючих компонентів на відповідну стехіометричну потребу в кисні:

$$V_{O_2}^0 = 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8$$

де CH_4, C_2H_6, C_3H_8 — об'ємні частки компонентів у 1 м³ робочого газу, м³/м³.

У цьому розрахунку використовують саме робочий (вологий) склад газу, оскільки він відповідає реальному стану палива в умовах спалювання. Попередньо відсотковий склад переводять у частки одиниці, тобто з % у $\text{м}^3/\text{м}^3$. Це потрібно для того, щоб одержати фактичний об'єм кожного горючого компонента в 1 м^3 газової суміші.

Після визначення теоретично необхідного об'єму кисню переходять до розрахунку теоретично необхідної кількості повітря. Оскільки у сухому повітрі міститься в середньому 21 % кисню за об'ємом, то для подачі 1 м^3 кисню потрібно $\frac{1}{0,21} = 4,76 \text{ м}^3$ сухого повітря. Тому теоретично необхідна кількість сухого повітря визначається за формулою:

$$L_0^{\text{сух}} = \frac{V_{O_2}^0}{0,21}$$

де $L_0^{\text{сух}}$ — теоретично необхідна кількість сухого повітря, $\text{м}^3/\text{м}^3$ газу;

$V_{O_2}^0$ — теоретична витрата кисню, $\text{м}^3/\text{м}^3$ газу;

0,21 — об'ємна частка кисню в сухому повітрі.

Отримане значення показує, яка мінімальна кількість сухого повітря потрібна для повного згорання 1 м^3 газу без надлишку повітря.

Однак у реальних умовах повітря, що подається на горіння, завжди містить певну кількість водяної пари, тобто є вологим повітрям. Наявність вологи впливає на об'єм повітря, тому для більш точних теплотехнічних розрахунків необхідно враховувати цей фактор.

Перехід від сухого до вологого повітря здійснюється за допомогою коефіцієнта, який враховує вміст вологи у повітрі. Теоретично необхідна кількість вологого повітря визначається за формулою:

$$L_0^{\text{вл}} = L_0^{\text{сух}} (1 + 0,00124 \cdot f_{\text{в}})$$

де $L_0^{\text{вл}}$ — теоретично необхідна кількість вологого повітря, $\text{м}^3/\text{м}^3$ газу;

$L_0^{\text{сух}}$ — теоретично необхідна кількість сухого повітря, $\text{м}^3/\text{м}^3$ газу;

$f_{\text{в}}$ — вологовміст повітря, $\text{г}/\text{м}^3$;

0,00124 — коефіцієнт переведення масової вологи в об'ємну частку.

Фізично множник $(1 + 0,00124 \cdot f_{\text{в}})$ показує, наскільки збільшується об'єм повітря за рахунок водяної пари. Волога не бере участі в процесі горіння, але займає об'єм, тим самим «розбавляючи» кисень і збільшуючи загальний об'єм газової суміші. Тому для подачі тієї ж кількості кисню потрібно більший об'єм повітря.

Однак у реальних умовах горіння подача повітря завжди здійснюється з певним надлишком, що обумовлено необхідністю забезпечення повного згорання палива. Недостатня кількість повітря

призводить до неповного згоряння, утворення чадного газу (CO) та зниження теплової ефективності процесу. Тому вводиться поняття коефіцієнта надлишку повітря n .

Коефіцієнт надлишку повітря визначається як відношення дійсної кількості повітря до теоретично необхідної:

$$n = \frac{L_n}{L_0}$$

Звідси дійсна кількість повітря визначається:
для сухого повітря:

$$L_n^{\text{сух}} = n \cdot L_0^{\text{сух}}$$

для вологого повітря:

$$L_n^{\text{вл}} = n \cdot L_0^{\text{вл}}$$

де L_n — дійсна (фактична) витрата повітря, м³/м³ газу;

n — коефіцієнт надлишку повітря.

Фізичний зміст коефіцієнта n полягає в тому, що він показує, у скільки разів реальна подача повітря перевищує теоретично необхідну.

Після визначення теоретично необхідної та дійсної кількості повітря переходять до розрахунку об'ємного складу продуктів горіння. Продукти горіння — це газова суміш, яка утворюється внаслідок повного або неповного окиснення компонентів палива та містить як продукти реакцій, так і баластні складові, що надходять із повітрям.

У випадку повного згоряння газоподібного палива до складу продуктів горіння входять: діоксид вуглецю CO_2 , водяна пара H_2O , азот N_2 , надлишковий кисень O_2 (за умови $n > 1$):

$$V_{CO_2} = CO_2^p + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8$$

$$V_{H_2O} = H_2O^p + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 0,00124f_8L_n^{\text{сух}}$$

$$V_{N_2} = N_2^p + 0,79L_n^{\text{сух}}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (L_n^{\text{сух}} - L_0^{\text{сух}})$$

Завдання: розрахунку параметрів процесу горіння газоподібного палива (природного газу) за заданим елементарним складом (табл. 3).

Таблиця 3 – Вихідні дані до практичної роботи 3

N п/п	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂	f _r , г/м ³ сух.пов.	n	f _v , г/м ³	T _{повітря}
1	96,2	0,32	0,01	0,25	3,0	4,0	1,1	12,0	100
2	96,3	0,23	0,01	0,24	2,9	4,1	1,11	12,1	110
3	96,4	0,12	0,01	0,23	2,8	4,2	1,12	12,2	120

4	96,5	0,08	0,01	0,22	2,7	4,3	1,13	12,5	130
5	96,6	0,28	0,01	0,19	2,6	4,4	1,14	13,0	140
6	96,7	0,16	0,01	0,18	2,5	4,5	1,15	13,2	150
7	96,8	0,14	0,01	0,17	2,4	4,6	1,16	13,5	160
8	96,9	0,09	0,01	0,16	2,3	4,7	1,17	13,8	170
9	97,0	0,26	0,01	0,15	2,2	4,8	1,18	13,4	180
10	97,1	0,15	0,01	0,14	2,1	4,9	1,19	13,5	190
11	97,2	0,11	0,01	0,13	2,0	5,0	1,20	13,6	200
12	97,3	0,07	0,01	0,12	1,9	4,0	1,1	13,7	210
13	97,4	0,15	0,01	0,11	1,8	4,1	1,11	13,8	220
14	97,5	0,22	0,01	0,10	1,7	4,2	1,12	13,9	230
15	97,6	0,18	0,01	0,09	1,6	4,3	1,13	14,0	240
16	97,7	0,12	0,01	0,08	1,5	4,4	1,14	14,1	250
17	97,8	0,11	0,01	0,07	1,4	4,5	1,15	14,2	260
18	97,9	0,10	0,01	0,06	1,3	4,6	1,16	14,3	270
19	98,0	0,08	0,01	0,05	1,2	4,7	1,17	14,4	280
20	97,5	0,14	0,01	0,10	2,0	4,8	1,18	14,5	290
21	97,4	0,13	0,01	0,11	2,1	4,9	1,19	14,6	300
22	97,3	0,15	0,01	0,12	2,2	5,0	1,20	13,8	250
23	97,2	0,16	0,01	0,13	2,3	5,1	1,21	13,9	240
24	97,1	0,17	0,01	0,14	2,4	5,2	1,22	14,0	230
25	97,0	0,18	0,01	0,15	2,5	5,3	1,23	14,1	220

Приклад розв'язку завдання

Вихідні дані

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂	f _r , г/м ³ сух.пов.	n	f _в , г/м ³	T _{повітря}
97,0	0,18	0,01	0,15	2,5	5,3	1,23	14,1	220

Розрахунок виконується на 1 м³ робочого (вологого) газу.

1. Перерахунок сухого складу газу на робочий (вологий):

$$K = \frac{1}{1 + 0,00124 \cdot f_r} = \frac{1}{1 + 0,00124 \cdot 5,3} = 0,99347$$

Тоді склад робочого газу:

$$\text{метану } CH_4^p = 97,0 \cdot 0,99347 = 96,37\%$$

$$\text{етану } C_2H_6^p = 0,18 \cdot 0,99347 = 0,179\%$$

$$\text{пропану } C_3H_8^p = 0,01 \cdot 0,99347 = 0,00993\%$$

$$\text{вуглекислого газу } CO_2^p = 0,15 \cdot 0,99347 = 0,149\%$$

$$\text{азоту } N_2^p = 2,5 \cdot 0,99347 = 2,484\%$$

Вміст води у робочому газі:

$$H_2O^p = 0,00124 \cdot f_r \cdot 100 = 0,00124 \cdot 5,3 \cdot 100 = 0,657\%$$

2. Теоретична витрата кисню на 1 м³ робочого газу:

$$V_{O_2}^0 = 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8$$

Підставляємо

$$V_{O_2}^0 = 2 \cdot 0,9637 + 3,5 \cdot 0,00179 + 5 \cdot 0,0000993 = 1,93 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

3. Теоретично необхідна кількість сухого повітря:

$$L_0^{\text{сух}} = \frac{V_{O_2}^0}{0,21} = \frac{1,93}{0,21} = 9,21 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретично необхідна кількість вологого повітря:

$$L_0^{\text{вл}} = L_0^{\text{сух}}(1 + 0,00124 f_B) = 9,21 \cdot (1 + 0,00124 \cdot 14,1) = 9,37 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

4. Дійсна кількість повітря. За заданого коефіцієнта надлишку повітря n :

$$L_n^{\text{сух}} = n \cdot L_0^{\text{сух}} = 1,23 \cdot 9,21 = 11,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$L_n^{\text{вл}} = n \cdot L_0^{\text{вл}} = 1,23 \cdot 9,37 = 11,53 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

5. Кількість продуктів повного горіння:

$$V_{CO_2} = CO_2^p + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 = 0,00149 + 0,9637 + 2 \cdot 0,00179 + 3 \cdot 0,0000993 = 0,969 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{H_2O} = H_2O^p + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 0,00124 f_B L_n^{\text{сух}} = 0,00657 + 2 \cdot 0,9637 + 3 \cdot 0,00179 + 4 \cdot 0,0000993 + 0,00124 \cdot 14,1 \cdot 11,33 \approx 2,138 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{N_2} = N_2^p + 0,79 L_n^{\text{сух}} = 0,02484 + 0,79 \cdot 11,33 = 8,974 \text{ м}^3/\text{м}^3$$


$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (L_n^{\text{сух}} - L_0^{\text{сух}}) = 0,21 \cdot (11,33 - 9,21) = 0,445 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Сумарна кількість продуктів горіння:

$$V_{\partial} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} = 0,969 + 2,138 + 8,974 + 0,445 = 12,53 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Висновок

Для спалювання 1 м³ робочого природного газу потрібно 9,21 м³ сухого повітря або 9,37 м³ вологого повітря; при повному згорянні утворюється 12,53 м³/м³ продуктів горіння, у складі яких переважає азот 8,974 м³/м³, водяна пара становить 2,138 м³/м³, вуглекислий газ — 0,969 м³/м³, а залишковий кисень — 0,445 м³/м³; наявність кисню в димових газах пояснюється подачею повітря з надлишком ($n > 1$).



ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 РОЗРАХУНОК КОНСТАНТИ РІВНОВАГИ ТА АНАЛІЗ САМОДОВІЛЬНОСТІ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ ЗА ЕНЕРГІЄЮ ГІББСА

Мета роботи – навчитися визначати константу рівноваги, оцінювати самодовільність хімічних реакцій та аналізувати напрям зміщення рівноваги на основі значень стандартної зміни енергії Гіббса.

Короткі теоретичні відомості

Будь-яка реакція відновлення оксидів заліза визначається зміною вільної енергії Гіббса (ΔG). Енергія Гіббса (ΔG) — це термодинамічна функція, яка показує, чи може хімічна реакція відбуватися самодовільно за сталих температури і тиску.

Енергія Гіббса — це критерій напрямку реакції:

- якщо $\Delta G^\circ < 0$, реакція самодовільна;
- якщо $\Delta G^\circ > 0$, реакція несамоодовільна;
- якщо $\Delta G^\circ = 0$, система в рівновазі.

Константа рівноваги (K) — це величина, яка показує співвідношення між концентраціями (або активностями) продуктів і реагентів у стані рівноваги.

Константа рівноваги показує наскільки далеко "пішла" реакція:

- при $K > 1$ → переважають продукти;
- при $K < 1$ → переважають реагенти;
- при $K \approx 1$ → система збалансована.

Зв'язок енергії Гіббса з константою рівноваги є критично важливим, оскільки це рівняння дозволяє теоретично передбачити напрямок реакції, глибину її перебігу та умови рівноваги без експериментальних спроб.

Воно об'єднує термодинамічні характеристики речовин з реальним складом системи.

У стані рівноваги ($Q = K$):

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

Де ΔG° — це енергетичний ефект реакції в стандартних умовах: $T = 298 \text{ K}$, $p = 1 \text{ атм}$ ($\approx 101325 \text{ Па}$), концентрації = 1 моль/л;

R — універсальна газова стала, коефіцієнт зв'язку між енергією і температурою $R = 8.314 \text{ Дж/(моль/К)}$;

T — абсолютна температура, [K]; $T = t(^{\circ}\text{C}) + 273$;

K — константа рівноваги.

Ця формула переводить "енергію" у "склад системи" і означає: чим більше K → тим більш вигідна реакція, чим більш негативне ΔG° → тим більше K .

Завдання: для кожної з наведених реакцій (табл. 4) з заданими значеннями стандартної зміни енергії Гіббса ΔG° та температури T : обчислити константу рівноваги K ; визначити, чи є реакція самодовільною; встановити, у бік яких речовин зміщена рівновага.

Таблиця 4 – Вихідні дані до практичної роботи 4

№ варіанту	Хімічна реакція	ΔG° , кДж/моль	T, К
1	$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$	-257	298
2	$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$	-33.3	298
3	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}(r)$	-228.6	298
4	$2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{SO}_3$	-141.8	400
5	$\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$	+130.4	900
6	$\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO}$	+28.6	1000
7	$\text{H}_2 + \text{I}_2 \rightleftharpoons 2\text{HI}$	-1.7	450
8	$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$	-394.4	298
9	$2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$	-514.0	350
10	$\text{FeO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}_2$	-15.0	900
11	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightleftharpoons 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$	-25.0	1000
12	$\text{ZnO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Zn} + \text{CO}_2$	+12.0	1000
13	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$	+142.0	1100
14	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-28.6	700
15	$2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	+457.2	1200
16	$\text{PCl}_5 \rightleftharpoons \text{PCl}_3 + \text{Cl}_2$	+35.0	500
17	$2\text{NO}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2\text{O}_4$	-5.0	298
18	$\text{N}_2\text{O}_4 \rightleftharpoons 2\text{NO}_2$	+5.0	298
19	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_6$	-68.0	350
20	$\text{C}_2\text{H}_6 \rightleftharpoons \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$	+68.0	700
21	$\text{MgCO}_3 \rightleftharpoons \text{MgO} + \text{CO}_2$	+95.0	800

22	$2\text{H}_2\text{S}+3\text{O}_2\rightleftharpoons 2\text{SO}_2+2\text{H}_2\text{O}$	-430.0	500
23	$\text{SiO}_2+2\text{C}\rightleftharpoons \text{Si}+2\text{CO}$	+180.0	1900
24	$\text{MnO}+\text{CO}\rightleftharpoons \text{Mn}+\text{CO}_2$	+45.0	1200
25	$\text{FeO}+\text{Mn}\rightleftharpoons \text{Fe}+\text{MnO}$	-20.0	1600

Приклад розв'язку завдання

Вихідні дані

Хімічна реакція	ΔG° , кДж/моль	T, К
$\text{FeO}+\text{Mn}\rightleftharpoons \text{Fe}+\text{MnO}$	-20.0	1600

Для зв'язку між енергією Гіббса і константою рівноваги використовуємо: $\Delta G^\circ = -RT \ln K$

Щоб знайти K , перетворимо формулу: $\ln K = \frac{-\Delta G^\circ}{RT}$

Підставляємо:

$$\ln K = \frac{-(-20000)}{8,314 \cdot 1600}$$

$$\ln K = \frac{20000}{13302,4}$$

$$\ln K \approx 1,50$$

$$K = e^{1,50} \approx 4,48$$

Аналізуємо отримане значення: це означає, що

- $K > 1$;
- у стані рівноваги переважають продукти реакції;
- рівновага зміщена вправо

Тобто більш імовірно протікання реакції в напрямку: $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$. Реакція показує, що марганець Mn взаємодіє з оксидом заліза FeO , відновлює залізо Fe і сам окиснюється до MnO . У системі переважають продукти реакції.

Визначаємо самодовільність реакції: $\Delta G^\circ = -20,0 \text{ кДж/моль} < 0$, отже реакція є термодинамічно самодовільною.

Рекомендована література

1. Хімічна термодинаміка: навчальний посібник для студентів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМФУ], 2023. - 94 с.



ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДАЛЕННЯ ДОМІШОК У ШЛАКОВУ ФАЗУ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПРОЦЕСАХ

Мета роботи – вивчити закономірності шлакового рафінування сталі та набути практичних навичок розрахунку кінцевого вмісту домішок у металі при одношлаковому та двостадійному процесах. Оцінити вплив кількості шлаку та коефіцієнта розподілу на ефективність видалення домішок і визначити ступінь рафінування металу.

Короткі теоретичні відомості

Рафінування (видалення/очищення) сталі шлаком є одним із ключових етапів сталеплавильного процесу, який спрямований на **зниження вмісту шкідливих або небажаних домішок у металі** шляхом їх переходу в іншу фазу — шлак. Такий перехід відбувається завдяки фізико-хімічній взаємодії між металом і шлаком на їхній межі поділу.

Домішка переходить у шлак тоді, коли:

- її хімічний стан у шлаку є більш стабільним (наприклад, у вигляді оксидів);
- створені сприятливі умови (окисне середовище, відповідна основність шлаку тощо).

Чим більша кількість шлаку (відносно маси металу), тим:

- більша контактна поверхня між фазами;
- більше місця для накопичення домішок;
- вища загальна ефективність рафінування.

Однак надмірна кількість шлаку:

- підвищує витрати;
- може погіршувати тепловий баланс процесу.

Коефіцієнт розподілу L_E — це величина, яка показує, як домішка розподіляється між двома фазами — шлаком і металом у стані рівноваги (характеризує, наскільки домішка «віддає перевагу» шлаку порівняно з металом).

Його визначають як відношення концентрації домішки у шлаку до її концентрації в металі:

$$L_E = \frac{(E)_{\text{шлак}}}{[E]_{\text{метал}}}$$


де (E) — вміст (концентрація) домішки у шлаку;

$[E]$ — вміст (концентрація) домішки у металі.

$L_E > 1$ → домішка переважно переходить у шлак (ефективне рафінування);

$L_E \gg 1$ → дуже ефективне видалення;

$L_E \approx 1$ → домішка розподіляється приблизно однаково;



$L_E < 1$ → домішка залишається у металі (рафінування неефективне).

Всі розрахунки базуються на балансі домішки в системі: метал – шлак – газова фаза. Його суть полягає в тому, що загальна кількість домішки в системі зберігається, але вона перерозподіляється між фазами. Для будь-якої домішки виконується умова: Надходження = Витрати + Накопичення

У сталеплавильному процесі це означає, що домішка, яка надійшла в метал, повинна:

- або залишитися в металі;
- або перейти у шлак;
- або перейти в газову фазу.

Основними джерелами надходження небажаних елементів є залізорудна сировина, металобрухт, феросплави, різноманітні легувальні та шлакоутворювальні добавки. У деяких випадках певна кількість домішок може надходити також разом із паливом або продуктами його згоряння. Саме склад шихти значною мірою визначає вихідний рівень забруднення металу сіркою, фосфором, кремнієм, вуглецем та іншими елементами, які необхідно контролювати під час плавки.

Основним механізмом очищення металу від шкідливих домішок є їх перехід у шлакову фазу. У процесі взаємодії металу зі шлаком домішки окиснюються або зв'язуються у вигляді стійких сполук, після чого переходять до шлаку у формі оксидів чи сульфідів. Ефективність такого рафінування залежить від фізико-хімічних властивостей шлаку, його основності, окиснювальної здатності, температури процесу та коефіцієнта розподілу домішки між металом і шлаком. Чим вищою є здатність шлаку поглинати домішки, тим інтенсивніше відбувається очищення металу. Саме тому контроль складу шлаку є одним із ключових факторів забезпечення високої якості сталі або чавуну.

Окрім переходу до шлакової фази, окремі домішки можуть видалятися через газову фазу. Такий механізм характерний для елементів, здатних утворювати леткі сполуки або газоподібні продукти реакцій. Найбільш характерним прикладом є вуглець, який під час окиснення утворює оксид вуглецю CO та діоксид вуглецю CO₂. Для вуглецю газова фаза є основним шляхом видалення з металу. Частково через газову фазу може видалятися і сірка, яка утворює SO₂, однак ефективність цього процесу зазвичай обмежена умовами плавки. Для фосфору перехід у газову фазу практично не відбувається, тому його видалення забезпечується переважно через шлак. Таким чином, сумарна ефективність рафінування металу визначається поєднанням процесів окиснення, шлакоутворення та газовиділення, які повинні бути оптимально організовані відповідно до технологічних умов виробництва.

Балансовий підхід у металургійних процесах рафінування тісно пов'язаний із використанням коефіцієнта розподілу домішки між металом і шлаком. Матеріальний баланс дозволяє визначити загальну кількість домішки, яка бере участь у процесі, а також встановити, яка її частина переходить із металевої фази до шлаку або газу. Водночас коефіцієнт розподілу характеризує ефективність цього переходу та показує співвідношення концентрацій домішки у шлаку і металі в умовах рівноваги. Чим більшим є значення коефіцієнта розподілу, тим ефективніше домішка вилучається з металу та концентрується у шлаковій фазі.

Загальне балансове рівняння домішки

$$[E]_0 + [E]_{\text{ших}} = [E]_k + [E]_{\text{шл}} + [E]_{\text{газ}}$$

де $[E]_0$ — початковий вміст домішки в металі;

$[E]_{\text{ших}}$ — надходження домішки з шихти, добавок, феросплавів;

$[E]_k$ — кінцевий вміст домішки в металі;

$[E]_{\text{шл}}$ — кількість домішки, що перейшла у шлак;

$[E]_{\text{газ}}$ — кількість домішки, що перейшла у газову фазу.

Більш точний запис через маси фаз:

$$[E]_0 \cdot M_{\text{мет}} + [E]_{\text{ших}} \cdot M_{\text{ших}} = [E]_k \cdot M_{\text{мет}} + [E]_{\text{шл}} \cdot M_{\text{шл}} + [E]_{\text{газ}} \cdot M_{\text{газ}}$$


У більшості розрахункових задач $[E]_{\text{ших}} = 0$ та $[E]_{\text{газ}} = 0$ тоді рівняння спрощується до:

$$[E]_0 = [E]_k + [E]_{\text{шл}}$$

Балансове рівняння домішки разом з коефіцієнтом розподілу дає можливість визначити кінцевий вміст домішки після одного контакту зі шлаком:

$$[E]_k = \frac{[E]_0}{1 + L_E \cdot \frac{M_{\text{шл}}}{100}}$$

Особливо важливим балансовий метод є при аналізі дво- та багатостадійних процесів рафінування. У таких технологіях після завершення окремої стадії шлак, насичений домішками, видаляється з системи, а подальше очищення здійснюється вже з новою шлаковою фазою. Для кожного етапу складається окремий матеріальний баланс, причому результати попередньої стадії використовуються як вихідні дані для наступної. Завдяки цьому концентрація домішок у металі



поступово зменшується від стадії до стадії, що забезпечує значно глибше очищення порівняно з одноразовим рафінуванням.

Багатостадійний підхід широко застосовується у сучасній металургії під час десульфурзації, дефосфорації та позапічної обробки сталі, оскільки дозволяє досягати дуже низьких концентрацій шкідливих елементів. Послідовне оновлення шлакової фази створює сприятливі умови для повторного переходу домішок із металу у шлак, що підвищує загальну ефективність процесу та забезпечує отримання металу високої якості.

Ступінь рафінування — це показник, який характеризує, яка частина початкової домішки була видалена з металу в процесі обробки шлаком. Саме він дає змогу кількісно оцінити ефективність очищення металу від небажаних компонентів.

Формально ступінь рафінування визначають як відношення кількості вилученої домішки до її початкового вмісту в металі, виражене у відсотках:

$$\delta = \frac{[E]_0 - [E]_k}{[E]_0} \cdot 100\%$$

де $[E]_0$ — початковий вміст домішки в металі, %;

$[E]_k$ — кінцевий, тобто залишковий вміст домішки після рафінування, %.

Ступінь рафінування показує не просто зміну концентрації, а частку очищення металу. Тобто він відповідає на питання: яку частину початкової домішки вдалося перевести зі стану в металі у шлакову фазу.

Наприклад:

якщо $\delta = 0\%$, це означає, що домішка не видалялася;

якщо $\delta = 50\%$, це означає, що з металу вилучено половину початкової кількості домішки;

якщо $\delta = 80\%$, це означає, що видалено 80% початкової домішки;

якщо $\delta \rightarrow 100\%$, процес рафінування є дуже глибоким.

Отже, чим більше значення ступеня рафінування, тим ефективніше очищення металу.

Завдання: для заданого варіанта вихідних даних (табл. 5) виконати розрахунок ефективності видалення домішки у шлакову фазу та провести порівняльний аналіз різних режимів одношлакового та двостадійного рафінування.

Таблиця 5 – Вихідні дані до практичної роботи 5

Варіант	Домішка	Початковий вміст домішки в металі, %	Одношлаковий процес: кількість шлаку $M_{шл}$, %	Одношлаковий процес: коефіцієнт розподілу L_E	Двостадійний процес			
					1-ша стадія: $M_{шл1}$, %	1-ша стадія: L_{E1}	2-га стадія: $M_{шл2}$, %	2-га стадія: L_{E2}
1	Cr	0,200	12	10	6	8	6	12
2	S	0,045	10	22	5	18	5	26
3	Mn	0,320	11	8	5	7	6	10
4	Si	0,280	9	14	4	12	5	17
5	Cr	0,180	10	9	5	8	5	11
6	P	0,095	11	20	5	17	6	24
7	S	0,060	12	24	6	20	6	28
8	Mn	0,270	10	7	5	6	5	9
9	Si	0,350	12	15	6	13	6	18
10	Cr	0,220	11	10	5	9	6	12
11	P	0,140	13	19	6	17	7	23
12	S	0,052	9	21	4	18	5	25
13	Mn	0,400	12	9	6	8	6	11
14	Si	0,310	10	13	5	11	5	16
15	Cr	0,160	9	8	4	7	5	10
16	P	0,110	10	17	5	15	5	21
17	S	0,038	11	23	5	19	6	27
18	Mn	0,290	9	6	4	5	5	8
19	Si	0,260	11	16	5	14	6	19
20	Cr	0,240	12	11	6	9	6	13
21	P	0,085	9	16	4	14	5	20
22	S	0,055	13	25	6	21	7	29
23	Mn	0,360	11	8	5	7	6	10
24	Si	0,300	10	14	5	12	5	17
25	P	0,120	12	18	6	16	6	22

Приклад розв'язку завдання

Вихідні дані

початковий вміст фосфору в металі $[P]_0 = 0,120\%$;

одношлаковий процес:

- кількість шлаку $M_{шл} = 12\%$ від маси металу;
- коефіцієнт розподілу $L_P = 18$;

двостадійний процес:

- 1-ша стадія: $M_{шл1} = 6\%$, $L_{P1} = 16$;
- 2-га стадія: $M_{шл2} = 6\%$, $L_{P2} = 22$.

1. Розрахунок для одношлакового процесу.
Залишковий вміст фосфору в металі:

$$[P]_к = \frac{[P]_0}{1 + L_P \cdot \frac{M_{шл}}{100}} = \frac{0,120}{1 + 18 \cdot \frac{12}{100}} = \frac{0,120}{3,16} = 0,03797\% \approx 0,038\%$$

Ступінь рафінування:

$$\delta = \frac{[P]_0 - [P]_к}{[P]_0} \cdot 100\% = \frac{0,120 - 0,038}{0,120} \cdot 100\% = 68,33\%$$

Кількість фосфору, видаленого у шлак

$$\Delta[P] = [P]_0 - [P]_к = 0,120 - 0,038 = 0,082\%$$

Після одноразового шлакування вміст фосфору зменшився з 0,120% до 0,038%, а ступінь рафінування становить 68,33%.

2. Розрахунок для двостадійного процесу.
Залишковий вміст фосфору в металі для 1-ї стадії:

$$[P]_{к1} = \frac{[P]_0}{\left(1 + L_{P1} \cdot \frac{M_{шл1}}{100}\right)} = \frac{0,120}{\left(1 + 16 \cdot \frac{6}{100}\right)} \approx 0,061\%$$

Залишковий вміст фосфору в металі для 2-ї стадії:

$$[P]_{к2} = \frac{[P]_{к1}}{\left(1 + L_{P2} \cdot \frac{M_{шл2}}{100}\right)} = \frac{0,061}{\left(1 + 22 \cdot \frac{6}{100}\right)} \approx 0,026\%$$

Загальний ступінь рафінування:


$$\delta_{заг} = \frac{[P]_0 - [P]_{к2}}{[P]_0} \cdot 100\% = \frac{0,120 - 0,026}{0,120} \cdot 100 = 78,33\%$$

Порівняння:

- одношлаковий процес: $[P]_к = 0,038\%$, $\delta = 68,33\%$;
- двостадійний процес: $[P]_к = 0,026\%$, $\delta = 78,33\%$.

Висновок

Двостадійне шлакування забезпечує глибше видалення фосфору, ніж одношлаковий процес навіть за тієї самої сумарної кількості шлаку.

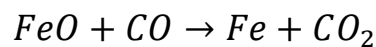


ПРАКТИЧНА РОБОТА №6 РОЗРАХУНОК УМОВ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ ЗАЛІЗА В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

Мета роботи – закріпити теоретичні знання щодо процесів непрямого відновлення оксидів заліза в доменній печі та набути практичних навичок розрахунку умов перебігу реакцій відновлення.

Короткі теоретичні відомості

У доменній печі відновлення оксидів заліза відбувається переважно за рахунок газоподібних відновників — оксиду вуглецю CO та водню H_2 . Однією з основних реакцій непрямого, або газового, відновлення є:



У цій реакції оксид заліза FeO віддає кисень оксиду вуглецю CO , унаслідок чого утворюється металеве залізо Fe та вуглекислий газ CO_2 . Такий процес називають непрямим відновленням, оскільки відновником виступає не твердий вуглець коксу, а газова фаза.

Ефективність перебігу реакції залежить від складу газової фази. Основним показником є співвідношення:

$$\frac{CO}{CO_2}$$

Чим більша частка CO і менша частка CO_2 , тим вища відновлювальна здатність газу. Якщо у газовій суміші накопичується багато CO_2 , рівновага реакції може зміщуватися у зворотному напрямку, тобто замість відновлення можливе часткове окиснення заліза.

Умовою перебігу реакції є нерівність:

$$\frac{CO}{CO_2} > K(T)$$

де $K(T)$ — рівноважне значення співвідношення газів при певній температурі. Якщо фактичне співвідношення CO/CO_2 більше за $K(T)$, реакція відновлення FeO до Fe є термодинамічно можливою. Якщо ж $CO/CO_2 < K(T)$, умови для відновлення недостатні, і процес може сповільнюватися або переходити в напрямку окиснення.

Температура також суттєво впливає на процес. З її підвищенням зростає активність відновника, прискорюється дифузія газів у порах залізородного матеріалу, а рівновага реакції зміщується в бік утворення металевого заліза. Саме тому непряме відновлення FeO найбільш

ефективно відбувається у середній зоні доменної печі за підвищених температур.

Для практичних розрахунків важливо не лише перевірити можливість перебігу реакції за співвідношенням CO/CO_2 , а й визначити кількість FeO , що фактично відновлюється, масу утвореного заліза, витрату CO та кількість CO_2 , яка утворюється внаслідок реакції. Це дозволяє оцінити ефективність газового відновлення та вплив складу газової фази на перебіг доменного процесу.

Завдання: для заданого варіанта вихідних даних (табл. 6) оцінити можливість газового відновлення FeO , визначити витрату CO , кількість утвореного CO_2 . Реакція: $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$

Таблиця 6 – Вихідні дані до практичної роботи 6

Варіант	FeO, кг	CO, %	CO ₂ , %	K(T)	Ступінь відновлення, %
1	100	30	15	1,7	80
2	110	32	14	1,8	82
3	198	42	9	2,65	94
4	130	35	12	2,0	86
5	140	36	12	2,1	88
6	150	33	14	1,85	83
7	160	37	11	2,2	89
8	170	38	10	2,3	90
9	180	31	16	1,75	81
10	190	39	10	2,4	91
11	200	40	9	2,5	92
12	115	29	15	1,65	79
13	125	33	13	1,9	84
14	135	35	14	2,0	86
15	145	37	12	2,15	88
16	155	32	15	1,8	82
17	165	36	11	2,1	87
18	175	38	12	2,3	90
19	185	34	16	2,0	85
20	195	41	9	2,6	93
21	105	30	14	1,7	80
22	118	32	13	1,85	83
23	128	34	12	1,95	85
24	138	36	13	2,1	87
25	148	37	10	2,25	89
26	158	39	11	2,35	91
27	168	33	15	1,9	84
28	178	35	13	2,05	86
29	188	40	10	2,45	92
30	120	34	13	1,9	85

Приклад розв'язку завдання

Вихідні дані

Маса FeO у шихті — 120 кг

Вміст CO у газі — 34 %

Вміст CO₂ у газі — 13 %

Рівноважне значення $K(T)$ — 1,9

Ступінь відновлення FeO — 85 %

1. Фактичне співвідношення газів $\frac{CO}{CO_2} = \frac{34}{13} = 2,62$.

Порівнюємо з $K(T)$: $2,62 > 1,9$, отже газова фаза забезпечує умови для відновлення FeO до Fe.

2. Маса FeO, яка фактично відновиться

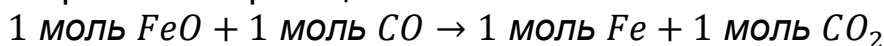
$$m_{FeO \text{ відн.}} = 120 \cdot 0,85 = 102 \text{ кг}$$

3. При молярних масах $M_{FeO} = 72 \text{ г/моль}$, $M_{Fe} = 56 \text{ г/моль}$,

маса заліза, що утвориться: $m_{Fe} = m_{FeO} \cdot \frac{M(Fe)}{M(FeO)} = 102 \cdot \frac{56}{72} = 79,3 \text{ кг}$

4. Розрахувати витрату CO та кількість утвореного CO₂

За рівнянням реакції:



При молярних масах: $M_{CO} = 28 \text{ г/моль}$, $M_{CO_2} = 44 \text{ г/моль}$

$$m_{CO} = 102 \cdot \frac{28}{72} = 39,7 \text{ кг}$$

$$m_{CO_2} = 102 \cdot \frac{44}{72} = 62,3 \text{ кг}$$

Тобто для відновлення потрібно 39,7 кг CO, утвориться 62,3 кг CO₂.

Висновок

1. За заданого складу газу співвідношення $CO/CO_2 = 2,62$, що більше за рівноважне значення $K(T) = 1,9$, тому процес відновлення FeO є можливим.

2. Із 120 кг FeO за ступеня відновлення 85 % фактично відновиться 102 кг оксиду, у результаті чого утвориться близько 79,3 кг металевого заліза. Для цього потрібно приблизно 39,7 кг CO, а кількість утвореного CO₂ становитиме 62,3 кг.

Рекомендована література

1. Губинський М. В., Тарановський В. І. Теорія і технологія доменного процесу : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2017. 498 с.

2. Туркенич Д. І., Коваленко В. Л. Фізико-хімічні основи металургійних процесів : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2021. 312 с.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №7 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОТВОРНОЇ ЗДАТНОСТІ СУМІШІ ГАЗІВ

Мета роботи – визначення теплотворної здатності газоподібного палива за його хімічним складом та розрахунок співвідношення компонентів газової суміші для отримання заданої теплотворної здатності палива, що використовується у металургійних печах.

Короткі теоретичні відомості

Теплотворна здатність суміші газів — це кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні певного об'єму газової суміші. Чим більша теплотворна здатність газу, тим більше тепла можна отримати при його спалюванні. Наприклад: доменний газ має низьку теплотворну здатність; природний газ — значно вищу; суміш газів матиме проміжне значення залежно від складу.

Теплотворна здатність залежить від вмісту горючих компонентів: CO — оксид вуглецю; H₂ — водень; CH₄ — метан; C₂H₆ — етан; C₃H₈ — пропан; H₂S — сірководень тощо.

Негорючі компоненти CO₂ — вуглекислий газ; N₂ — азот тепла не виділяють і фактично «розбавляють» паливо.

Теплотворна здатність суміші визначається як сума внесків усіх горючих компонентів:

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 126,4 \cdot \text{CO} + 108,2 \cdot \text{H}_2 + 358,5 \cdot \text{CH}_4 + 234,5 \cdot \text{H}_2\text{S} + 592 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 638,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1404 \cdot \text{C}_6\text{H}_6,$$

де 126,4, 108,2, 358,5 й т.д. — теплота згорання 1 % компонента відповідно CO, H₂, CH₄ й т.д., кДж/м³×10⁻¹ CO, H₂, CH₄ і т.д. — об'ємний процентний вміст газів у паливі.

Сумарна теплотворна здатність суміші газів складає:

$$Q = Q_1 \cdot v_1 + Q_2 \cdot v_2,$$

де Q₁, Q₂ — теплотворна здатність 1 та 2 газу, кДж/м³, v₁, v₂ — частка газу 1 та 2, частка одиниць.

Завдання: відповідно до номеру варіанту (табл. 7 – 9) виконати розрахунок часток газів у суміші для забезпечення заданої теплотворної здатності.

Таблиця 7 – Вихідні дані до практичної роботи 7

№	Газ 1	Газ 2	Теплотворна здатність суміші, кДж/м ³
1	Донецький антрацит	Калуш	7500
2	Богословське вугілля	Дашава	8000
3	Газове донецьке вугілля	Косов	8500
4	Северодонецьке вугілля	Опари	9000
5	Черемховське вугілля	Мелітопільське	9500
6	Челябінське вугілля	Ельшанське	10000
7	Підмосковне вугілля	Ставропіль північне поле	10500
8	Коксовий дріб'язок	Ставропіль південне поле	11000
9	Торф машинноформовочний	Мельнікове західне поле	11500
10	Гідроторф	Мельнікове східне поле	12000
11	Деревина (тріска)	Калуш	12500
12	Донецький антрацит	Опари	13000
13	Газове донецьке вугілля	Ельшанське	13500
14	Черемховське вугілля	Ставропіль південне поле	14000
15	Підмосковне вугілля	Мельнікове східне поле	14500
16	Торф машинноформовочний	Дашава	15000
17	Богословське вугілля	Косов	15500
18	Северодонецьке вугілля	Мелітопільське	16000
19	Челябінське вугілля	Ставропіль північне поле	16500
20	Коксовий дріб'язок	Мельнікове західне поле	17000
21	Гідроторф	Опари	17500
22	Деревина (тріска)	Мелітопільське	18000
23	Донецький антрацит	Ельшанське	18500
24	Богословське вугілля	Ставропіль північне поле	19000
25	Газове донецьке вугілля	Ставропіль південне поле	19500

Таблиця 8 – Хімічний склад газу 1

Газ	Хімічний склад газу, %					
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ S
Донецький антрациту	5,5	27,5	13,5	0,7	52,6	0,2
Богословське вугілля	8,0	24,0	13,6	2,7	51,7	—
Газове донецьке вугілля	5,0	26,5	13,5	2,8	51,9	0,3
Северодонецьке вугілля	7,0	25,0	15,0	3,0	49	1,0
Черемховське вугілля	7,0	25,5	15,5	3,2	48,7	0,1
Челябінське вугілля	5,0	30,0	13,0	2,2	49,4	0,2
Підмосковне вугілля	6,5	25,0	14,0	1,2	50,6	1,2
Коксовий дріб'язок	5,0	28,5	13,0	—	52,4	0,2
Торф машинноформовочний	8,0	28,0	15,0	3,6	45,3	0,1
Гідроторф	8,5	27,5	15,0	3,1	15,8	0,1
Деревина (тріска)	6,5	29,0	14,0	3,6	46,9	—

Таблиця 9 – Хімічний склад газу 2

Газ	Хімічний склад газу, %				
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂
Калуш	95,7	—	—	0,1	4,2
Дашава	97,8	0,5	0,35	0,05	1,3
Косов	75,7	21,3	3,0	—	—
Опари	89,0	9,1	—	—	—
Мелітопільське	98,0	—	—	0,2	1,8
Ельшанське	93,2	0,7	1,7	—	4,4
Ставропіль північне поле	97,7	—	—	0,7	1,6
Ставропіль південне поле	60,0	—	—	—	40,0
Мельнікове західне поле	55,0	—	—	0,2	44,8
Мельнікове східне поле	88,0	0,2	—	0,1	11,7

Приклад розв'язку завдання

Вихідні дані

Газ 1 - Газове донецьке вугілля; склад: CO₂ = 5%, CO = 26,5 %; H₂ = 13,5 %; CH₄ = 2,8 %; N₂ = 51,9%; H₂S = 0,3 %

Газ 2 - Ставропільське південне поле; склад: CH₄ = 60 %, N₂ = 40 %.

Теплотворна здатність суміші — 19500 кДж/м³.

1. Розрахунок теплотворної здатності газу 1.

Використаємо загальне рівняння з урахування наявних горючих компонентів:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 126,4 \cdot CO + 108,2 \cdot H_2 + 358,5 \cdot CH_4 + 234,5 \cdot H_2S + \\ &+ 592 \cdot C_2H_4 + 638,5 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1404 \cdot C_6H_6 = \\ &= 126,4 \cdot 26,5 + 108,2 \cdot 13,5 + 358,5 \cdot 2,8 + \\ &+ 234,5 \cdot 0,3 = 5884,5 \text{ кДж/м}^3 \end{aligned}$$

2. Розрахунок теплотворної здатності газу 2.

Використаємо загальне рівняння з урахування наявних горючих компонентів:

$$\begin{aligned} Q_2 &= 126,4 \cdot CO + 108,2 \cdot H_2 + 358,5 \cdot CH_4 + 234,5 \cdot H_2S + \\ &+ 592 \cdot C_2H_4 + 638,5 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1404 \cdot C_6H_6 = \\ &= 358,5 \cdot 60 = 21510 \text{ кДж/м}^3 \end{aligned}$$

3. Визначення частки газу 1 у суміші.

Задана теплотворна здатність суміші $Q_{\text{сум}} = 19500 \text{ кДж/м}^3$, яка з іншої сторони визначається як

$$Q_{\text{сум}} = Q_1 v_1 + Q_2 v_2.$$

Так як суміш складається з 2х газів, то $v_1 + v_2 = 1$.

Звідси частка газу 1 в суміші:

$$v_1 = \frac{Q_{\text{сум}} - Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{19500 - 21510}{5884,5 - 21510} = \frac{-2010}{-15625,5} = 0,129$$

Тоді частка газу 2 в суміші: $v_2 = 1 - v_1 = 1 - 0,129 = 0,871$

Переведемо частки газу у %: $v_1 = 12,9\%$ та $v_2 = 87,1\%$

Висновок

Для отримання суміші з теплотворною здатністю 19500 кДж/м^3 необхідно взяти:

газове донецьке вугілля — 12,71 %;

газ Ставропольського південного поля — 87,29 %.

Рекомендована література

1. Бойко В. С., Болгаров М. І. Теоретичні основи теплотехніки : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. 356 с.



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

Загальні положення

Індивідуальне завдання (ІЗ) виконується з метою поглибленого самостійного вивчення окремих теоретичних та практичних питань навчальної дисципліни. Завдання складається з двох частин, які оцінюються комплексно.

1 частина – письмова робота (реферат), який розкриває зміст обраної теми; оцінюється від 0-5 балів;

2 частина – публічна презентація ключових положень реферату на семінарському занятті; оцінюється від 0-10 балів;

Вимоги до оформлення «Реферату»

Реферат має бути оформлений відповідно до стандартів наукових робіт і повинен мати чітку структуру.

Рекомендована структура реферату:

- Титульний аркуш;
- Зміст;
- Вступ (1 сторінка);
- Основна частина (5-8 сторінок);
- Висновки (1-2 сторінки)
- Перелік посилань (не менше 3 джерел);

Формат аркушу А4, односторонній друк.

Поля: верхнє, нижнє – 20 мм; ліве – 30 мм; праве – 10 мм.

Шрифт: Arial, розмір 14 пт.

Абзац звичайного тексту вирівнювання по-ширині; міжрядковий інтервал полуторний 1,5.

Нумерація сторінок наскрізна, починаючи з титульного аркуша (на якому номер не ставиться), номер ставиться у правому верхньому куті.


Приклад оформлення титульного аркушу Реферату наведено в Додатку А.

Зміст складається з перелік усіх розділів, підрозділів та додатків із зазначенням їхніх початкових сторінок, починаючи зі ВСТУПУ.

Вступ має об'єм 1-2 сторінки. У вступі наводиться обґрунтування актуальності теми реферату, визначення мети та завдань роботи.

Основна частина може поділятися на 2-3 логічні розділи та підрозділи. Основна частина містить аналіз літературних джерел, розкриття теоретичних положень та практичного матеріалу.

Реферат має бути авторською роботою. **Категорично забороняється плагіат** (дослівне або приховане копіювання чужого тексту без належного цитування). Використання генеративних моделей Штучного Інтелекту (ШІ) для написання або генерації основного змісту тексту реферату не допускається. ШІ може бути використаний лише для допоміжних цілей (наприклад, пошук літератури, перевірка граматики,



форматування цитат), за умови, що це обов'язково зазначається у вступі або примітках до роботи.

Вимоги до підготовки «Доповіді»

Доповідь є стислою, логічною та публічною презентацією ключових результатів аналізу літературних джерел викладених у тексті реферату.

Вимоги до змісту доповіді

- Тривалість: до 5 хвилин.
- Стислість: Охоплення лише найбільш важливих аспектів теми.
- Логіка: Чітка послідовність викладу: актуальність → мета/завдання → основні результати → висновки.


Вимоги до презентації (Слайди)

Для візуалізації матеріалу необхідно підготувати презентацію за допомогою стандартного програмного забезпечення MicroSoft Office PowerPoint.

Орієнтовний перелік тем індивідуальних завдань №1 та №2 наведено нижче. Студент може обрати тему на свій розсуд, або запропонувати свою за попереднім погодженням з викладачем.


Перелік тем індивідуальних завдань №1

1. Сучасні уявлення про молекулярну та іонну будову сталеплавильних шлаків.
2. Вплив хімічного складу шлаку на його фізичні та хімічні характеристики.
3. Значення основності шлаку в металургійному виробництві.
4. В'язкість сталеплавильних шлаків та її роль у роботі кисневого конвертера.
5. Термодинамічні підходи до визначення активності FeO у шлакових системах.
6. Вплив активності оксиду заліза на перебіг окиснювальних реакцій у металі.
7. Фізико-хімічні властивості сталеплавильних шлаків: температура плавлення, електропровідність і поверхневий натяг.
8. Структура рідкого заліза: сучасні наукові підходи.
9. Розчинення газів у рідкому залізі та їх вплив на властивості сталі.
10. Хімічна рівновага в металургії: особливості ідеальних та реальних систем.
11. Вплив температури та інших термодинамічних факторів на рівновагу металургійних процесів.

- 
12. Ентальпія та ентропія як енергетичні фактори металургійних реакцій.
 13. Експериментальні способи визначення активності компонентів сталеплавильних систем .
 14. Значення коефіцієнта активності у металевих і шлакових розчинах.
 15. Термодинамічне моделювання активності оксидів у шлакових розплавах.
 16. Використання рівняння Гіббса для аналізу процесів окислення та відновлення у сталеплавильних агрегатах.
 17. Особливості розрахунку рівноваги між металом і шлаком у кисневому конвертері.
 18. Вплив температури та тиску на рівноважний стан сталі.
 19. Ізобарно-ізотермічний потенціал як показник напрямку перебігу металургійних реакцій.
 20. Застосування ізобарно-ізотермічного потенціалу для оцінки процесів розкислення сталі.
 21. Хімічна взаємодія елементів у рідкому металі та формування складу сталі.
 22. Ізобарно-ізотермічний потенціал як критерій ефективності хімічних процесів у металургії.
 23. Термодинамічні та кінетичні особливості розчинення вуглецю в рідкому залізі.
 24. Взаємодія кремнію, марганцю та фосфору з рідкометалевою фазою.
 25. Вплив газових домішок (кисню, азоту, водню) на якість сталі.
 26. Поверхнева енергія рідкого металу та її роль у процесах рафінування сталі.
 27. Особливості змочування неметалевих включень рідким металом: адгезійні та когезійні явища.
 28. Адсорбційні процеси та їх значення у сталеплавильних реакціях.

Перелік тем індивідуальних завдань №2

1. Теплові та хімічні явища горіння коксу у фурменій зоні доменної печі.
2. Вплив природного газу та пиловугільного палива на газодинаміку фурменого осередку.
3. Чинники формування конфігурації та розмірів фурменого вогнища.
4. Залежність температури і складу газів у фурменій зоні від параметрів дуття.
5. Зміна складу доменного газу по висоті доменної печі.
6. Основні закономірності взаємодії газової фази з компонентами шихти.

- 
7. Процеси окиснення чавуну в горні доменної печі: механізм та кінетичні особливості.
 8. Умови та фактори повторного відновлення заліза в нижніх зонах печі.
 9. Організація ефективного протитечійного руху газів і шихти у доменній печі.
 10. Вплив гранулометричного складу шихтових матеріалів на газодинамічний режим роботи печі.
 11. Особливості переміщення шихтових матеріалів у шахті доменної печі.
 12. Вплив форми та крупності шихтових матеріалів на швидкість їх руху в печі.
 13. Характер руху доменного газу у шахті та горновій частині печі.
 14. Причини нерівномірного розподілу газових потоків у доменній печі.
 15. Способи завантаження шихтових матеріалів у доменну піч: характеристика та оцінка ефективності.
 16. Значення вуглецю та газових відновників у процесах відновлення оксидів заліза.
 17. Термодинамічні особливості реакцій відновлення оксидів заліза в доменному процесі.
 18. Вплив температури та парціального тиску газів на рівновагу реакцій відновлення оксидів заліза.
 19. Механізм прямого і непрямого відновлення оксидів заліза та їх технологічні особливості.
 20. Технологічні та енергетичні характеристики процесів прямого й непрямого відновлення заліза.
 21. Кінетика та механізм відновлення оксидів заліза газами CO і H₂.
 22. Вплив температури, газового середовища та пористості руди на швидкість відновлення заліза.
 23. Вплив виду шихтових матеріалів (руда, агломерат, окатки) на ефективність відновлювальних процесів.
 24. Роль вологості та гранулометричного складу шихти у відновленні оксидів заліза.
 25. Дослідження впливу параметрів дуття на інтенсивність відновлення оксидів заліза в доменній печі.
 26. Аналіз процесів відновлення заліза при використанні альтернативних відновників: водню та природного газу.
 27. Послідовність перетворення оксидів заліза ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$) у доменному процесі.
 28. Функції вуглецю та газоподібних відновників у відновленні оксидів заліза.
 29. Термодинамічне дослідження реакцій відновлення оксидів заліза у доменній печі.

Додаток А

Приклад оформлення титульного листа індивідуального завдання



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Департамент фахової передвищої освіти

Індивідуальне завдання _____

на тему _____

Виконав:

студент групи _____

Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Прийняв:

Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Запоріжжя 202_

Додаток Б

Приклади оформлення бібліографічних посилань

Хар-ка джерела	Приклад оформлення
Книги: Один автор	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дичківська О. О. Інноваційний менеджмент: конспект лекцій. Київ : ДІА, 2018. 82 с. 2. Бондаренко В. Г. Історія України. Львів, 2017. 153 с. 3. Лазор О. Я. Державне управління у сфері реалізації екологічної політики в Україні: організаційно-правові засади: монографія. Львів : Ліга-Прес, 2003. 542 с. 4. Ваш О. М. Етика : навч.-метод. посіб. Запоріжжя: ЗНУ, 2018. 104 с. 5. Гурманова Л. І. Релігієзнавство: навч. посіб. 2-ге вид., переробл. та допов. Київ : ЦУЛ, 2017. 193 с.
Два автори	<ol style="list-style-type: none"> 1. Мартиненко З. Е., Макар І. В. Управління підприємством: теоретико-методичні засади: монографія. Харків: Щедра садиба плюс, 2017. 296 с. 2. Палеха В. І., Карпова П. В. Менеджмент організацій: навч. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2015. 120 с. 3. Білоус С. І., Корнійчук В. П. Філософія освіти: навч.-метод. посіб. Переяслав-Хмельницький, 2016. 176 с. 4. Мороз І. С., Василенко Н. Ю. Маркетинг: конспект лекцій. Київ : Молодь, 2016. 102 с. 5. Вердіна С. А., Волков А. А. Контролінг: навч. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2016. 131 с. 6. Вердіна С. А., Волков А. А. Контролінг: навч. посіб. Вид. 3-тє., переробл. та допов. Херсон, 2017. 212 с.
Три автори	<ol style="list-style-type: none"> 1. Тарнавська Г. Я., Марценюк Н. С., Герасимова Т. М. Фінанси: навч. посіб. Львів : Магнолія 2006, 2017. 412 с. 2. Пустовенко В. В., Максименко І. Л., Яким А.С. Безпека життєдіяльності: монографія. Харків : ХНПУ, 2017. 348 с.
Чотири автори	<ol style="list-style-type: none"> 1. Інновації: навч. посіб. / Гуревич Д. Т., Чекан О. С., Грибан О. М., Макарова В. В. Запоріжжя: ЗНУ, 2016. 389 с. 2. Вища математика: конспект лекцій / Ткачук Т.С. та ін. Київ, 2015. 82 с.
П'ять і більше авторів	<ol style="list-style-type: none"> 1. Операційний менеджмент: підручник / С. М. Поплавська та ін. Київ: ЦУЛ, 2011. 267 с. 2. Охорона праці: навч. посіб. / О. І. Подольська та ін. 2-ге вид. Київ: ЦУЛ, 2017. 264 с. 3. Науково-практичний коментар Цивільного кодексу України: станом на 10 жовт. 2017 р. / К. І. Мягченко та ін.; за заг. ред. І. М. Ливанова. Київ : ЦУЛ, 2017. 428 с.
Автор(и) та редактор(и)/упорядники	<ol style="list-style-type: none"> 1. Веретенко В. В. Міжнародний маркетинг: монографія / за заг. наук. ред. В. М. Марценюка. Київ, 2015. 374 с. 2. Бутенко М. П., Качур В. П., Петренко С. В. Психологія: навч. посіб. / за ред. М. П. Дутко. Київ: ЦУЛ, 2017. 332 с.

Продовження Додатку Б

Без автора	<ol style="list-style-type: none"> 1. 30 років історичному факультету: історія та сьогодення (1986-2016): ювіл. вип. / під заг. ред. В. В. Черепані. Запоріжжя : ЗНУ, 2016. 340 с. 2. Етнографія : конспект лекцій / за заг. ред. В. І. Гарапка; уклад. А. І. Гарапка. Київ: ЦУЛ, 2018. 320 с. 3. Міжнародні відносини: монографія / за ред. М. А. Березовського. Київ: ЦУЛ, 2016. 162 с. 4. Міжнародні економічні відносини: навч. посіб. / за ред.: П. О. Бедрія, О. О. Петренка. Одеса: ОНУ, 2015. 306 с. 5. Науково-практичний коментар Цивільного кодексу України / за заг. ред. Т. А. Тарнавського. Київ: ЦУЛ, 2016. 186 с. 6. Підготовка фахівців у ВНЗ в умовах реформування вищої освіти: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Мукачево, 4-5 жовт. 2018 р. Мукачево: МДУ, 2018. 226 с. 7. Освіта в Україні: виклики модернізації: зб. наук. пр. / редкол.: П. М. Марценюк (відп. ред.) та ін. Київ: Ін-т всесвітньої історії НАН України, 2017. 319 с. 8. Товарознавство / упоряд. В. Олексик. Київ, 2014. 804 с.
Багатотомні видання	<ol style="list-style-type: none"> 1. Енциклопедія рослин / редкол.: І. М. Деркач та ін. Київ : ЦУЛ, 2016. Т. 8. 812 с. 2. Безруков В. Д. Поезія: у 2 т. / ред. вид.: Л. Р. Мороз, А. Р. Мягченко; авт. вступ. ст. А. В. Сипіна. Київ; Мелітополь: НПУ ім. М. Драгоманова; МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2016. Т. 2. 206 с. 3. Новицький О. М. Твори: о 4 т. / ред. вид.: Н. Г. Мозгова, А. Г. Волков; авт. вступ. ст. Н. Г. Мозгова. Київ; Мелітополь: НПУ ім. М. Драгоманова; МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2017. Т. 1. 382 с. 4. Бюджетна система України: історія, стан та перспективи: у 3 т. / Акад. прав. наук України. Львів: Право, 2012. Т. 2 : Бюджетний менеджмент / заг. ред. Ю. П. Бубряка. 476 с. 5. Кучеренко Н. П. Казначейська справа : в 6 т. Київ: Право, 2016. Т. 3: Контроль у системі Державного казначейства. 432 с. 6. Дендрофлора України. В 12 т. Т. 2. Дикорослі та культивовані дерева і кущі. Вип. 1. Покритонасінні / Л.І. Перхоменко. Київ: Наукова думка, 2012. 200 с.
Автореферати дисертацій	<ol style="list-style-type: none"> 1. Петров О. Г. Музикотерапія : автореф. дис. ... канд. псих. наук : 12.00.06. Київ, 2009. 40 с.
Дисертації	<ol style="list-style-type: none"> 1. Петрук Л. А. Дослідження статичного деформування складених тіл: дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.02.04. Львів, 2004. 140 с. 2. Винниченко О. М. Контроль соціально-економічного розвитку промислових підприємств: дис. ... д-ра екон. наук : 08.00.04. Київ, 2018. 344 с.
Законодавчі та нормативні документи	<ol style="list-style-type: none"> 1. Конституція України: офіц. текст. Київ: КМ, 2015. 98 с. 2. Конституція України: станом на 1 жовтня 2017 р. / Верховна Рада України. Київ : Право, 2017. 93 с. 3. Про вищу освіту: Закон України від 05.09.2016 р. № 2145-VIII. Голос України. 2016. 27 верес. (№ 178-179). С. 10–22.

Продовження Додатку Б

Законодавчі та нормативні документи	<ol style="list-style-type: none"> 4. Податковий кодекс України: Закон України від 19.05.2011 р. № 3393-VI. Відомості Верховної Ради України. 2011. № 48-49. Ст. 536. 5. Про освіту: Закон України від 01.07.2014 р. № 1556-VII. Дата оновлення: 28.09.2018. URL:http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/1556-18 (дата звернення: 15.11.2018). 6. Питання соціального забезпечення: Постанова Кабінету Міністрів України від 28.12.2017 р. № 1060. Офіційний вісник України. 2018. № 5. С. 430–443. 7. Про інформування громадськості з питань євроатлантичної інтеграції України на 2019-2020 роки: Указ Президента України від 21.02.2018 р. № 43/2018. Урядовий кур'єр. 2018. 23 лют. (№ 35). С. 10. 8. Про затвердження Вимог до оформлення кандидатської дисертації: наказ Міністерства освіти і науки від 12.01.2018 р. № 50. Офіційний вісник України. 2018. № 25. С. 139–141. 9. Інструкція щодо порядку оформлення і ведення особових справ отримувачів усіх видів соціальної допомоги: затв. наказом М-ва. праці та соц. політики від 19.09.2006 р. № 156. Баланс-бюджет. 2006. 19 верес. (№ 18). С. 15–16.
Архівні документи	<ol style="list-style-type: none"> 1. Лист Голови Спілки «Первоцвіт» Г. Ф. Петренка на ім'я Голови Ради Міністрів УРСР В. А. Поповича щодо реєстрації Статуту Спілки та сторінки Статуту. 14 грудня 1989 р. ЦДАГО України (Центр. держ. архів громад. об'єднань України). Ф. 1. Оп. 32. Спр. 2612. Арк. 63, 64 зв., 71.
Патенти	<ol style="list-style-type: none"> 1. Зернозбиральний комбайн: пат. 25742 Україна: МПК6 C09K11/00, G01T1/28, G21H3/00. № 200701472; заявл. 12.02.07; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. 4 с. 2. Спосіб лікування гіперактивності у дітей: пат. 76509 Україна. № 2004042416; заявл. 01.04.2004; опубл. 01.08.2006, Бюл. № 8 (кн. 1). 120 с.
Препринти	<ol style="list-style-type: none"> 1. Марченко М. І., Кополович А. Д., Яким Б. М. Про точність визначення радіоактивних відходів гамма-методами. Чорнобиль : Ін-т з проблем безпеки АЕС НАН України, 2006. 7, [1] с. (Препринт. НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС; 06-1). 2. Федорченко Б. А., Смотрич В. Н. Радіаційне пошкодження матеріалів нейтронами джерела ННЦ ХФТІ/ANL USA з підкритичним складанням, що керується прискорювачем електронів. Харків: ННЦ ХФТІ, 2006. 19 с.: Іл., табл. (Препринт. НАН України, Нац. наук. центр «Харк. фіз.-техн. ін-т»; ХФТІ2006-4).
Стандарти	<ol style="list-style-type: none"> 1. ДСТУ 7152:2010. Видання. Оформлення публікацій у журналах і збірниках. [Чинний від 2010-02-18]. Вид. офіц. Київ, 2010. 16 с. (Інформація та документація). 2. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила (ISO 4:1984, NEQ; ISO 832:1994, NEQ). [На заміну ДСТУ3582-97; чинний від 2013-08-22]. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 15 с. (Інформація та документація).

Продовження Додатку Б

Стандарти	<ol style="list-style-type: none"> 3. ДСТУ 7152:2010. Видання. Оформлення публікацій у журналах і збірниках. [Чинний від 2010-02-18]. Вид. офіц. Київ, 2010. 16 с. (Інформація та документація). 4. ДСТУ ISO 6107-1:2004. Якість води. Словник термінів. Частина 1 (ISO 6107-1:1996, IDT). [Чинний від 2005-04-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 181 с. 5. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила (ISO 4:1984, NEQ; ISO 832:1994, NEQ). [На заміну ДСТУ3582-97; чинний від 2013-08-22]. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 15 с. (Інформація та документація).
Каталоги	<ol style="list-style-type: none"> 1. Прокопенко І. П. Каталог рослин для робіт з екодизайну / Донець. ботан. садок НАН України. Донецьк: Лебідь, 2005. 228 с. 2. Історична спадщина України : кат. вист. / Харків. держ. наук. б-ка ім. В. Г. Короленка; уклад.: Л. І. Петров, О. В. Олійник. Харків, 2000. 64 с. 3. Пам'ятки історії та мистецтва Закарпатської області: кат.-довід. / авт.-упоряд.: М. Петрик та ін.; Упр. культури Закарпат. облдержадмін., Закарпат. іст. музей. Ужгород, 2003. 160 с.
Бібліографічні покажчики	<ol style="list-style-type: none"> 1. Боротьба з злочинністю: нагальна проблема сучасності: бібліогр. покажч. Вип. 3 / уклад.: О. В. Куріпта, відп. за вип. Н. М. Щур; Запорізький національний університет. Запоріжжя, 2017. 60 с. 2. Іван Марченко : біобібліогр. покажч. / уклад. В. Петрик. Львів: Вид. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2003. 356 с. (Українська біобібліографія ; ч. 9).
<p>Аналітичний бібліографічний запис Складова частина видання (глави, розділу, статті) розділовий знак «дві навскісні риски» («//») можна замінювати крапкою, а відомості про документ (його назву), виділяти шрифтом (наприклад, <i>курсивом</i>).</p>	
Частина видання: книги	<ol style="list-style-type: none"> 1. Петренко М. А. Міжнародне право та роль Конституційного Суду України // Максим Петренко: право як буття вченого: зб. наук. пр. до 60-річчя проф. М. А. Петренко / упоряд. та відп. ред. Ю. О. Волошин. К., 2009. С. 477-493. 2. Якса А. П. Економічна політика держави. Двадцять п'ять років з економічним правом : вибрані праці. Харків, 2017. С. 205–212. 3. Корнійчук Т. О. Методи активізації навчально-пізнавальної діяльності. Педагогіка : навч. посіб. / за заг. ред. Т. О. Корнійчука. Київ, 2017. С. 195–197.
Частина видання матеріалів конференцій (тези доповіді)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Максименко Д. В. Методи оперативної діагностики виробничої діяльності підприємства // Зростання ролі бухгалтерського обліку в сучасній економіці : збірник тез та доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 21 лютого 2013 р.) / відпов. за випуск Мельничук Б.В. Київ, 2013. С.331–335.

Продовження Додатку Б

Частина видання матеріалів конференцій (тези доповіді)	<ol style="list-style-type: none"> 2. Лалак Н. В. Шляхи підвищення мотивації молодших школярів до навчання // Анотовані результати науково-дослідної роботи інституту педагогіки за 2011 рік : збірник тез повідомлень. Київ, 2012. С.202–203. 3. Цехмістров І. І., Перець І.П. Про бюджет. Дослідження проблем в Україні очима молодих вчених: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 3-4 берез. 2016 р. Запоріжжя, 2016. С. 50–53.
Частина довідкового видання	<ol style="list-style-type: none"> 1. Павлик І. М. Право інтелектуальної власності. Великий енциклопедичний юридичний словник / ред. Ю. С. Шемшученко. Київ, 2007. С. 683. 2. Дичківська І.М. Інноваційні педагогічні технології. Основи педагогіки освіти: словник термінів / за ред.: Т. О. Дмитрука, В. К. Колпакова. Київ, 2014. С. 54–55.
Частина видання: продовжуваного видання	<ol style="list-style-type: none"> 1. Куцінко Т. О. Адміністративне законодавство України: реалії та перспективи формулювання // Вісник Запорізького національного університету. Юридичні науки. Запоріжжя, 2017. № 1. С. 36–46. 2. Безруков С. А., Хмельов А. А. Дослідження циліндричних оболонки. Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки. Запоріжжя, 2015. № 3. С. 153–159. 3. Хорошилова С. А., Малафіїк Л. О., Хмельов А. А. Моделювання складеної конструкції за допомогою матриць типу Гріна. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Дніпропетровськ, 2012. Вип. 19. С. 212– 218.
Частина видання: періодичного видання (журналу, газети)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Кучеренко О. О. Конституційні права людини і громадянина // Часопис Київського університету права. 2007. № 4. С. 88–92. 2. Коваль Л., Коваль П. Переваги дистанційної роботи. Урядовий кур'єр. 2017. 1 листоп. (№ 205). С. 5. 3. Bletskan D. I., Glukhov K. E., Frolova V. V. Electronic structure of 2H-SnSe₂. Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics. 2017. Vol. 18, No 2. P. 109–118.
Електронні ресурси	<ol style="list-style-type: none"> 4. Україна очима дітей: фотовиставка. URL: http://www.kmu.gov.ua/control/uk/photogallery/gallery?galleryId=15725757& (дата звернення: 15.11.2017). 5. Хміль А. А. Функції державної служби за законодавством України // Юридичний науковий електронний журнал. 2017. № 5. С. 115–118. URL: http://lsey.org.ua/5_2017/32.pdf. 6. Хміль І. О. Шляхи подолання правового нігілізму в Україні. Вісник Запорізького національного університету. Юридичні науки. Запоріжжя, 2016. № 3. – С. 20–27. – URL: http://ebooks.znu.edu.ua/files/Fakhovivydannya/vznu/juridichni/VestUr20_15v3/5.pdf. (дата звернення: 15.11.2017). 7. Куцкір Я. С., Махно Б. А., Борислав С. Г. Трансформація науково- педагогічної системи України протягом 90-х років ХХ століття: період переходу до ринку. Наука та інновації. 2016. Т. 12, № 6. С. 6–14. DOI: https://doi.org/10.15407/scin12.06.006.



Навчально-методичне видання

Малій Олександр Геннадійович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛУРГІЇ:
методичні рекомендації
до виконання практичних та індивідуальних завдань

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції