

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет

О. В. Харченко
Н. В. Лічконенко
В. О. Панова

КОНВЕРТЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ

Методичні вказівки до практичних занять
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності 136 “Металургія”
освітньо-професійної програми “Металургія чорних металів”

Затверджено
Вченою радою ЗНУ
Протокол № ____ від _____ 2019 р.

Запоріжжя
2019

УДК 669.18

Харченко О.В., Лічконенко Н.В., Панова В.О. Конвертерне виробництво сталі: методичні вказівки до практичних занять для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 “Металургія” освітньо-професійної програми “Металургія чорних металів”. – Запоріжжя: ЗНУ, 2019. – 26 с.

Методичні вказівки призначені для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 «Металургія», які виконують практичні завдання з дисципліни «Конвертерне виробництво сталі». Вказівки містять загальні відомості з конвертерного виробництва сталі та практичні роботи з моделювання й оптимізації виплавки сталі в кисневому конвертері за допомогою навчально-дослідницької програми «Excalibur».

Рецензент

О.Г. Кириченко, к.т.н., доц. кафедри Металургії

Відповідальний за випуск

Ю.Ф. Терновий, д.т.н., проф., заст. кафедри Металургії

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Загальні відомості про конвертерне виробництво сталі	4
2. Практичні роботи із застосуванням багатфункціональної програми «Excalibur»	6
2.1. Призначення й можливості програми	6
2.2. Інтерфейс користувача програми «Excalibur»	9
2.3. Практична робота № 1. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і брухту в кисневому конвертері з основною футеровкою	12
2.4. Практична робота № 2. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням брухту і високофосфористого чавуну в кисневому конвертері з основною футеровкою	14
2.5. Практична робота № 3. Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням брухту і кремністого чавуну в кисневому конвертері з кислою футеровкою	16
2.6. Практична робота № 4. Оптимізація витрати кисню і чавуну при отриманні низьковуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері з основною футеровкою	18
2.7. Практична робота № 5. Зміна поточних параметрів плавки в ході продувки киснем при отриманні низьковуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері з основною футеровкою	20
2.8. Практична робота № 6. Вплив конвертерного шлаку на параметри розкислення напівспокійної конструкційної сталі Зпс	22
2.9. Практична робота № 7. Моделювання реакційної зони і розрахунок втрат заліза при продувці чавуну в кисневому конвертері	24
Список використаної літератури	26
Список рекомендованої літератури	26

ВСТУП

Конвертерне виробництво – одержання сталі продуванням рідкого чавуну повітрям або технічно чистим киснем у конверторах. У процесі конвертерного виробництва чавун перетворюється на сталь внаслідок окислення домішок (вуглецю, кремнію, марганцю та інших) і наступного їх видалення з розплавленого металу. Конвертерне виробництво не потребує палива, адже окислення домішок і заліза відбувається з виділенням тепла. Конвертерне виробництво відрізняється від мартенівського та інших способів виробництва сталі високою продуктивністю і нескладністю технології.

Першим конверторним процесом був бесемерівський процес, потім був розроблений томасівський процес. У ХХ столітті було впроваджено киснево-конверторний процес, що став найпоширенішим конверторним процесом. Використання технічно чистого кисню з невеликим вмістом азоту ($\leq 0,5\%$) дає змогу одержувати сталь високої якості, переробляти у конверторах значну кількість металевого брухту. Така сталь за пластичністю, ударною в'язкістю та іншими властивостями рівноцінна мартенівській сталі або перевершує її.

Серед різних способів виробництва сталі киснево-конвертерний процес з 70-х років ХХ століття посів перше місце в світовій практиці. Згідно з даними Світової асоціації сталі (World Steel Association), за підсумками 2018 року світове виробництво сталі склало 1808,6 млн. тонн, з яких 70%, тобто 1266 млн. тонн, було вироблено в кисневих конвертерах. Сучасне конвертерне виробництво являє собою поєднання технологій виплавки, позапічної обробки і безперервного розливання.

1. Загальні відомості про конвертерне виробництво сталі

В створення і розвиток киснево-конвертерного процесу внесли вклад інженери і вчені багатьох країн. Ще Бессемер запропонував продувати чавун чистим киснем зверху через фурму, занурену в метал (Британський патент № 356, 1856 г.). До думки про використання кисню в сталеплавильному виробництві зверталися основоположник сучасного металознавства Д. К. Чернов в 1876 р і творець Періодичної системи елементів Д. І. Менделєєв в 1903 р

Але збагачення дуття киснем, як і будь-яке проміжне рішення, яке не дозволяло повністю вирішити всі проблеми, що виникають перед сталеплавильним виробництвом, і тому на перший план вийшло завдання використання в якості дуття чистого кисню. Перші дослідження із застосування чистого кисню для продувки чавуну були здійснені в 1932-1933 рр. практично одночасно Н. І. Мозговим в СРСР, Дюрером і Шварцем в Німеччині.

Особливо широко розгорнулися роботи по застосуванню чистого кисню в другій половині ХХ століття, коли загострилася необхідність в створенні сталеплавильного процесу з високою продуктивністю, що дозволяє отримувати сталь високої якості у великих масштабах, і вже було створено обладнання для отримання у великій кількості порівняно дешевого чистого кисню. Були

випробувані різні варіанти подачі кисню – зверху з зануренням фурми в розплав (Н. І. Мозговий, Дюрер), знизу (Леллеп, В. В. Кондаков), збоку (Дюрер, Хеллбрюгге). Однак через низьку стійкості дутцевих пристроїв і вогнетривів для футеровки конвертерів, незадовільного протікання шлакоутворення довгий час не вдавалося створити працездатний процес.

Австрійським інженерам Суессу, Трінклеру, Хаутману, Рінешу і іншим, що розташували фурму над ванною, вдалося вирішити як проблему стійкості фурм, так і завдання поліпшення шлакоутворення. У листопаді 1952 р. в місті Лінці (Австрія) почав працювати перший в світі киснево-конвертерний цех.

Роком пізніше, в грудні 1953 р., в місті Тулі радянськими вченими і інженерами була введена до експлуатації перша в світі установка безперервного розливання сталі.

У 1966 р в місті Липецьку (СРСР) був пущений конвертерний цех, в якому вперше в світі всю виплавлену сталь розливали на установках безперервного розливання. З цього моменту поєднання конвертерів з безперервним литтям стало генеральним напрямом розвитку сталеплавильного виробництва в світі. Дещо пізніше невід'ємним елементом технології виробництва киснево-конвертерної сталі стала позапічна обробка металу.

Переваги киснево-конвертерного способу виробництва сталі – висока продуктивність, екологічна чистота, простота управління, низькі питомі капіталовкладення, велика гнучкість як в частині здійснення технологічних варіантів, так і у виборі сировинної бази, можливість виробництва високоякісної сталі широкого сортаменту з чавуну різного хімічного складу, переробка великої кількості металобрухту – забезпечили його швидке поширення в світі. У 1952 р. працював один промисловий конвертер, в 1962 р. – 94, в 1985 р. – 682, в 1988 р. – 657. Зменшення числа конвертерів в останні роки зумовлено виведенням з експлуатації застарілих агрегатів невеликої ємності.

Кількісний ріст виплавки конвертерної сталі супроводжувався значним поліпшенням технології і обладнання.

Застосування багатосоплових фурм замість односоплових дозволило збільшити інтенсивність продувки з $1,5-2 \text{ м}^3/(\text{хв}\cdot\text{т})$ до $3-4 \text{ м}^3/(\text{хв}\cdot\text{т})$ в конвертерах будь-якої ємності. Це призвело до підвищення їх продуктивності і, як наслідок, до подальшого збільшення розриву між продуктивністю кисневих конвертерів та інших сталеплавильних агрегатів. Продуктивність 400-т конвертера – понад 600 т/год, що в 4 рази більше продуктивності 900-т мартенівської печі і в 4-6 разів більше продуктивності найпотужнішої електропечі.

Впровадження системи відводу конвертерних газів без допалювання знизило капіталовкладення в будівництво цеху, зняло обмеження по ємності конвертерів і інтенсивності продувки, дало можливість використовувати CO , що міститься в газах, в якості палива. Організація допалювання CO до CO_2 в порожнині конвертера розширила можливості процесу по переробці металобрухту.

Вдування порошкоподібного вапна значно поліпшило техніко-економічні показники переділу фосфористих чавунів.

Автоматизація управління технологією конвертерної плавки з використанням зондових установок забезпечила можливість досягнення заданих кінцевих параметрів металу при мінімальних витратах.

Широке впровадження засобів позапічної обробки чавуну і сталі дозволило виробляти метал з низьким вмістом шкідливих домішок і газів.

Поліпшення якості вогнетривів, смолоскипне торкретування футеровки конвертерів підвищили стійкість футеровки до 1500-2000 плавок. У світовій практиці досягнута стійкість футеровки складає більше 3000 плавок.

Поєднання конвертерів з установками безперервного розливання сталі знизило витрата металу на прокат на 14-15%, підвищило продуктивність праці на 5-15%, зменшило витрати умовного палива на 60-70 кг/т заготівок.

Новий етап у розвитку конвертерного способу виробництва сталі почався з появою комбінованих процесів – з продувкою ванни зверху і знизу.

До кінця ХХ століття на комбіноване продування було переведено близько 75% конвертерів Японії і Західної Європи; більшість конвертерів США і Канади або вже працюють з комбінованою продувкою, або переводяться на неї. Широка програма переобладнання конвертерів для роботи з комбінованою продувкою здійснювалася також в країнах СНД.

В довгостроковій комплексній міжгалузевої програмі ставиться завдання економного та раціонального використання металу в народному господарстві. Потреба народного господарства в металопродукції необхідно забезпечити практично без збільшення виплавки чавуну, сталі, видобутку руди і виробництва коксу. Цю задачу можна вирішити, зокрема, шляхом розширення сортаменту сталі, підвищення якості та зменшення відходів при переробці прокату в готові вироби.

Намічається також широко впроваджувати мікролеговані сталі для підвищення службових характеристик металу, зокрема, міцностних властивостей (тимчасовий опір до 600-700 МПа), пластичності, ударної в'язкості і гідності до штампування.

Вирішення цих завдань може бути забезпечено в конвертерних цехах, оснащених широким набором засобів позапічної обробки металу та установками безперервного розливання.

2. Практичні роботи із застосуванням багатофункціональної програми «Excalibur»

2.1. Призначення й можливості програми

Якщо агрегат для обробки сталі представити у вигляді системи, на вході якої заданий вектор незалежних керуючих змінних X (як то: рідкий метал і шлак, феросплави, енергоносії, тиск і початкова температура), а на виході – вектор залежних змінних Y , таких як метал, шлак і газ певного кінцевого складу і маси, кінцева температура, то визначення функції $Y(X)$ становить *пряму задачу* фізико-хімічного моделювання такої системи. Відповідно, *зворотна задача* полягає у визначенні функції $X(Y)$ при виконанні ряду

оптимізаційних обмежень.

Прикладом прямої задачі може бути задача визначення мас і хімічного складу сталі при її раскисленні і легуванні, а зворотної – визначення оптимального набору розкислювачів і легуючих для гарантованого отримання сталі заданого складу. Істотна їх відмінність полягає в тому, що пряма задача має єдине рішення, а зворотна – нескінченну безліч рішень, серед якої необхідно знайти оптимальне, наприклад, в сенсі мінімальної загальної вартості матеріалів, що використовуються.

У програмі «Excalibur» [1] реалізовані пряма і зворотна задачі, що працюють в тандемі. Алгоритм прямої задачі заснований на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази, ентальпійному тепловому балансі та врахуванні кінетичного запізнювання. В алгоритмі зворотної задачі реалізований універсальний метод фазових операторів, окремим випадком яких є диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) в металі.

За своїми можливостями «Excalibur» перевершує раніше створені програми термодинамічного моделювання системи «метал-шлак-газ». Її основні переваги:

- Термодинамічний розрахунок рівноваги в багатокомпонентній гетерогенній системі «метал-шлак-газ» з урахуванням тепла хімічних реакцій;
- Інтегрований термодинамічний розрахунок кінцевої температури системи на основі ентальпійного теплового балансу;
- Точний облік заданого зовнішнього тиску. Розрахунок парціальних тисків всіх атомарних та молекулярних складових газової фази;
- Обчислення і відображення всіх інтегральних і парціальних термодинамічних функцій складових системи, включаючи всі фази і окремі хімічні елементи, на основі єдиного стандарту;
- Точний облік тепла енергоносіїв і теплових втрат, температури і агрегатного стану матеріалів;
- Розрахунок і наочне відображення кінетики взаємодії фаз в сталеплавильному агрегаті на основі принципів нерівноважної термодинаміки і вирішення динамічної системи диференціальних рівнянь;
- Термодинамічні розрахунки в широкому діапазоні складів і температур; принципова можливість використання програми у феросплавному і доменному виробництві.

В рамках повного і точного рішення зворотної задачі термодинамічного моделювання програма «Excalibur» забезпечує:

- Оптимізацію мас всіляких легуючих і шихтових матеріалів (у будь-якому агрегатному стані) і витрат енергоносіїв за критеріями їхньої сумарної мінімальної вартості або максимальної продуктивності сталеплавильного агрегату;
- Задання і гарантоване виконання комплексу односторонніх і двосторонніх оптимізаційних обмежень за хімічним складом і масами

кінцевих металу, шлаку і газу, масами матеріалів, витратою енергоносіїв, кінцевою температурою системи;

- Застосування матричної алгебри фазових операторів і швидкодіючого алгоритму двоїстого симплекс-методу;
- Розрахунок і врахування перехресного впливу вмісту одних елементів на засвоєння інших в кожній із фаз;
- Розрахунок консолідованої матриці впливу добавок матеріалів і енергоносіїв на масу і склад фаз, а також температуру системи;
- Облік невизначеності вихідних і розрахункових даних шляхом завдання відповідних довірчих інтервалів «нижня межа – верхня межа»;
- Практичну реалізацію принципу ситуаційного управління процесами на основі оперативної розробки альтернативних варіантів легування, розкислювання і позаагрегатної обробки сталі за відсутності суворого рішення зворотної задачі у первісному вигляді.

На рис. 2.1 показана концептуальна блок-схема програми «Excalibur».

При запуску програма зчитує файли проекту, констант, параметрів Вагнера, газів, матеріалів і завдань та проплавляє набір матеріалів із останнього відкритого завдання. Запуск прямої і зворотної задач здійснюється шляхом натискання кнопок на панелі інструментів або вибором відповідних пунктів меню.

Результатом розрахунків прямої задачі є маси і склади металу, шлаку і газу, парціальні тиски всіх складових газової фази і кінцева температура системи. Склади фаз можуть відображатися у вигляді масових відсотків, мольних відсотків, кілограмів і кіломолей. Крім того, обчислюються об'єм газу, що виділився, основність шлаку, окислювально-відновний потенціал системи (рівень Фермі електронів в шлаку), хімічні потенціали і парціальні ентальпії змішування всіх елементів у всіх фазах, тепловий ефект хімічних реакцій, тощо.

Всі розрахункові величини мають довірчий інтервал «нижня межа» – «верхня межа». У зворотній задачі додатково розраховуються і відображаються оптимальні маси матеріалів, що забезпечують гарантоване виконання усіх оптимізаційних обмежень, зазначених у завданні на плавку. Розрахунки прямої і зворотної задач проводиться дуже швидко, як правило, протягом 0,01–1 секунд. Завдання кінетики, моделювання плавки в ДСП і пошуку альтернативних рішень в зворотній задачі розраховуються за 0,01–2 хвилини. Кінцевий підсумок більшості розрахунків відображається на головній формі.

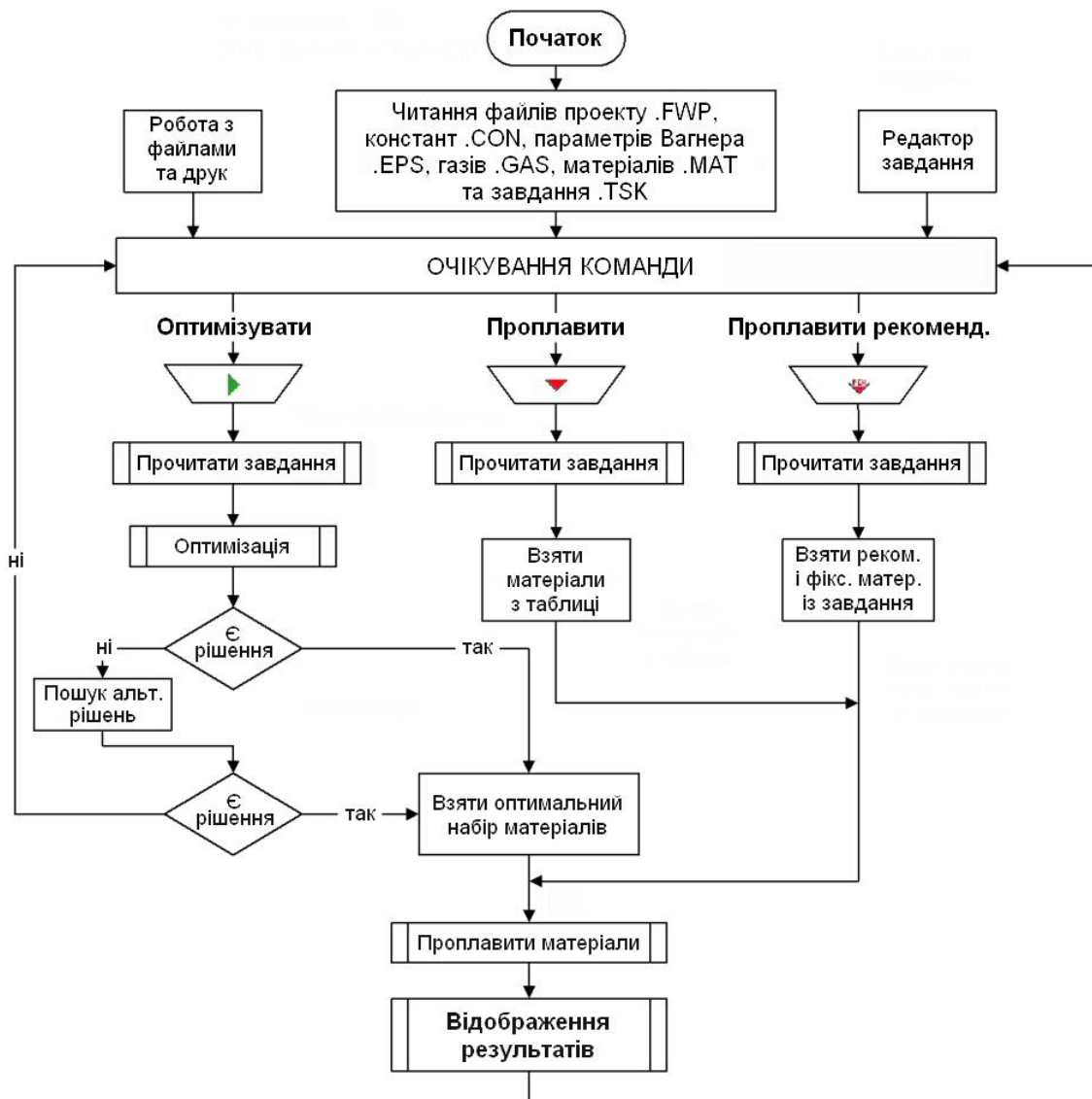


Рисунок 2.1 – Концептуальна блок-схема основних режимів роботи програми «Excalibur»

2.2 Інтерфейс користувача програми «Excalibur»

Програма має інтуїтивний дружній інтерфейс користувача (рис. 2.2), що дозволяє студентам ефективно працювати з нею, спираючись на мінімальну теоретичну підготовку в галузі металургії чорних металів та інформатики. Робота з файлами і друк результатів здійснюються за допомогою стандартних кнопок панелі інструментів, сполучень «гарячих клавіш» або шляхом вибору відповідних пунктів меню. Таблиці матеріалів, елементів і газів мають контекстні впливаючі меню, що робить роботу з програмою ще зручніше. Якщо в результаті розрахунку прямої або зворотної задачі вміст якогось елемента в металі або шлаку виходить за межі, визначені у завданні на плавку, то відповідна величина в таблиці елементів маркується червоним кольором.

Excalibur - Excalibur.FWP

Файл Матеріали Задання Оптимізація Графіки Опції Справка

Excalibur.TSK 132459

Темп. исх., С	N	Материал	Опт	N	Эл	Мет >=	Мет <=	Шлк >=	Шлк <=	Газ >=	Газ <=	N	Газ	P >=	P <=
1625	1	FeMn	1,103	1	Fe	99,53	99,46	6,102	4,685	0,019	0,019	1	CO	0,9434	0,9519
Темп. кон., С	2	SiMn		2	C	0,05	0,061	0	0	41,47	41,66	2	CO2	0,054	0,0452
1614..1615	3	FeSi45		3	Si	0,005	0,007	19,18	20,05	0	0	3	Mg	0,0017	0,002
Давление, ат	4	FeSi65		4	Mn	0,295	0,358	10,01	9,784	0,036	0,043	4	S2	2,9e-4	2,9e-4
1	5	AB-87	0,058	5	Al	0	0	3,99	4,657	0	0	5	Mn	1,9e-4	2,3e-4
Металл, т	6	Коксик	0,1	6	S	0,039	0,04	0,041	0,043	0,079	0,08	6	PO	1,1e-4	9,7e-5
231,5..256,6	7	Карбид Si		7	P	0,013	0,014	0,525	0,367	0,018	0,018	7	Fe	9,8e-5	9,6e-5
Шлак, т	8	Футеровка	0,125	8	Mg	0,0001	0,0001	7,919	8,01	0,145	0,171	8	PS	5,2e-5	5,7e-5
3,01..3,87	9	Известь		9	O	0,068	0,056			58,24	58,01	9	SO	3,9e-5	3,2e-5
Основность ш.	10	Оксалина		10	Ca	0	0	52,25	52,43	0	0	10	S	2,5e-5	2,5e-5
3,01..3,14	11	Кислород		11								11	SO2	2,1e-5	1,4e-5
Газ, т	12			12								12	Всего	1,0	1,0
0,275..0,285	13			13								13	Куб.м	2376	2297
Масса ШМ, т	14			14								14			
1,39	15			15								15			
Стоимость ШМ	16			16								16			
2984,82	17			17								17			
	18			18								18			
	19			19								19			
	20			20								20			
	21			21								21			
	22			22								22			
	23			23								23			

Снять ограничение	Заданное	Ожидаемое	Стоимость
Min [O]	0,06...0,07	0,068...0,056	2985
Отсутствие SiMn	0	1,309	3590

Итераций: 9 Время счета: 1,027 с Мц/РТ: 3,02...3,12 Состав фаз: массовые % Excalibur.MAT Тепл. эффект: -92...91 МДж Newton

Рисунок 2.2 – Загальний вид головної форми програми «Excalibur»

Швидке перемикання між файлами завдань і окремими завданнями здійснюється за допомогою двох випадючих меню у верхній частині головної форми.

Оскільки в будь-якому режимі роботи «Excalibur» звертається до завдання на плавку, яке по суті є специфікацією як прямої, так зворотної задачі, особливе значення надається редактору завдання на плавку, для якого була створена окрема форма (рис. 2.3). На цій формі користувач за допомогою редагованих таблиць і полів може задати будь-які вихідні дані та оптимізаційні обмеження (односторонні і двосторонні) щодо металу, шлаку і газу, а також всіх доступних і недоступних матеріалів та енергоносіїв. Зокрема, тут можна задати хімічний склад і інтервал мас вихідних металу і шлаку, початкову температуру, температуру навколишнього середовища, необхідний склад металу і шлаку, необхідні маси металу, шлаку і газу, обмеження по кінцевій температурі металу, а також вказати величину теплових втрат в МДж.

Крім того, по кожному матеріалу можна вказати рекомендовані маси, фіксовані (обов'язкові) маси і задати верхній і/або нижній межі використання даного матеріалу в тоннах і/або відсотках від загальної маси всіх матеріалів.

Файл заданий - Excalibur. TSK

132459 | 132459-6/г | Равновесный м/ш | Равновесный м/ш-2 | ЗПС | Равновесие-3 | Равное

N	Материал	Реком	Фикс	Мин т	Макс т	Мин %	Макс%
1	FeMn	1,4					
2	AB-87						
3	Известь		0				
4	Футеровка		0,125				
5	Окалина						
6	SiMn		0				
7	Карбид Si		0				

N	Эл	Мет>=	Мет<=	Проба	Шлк>=	Шлк<=	Проба
1	Fe						28
2	C	0,05	0,11	0,05			
3	Si		0,03				15
4	Mn	0,295	0,5	0,05			3,3
5	S		0,04	0,038			0,11
6	P		0,035	0,008			0,7
7	O	0,06	0,07				
8	Ca						44,2
9	Mg						6,5
10	Al						1,6
11							
12							

Мин / макс М мет. Изв. нач. М мет.
 230 - 255

Мин / макс М шл. Изв. нач. М шл.
 3,5 - 4,5

Мин / макс осн-ть Т-ра окр. среды

Мин / макс М газа Изв. нач. т-ра
 0,3 1625

Мин / макс т-ра Qэ, МДж Qпот, МДж

Отменить Справка Принять

Рисунок 2.3 – Форма редактора задания на плавку

Редактор заданий допускает введения до 100 разных заданий на плавку, які можуть бути збережені у файлі. У межах форми редактора робота з файлами заданий і окремими завданнями здійснюється за допомогою контекстного меню (рис. 2.4).

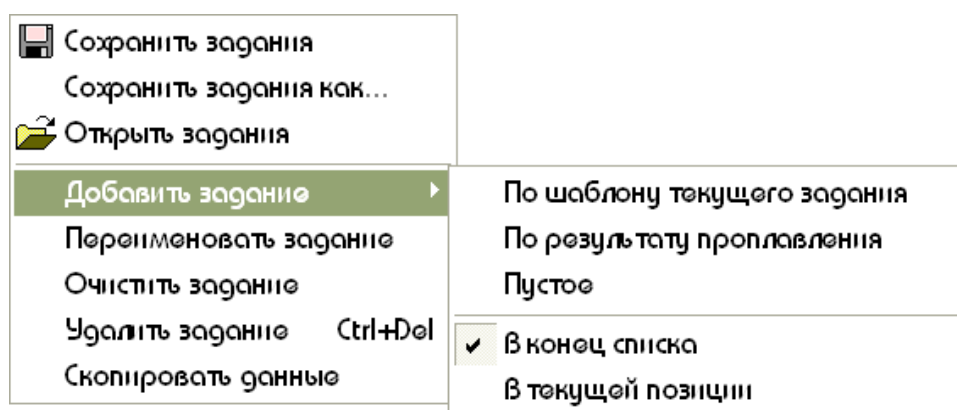


Рисунок 2.4 – Контекстне меню редактора задания на плавку

Практична робота №1 за курсом КВС «Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням чавуну і брухту в кисневому конвертері з основною футеровкою»

Варіанти завдань відповідають номеру в списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низьковуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері за таких умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масова частка вуглецю в напівпродукту 0,025..0,12%;
- матеріали: брухт А (≤ 100 т), брухт чавуну (5 т), чавун переробний рідкий при 1350°C (≤ 350 т), боксит (2 т), вапно (≥ 10 т), кисень (23 т);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 350 т;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 30$ – номер варіанта, $^{\circ}\text{C}$.

а) + без обмеження мінімальної кінцевої температури;

б) + мінімальна кінцева температура напівпродукту $1610 + \text{номер варіанту}$, $^{\circ}\text{C}$

в) + відсутність бокситу;

г) + основність шлаку не менше 2,5;

д) + дозволити вапняк;

е) + відсутність брухту чавуну;

ж) + обмежити використання брухту А в шихті до 15%.

2. Для кожного з пунктів (а-ж) завдання 1 зафіксувати і занести в звіт наступні дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса, вартість в у.о.;

б) кінцева температура, $^{\circ}\text{C}$;

в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;

г) склад металу в масових відсотках;

д) склад шлаку в масових відсотках оксидів, основність шлаку;

е) молекулярний склад газу в атм, об'єм газу в тис. м^3 .

3. Для виконання роботи завантажити проект ТіТКВ.fwr, вибрати завдання «Чавун і брухт з осн. фут.» і перевірити Опції:

Модель металу - Модифікована KE

Модель шлаку - Модифікована KE + Nu / Eps

Розрахунок кінцевої температури - точний.

Точний склад кінцевої проби металу - вкл.

Елементний склад шлаку - вкл.

4. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт по практичній роботі №1 за курсом КВС, варіант _____

студента (ки) гр. _____ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами						
	а	б	в	г	д	е	ж
Брухт А							
Брухт чавуну						немає	немає
Чавун перер.							
Боксит			немає	немає	немає	немає	немає
Вапно							
Вапняк	немає	немає	немає	немає			
Кисень							
Загальна маса, т							
Вартість, у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
М мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO ₂)							
(MnO)							
(S)							
(P ₂ O ₅)							
(Al ₂ O ₃)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
М шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO ₂ }							
М газу, т							
V газ, тис.м ³							
Т-ра, °С							

Практична робота №2 за курсом КВС «Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням брухту і високофосфористого чавуну в кисневому конвертері з основною футеровкою»

Варіанти завдань відповідають номеру в списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низьковуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері за таких умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масова частка вуглецю в напівпродукту 0,02..0,05%;
- матеріали: брухт А (100..200 т), брухт чавуну (5 т), чавун переробний високофосфористий рідкий при 1350 °С (200..300 т), боксит (2 т), вапно (10..20 т), кисень (28 т);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 350 т;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 30$ – номер варіанту, °С.

- а) верхня межа вмісту фосфору в напівпродукту 0,048%;
- б) верхню межу вмісту фосфору в напівпродукту 0,050%;
- в) верхня межа вмісту фосфору в напівпродукту 0,052%;
- г) верхня межа вмісту фосфору в напівпродукту 0,054%;
- д) верхня межа вмісту фосфору в напівпродукту 0,056%;
- е) верхня межа вмісту фосфору в напівпродукту 0,058%;
- ж) верхня межа вмісту фосфору в напівпродукту 0,060%.

2. Для кожного з пунктів (а-ж) завдання 1 зафіксувати і занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса, вартість в у.о.;
- б) співвідношення чавун / брухт у відсотках;
- в) кінцева температура, °С;
- г) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- д) склад металу в масових відсотках;
- е) склад шлаку в масових відсотках оксидів, основність шлаку;
- ж) молекулярний склад газу в атм, об'єм газу в тис. м³.

3. Для виконання роботи завантажити проект TiTKB.fwr, вибрати завдання «Чавун Р і брухт з осн. фут.» і перевірити Опції:

Модель металу - Модифікована KE

Модель шлаку - Модифікована KE + Nu / Eps

Розрахунок кінцевої температури - точний.

Точний склад кінцевої проби металу - вкл.

Елементний склад шлаку - вкл.

4. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт по практичній роботі №2 за курсом КВС, варіант _____

студента (ки) гр. _____ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами						
	а	б	в	г	д	е	ж
Брухт А							
Брухт чавуну							
Чавун пер.Р							
Боксит							
Вапно							
Кисень							
Чавун / брухт, %							
Загальна маса, т							
Вартість, у.о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
М мет., т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO ₂)							
(MnO)							
(S)							
(P ₂ O ₅)							
(Al ₂ O ₃)							
(CaO)							
(MgO)							
Осн-ть шл.							
М шлаку, т							
Молекулярний склад газу, атм							
{CO}							
{CO ₂ }							
М газу, т							
V газ, тис.м ³							
Т-ра, °С							

Практична робота №3 за курсом КВС «Отримання низьковуглецевого напівпродукту з використанням брухту і кремністого чавуну в кисневому конвертері з кислотою футеровкою»

Варіанти завдань відповідають номеру в списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати отримання низьковуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері за таких умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
 - масова частка вуглецю в напівпродукту 0,02..0,10%;
 - матеріали: брухт А (≤ 150 т), брухт чавуну (5 т), чавун переробний рідкий кремністий при 1350 °С (≤ 350 т), боксит (2 т), вапно (20..35 т), кисень (24т), кисла футеровка конвертера (5 т);
 - маса одержуваного напівпродукту не менше 350 т;
 - температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 30$ – номер варіанту, °С.
- а) + мінімальна кінцева температура напівпродукту 1600 + номер варіанту, °С;
б) + відсутність бокситу;
в) + основність шлаку не менше 2;
г) + дозволити вапняк;
д) + відсутність брухту чавуну;
е) + обмежити використання брухту А в шихті до 20%.

2. Для кожного з пунктів (а-е) завдання 1 зафіксувати і занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса, вартість в у.о.;
- б) співвідношення чавун / брухт у відсотках;
- в) кінцева температура, °С;
- г) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- д) склад металу в масових відсотках;
- е) склад шлаку в масових відсотках оксидів, основність шлаку;
- ж) молекулярний склад газу в атм, об'єм газу в тис. м³.

3. Для виконання роботи завантажити проект TiTKB.fwr, вибрати завдання «Чавун Si і брухт з кисл. фут.» і перевірити Опції:

Модель металу - Модифікована KE

Модель шлаку - Модифікована KE + Nu / Eps

Розрахунок кінцевої температури - точний.

Точний склад кінцевої проби металу - вкл.

Елементний склад шлаку - вкл.

4. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт по практичній роботі №3 за курсом КВС, варіант _____

студента (ки) гр. _____ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами					
	а	б	в	г	д	е
Брухт А						
Брухт чавуну					немає	немає
Чавун пер.Si						
Боксит		немає	немає	немає	немає	немає
Вапно						
Вапняк	немає	немає	немає			
Кисень						
Чавун / брухт, %						
Загальна маса, т						
Вартість, у. о.						
Склад металу, мас. %						
[C]						
[Si]						
[Mn]						
[S]						
[P]						
[O]						
М мет. т						
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)						
(SiO ₂)						
(MnO)						
(S)						
(P ₂ O ₅)						
(Al ₂ O ₃)						
(CaO)						
(MgO)						
Осн-ть шл.						
М шлаку, т						
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}						
{CO ₂ }						
М газу, т						
V газу, тис.м ³						
Т-ра, °С						

Практична робота №4 за курсом КВС «Оптимізація витрати кисню і чавуну при отриманні низьковуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері з основною футеровкою»

Варіанти завдань відповідають номеру в списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати витрати кисню і чавуну на киснево-конвертерну плавку низьковуглецевого напівпродукту при зміні максимально допустимої частки брухту А в шихті з 15 до 20% і наступних умовах:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масова частка вуглецю в напівпродукту 0,02..0,12%;
- матеріали: брухт А (≤ 100 т, 15..20%), брухт чавуну (5 т), чавун переробний рідкий при 1350 °С (≤ 315 т), кисень (20..26 т), боксит (2 т), вапно (≥ 10 т).
- маса одержуваного напівпродукту не менше 350 т;
- мінімальна кінцева температура напівпродукту 1610 + номер варіанту, °С;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 30$ – номер варіанту, °С.

- а) частка брухту А в шихті до 15%;
- б) частка брухту А в шихті до 16%;
- в) частка брухту А в шихті до 17%;
- г) частка брухту А в шихті до 18%;
- д) частка брухту А в шихті до 19%;
- е) частка брухту А в шихті до 20%;

2. Для кожного з пунктів (а-е) завдання 1 зафіксувати і занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса, вартість в у.о.;
- б) співвідношення чавун / брухт у відсотках;
- в) кінцева температура, °С;
- г) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- д) склад металу в масових відсотках;
- е) склад шлаку в масових відсотках оксидів, основність шлаку;
- ж) молекулярний склад газу в атм, об'єм газу в тис. м³.

3. За результатами п.2 побудувати графіки залежності параметрів плавки, що змінюються, від частки брухту А в шихті.

4. Для виконання роботи завантажити проект ТіТКВ.fwr, вибрати завдання «Оптимізація витр. O₂» і перевірити Опції:

Модель металу - Модифікована KE

Модель шлаку - Модифікована KE + Nu / Eps

Розрахунок кінцевої температури - точний.

Точний склад кінцевої проби металу - вкл.

Елементний склад шлаку - вкл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт по практичній роботі №4 за курсом КВС, варіант _____

студента (ки) гр. _____ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами					
	а	б	в	г	д	е
Брухт А						
Брухт чавуну						
Чавун перер.						
Боксит						
Вапно						
Кисень						
Чавун / брухт, %						
Загальна маса, т						
Вартість, у. о.						
Склад металу, мас. %						
[C]						
[Si]						
[Mn]						
[S]						
[P]						
[O]						
М мет. т						
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)						
(SiO ₂)						
(MnO)						
(S)						
(P ₂ O ₅)						
(Al ₂ O ₃)						
(CaO)						
(MgO)						
Осн-ть шл.						
М шлаку, т						
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}						
{CO ₂ }						
М газу, т						
V газу, тис.м ³						
Т-ра, °C						

Практична робота №5 за курсом КВС «Зміна параметрів плавки в ході продувки киснем при отриманні низьковуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері з основною футеровкою»

Варіанти завдань відповідають номеру в списку групи.

1. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати витрати чавуну і брухту на киснево-конвертерну плавку низкоуглеродистого напівпродукту за таких умов:

- середньозважений тиск 150 кПа (1,5 атм);
- масова частка вуглецю в напівпродукту 0,02..0,10%;
- матеріали: брухт А (≤ 100 т), брухт чавуну (5 т), чавун переробний рідкий при 1350 °С (≤ 315 т), боксит (2 т), вапно (10 т), кисень (25 т), футеровка (5 т);
- маса одержуваного напівпродукту не менше 350 т;
- мінімальна кінцева температура напівпродукту 1610 + номер варіанту, °С;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 30$ – номер варіанту, °С.

а-е) дослідити зміну параметрів плавки в ході продувки киснем при зміні витрати кисню, вапна, бокситу, футеровки 0 ... 100% від загальної маси на плавку з кроком 20%.

2. Для кожного з пунктів (а-е) завдання 1 зафіксувати і занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса, вартість в у.о.;
- б) кінцева температура, °С;
- в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- г) основністьшлаку;
- д) склад металу в масових%;
- е) склад шлаку в масових% оксидів;
- ж) молекулярний склад газу в атм;

3. За результатами п.2 побудувати графіки залежності параметрів плавки, що змінюються, від частки витрат кисню, вапна, бокситу і футеровки у відсотках від загальної маси на плавку.

4. Для виконання роботи завантажити проект ТіТКВ.fwr, вибрати завдання «Хід продувки O₂» і перевірити Опції:

Модель металу - Модифікована KE

Модель шлаку - Модифікована KE + Nu / Eps

Розрахунок кінцевої температури - точний.

Точний склад кінцевої проби металу - вкл.

Елементний склад шлаку - вкл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт по практичній роботі №5 за курсом КВС, варіант _____

студента (ки) гр. _____ (ПІБ)

Матеріали	витрата кисню, вапна, бокситу, футерування,% від маси на плавку					
	а (0%)	б (20%)	в (40%)	г (60%)	д (80%)	е (100%)
Брухт А						
Брухт чавуну	5	5	5	5	5	5
Чавун перер.						
Боксит	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
Вапно	0	2	4	6	8	10
Футеровка	0	1	2	3	4	5
Кисень	0	5	10	15	20	25
Загальна маса, т						
Вартість, у. о.						
Склад металу, мас. %						
[C]						
[Si]						
[Mn]						
[S]						
[P]						
[O]						
М мет. т						
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)						
(SiO ₂)						
(MnO)						
(S)						
(P ₂ O ₅)						
(Al ₂ O ₃)						
(CaO)						
(MgO)						
Осн-ть шл.						
М шлаку, т						
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}						
{CO ₂ }						
М газу, т						
V газу, тис.м ³						
Т-ра, °C						

Практична робота №6 за курсом КВС «Вплив конвертерного шлаку на параметри розкислення напівспокійної конструкційної сталі Зпс»

Варіанти завдань відповідають номеру в списку групи.

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі Зпс (ГОСТ 380-2005):

C 0,14-0,22%; Mn 0,45-0,65%; Si 0,04-0,14%; S до 0,050%; P до 0,040%.

Початковий метал (напівпродукт): маса 350-360 т; C 0,05%; Mn 0,05%; S 0,040%; P 0,015%.

Склад конвертерного шлаку: FeO 30%; SiO₂ 20%; MnO 5%; S 0,1%; P₂O₅ 0,4%; CaO 40%; MgO 3%; Al₂O₃ 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» дослідити вплив кількості конвертерного шлаку в ковші на оптимальні параметри розкислення напівспокійної конструкційної сталі Зпс за таких умов:

- середньозважений тиск 130 кПа (1,3 атм);
- маса газу, що утворюється, від 0,1 до 0,6 т;
- основність шлаку не менше 2;
- матеріали: FeMn, АВ-87, коксик, карбід Si, вапно (вапняк для «е»);
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 30$ – номер варіанту, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанту, °С;
- кінцева температура металу в ковші 1600 ... 1620°С;
- початкова маса конвертерного шлаку в ковші, т:
а) 1,5 ... 2,5; б) 2,0 ... 3,0; в) 2,5 ... 3,5; г) 3,0 ... 4,0; д) 3,5 ... 4,5; е) 4,0 ... 5,0;

3. Для кожного з пунктів (а-е) завдання 2 зафіксувати і занести в звіт наступні дані:

набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса, вартість в у.о.; кінцева температура; маси металу, шлаку і газу; основність шлаку; склад металу в масових %; склад шлаку в масових % оксидів; молекулярний склад газу в атм.

4. За результатами п.3 побудувати графіки залежності змінюються параметрів розкислення сталі Зпс від вихідної середньої маси конвертерного шлаку.

5. Для виконання роботи завантажити проект ТіТКВ.fwr, вибрати завдання «Конв. шлак - ст Зпс» і перевірити Опції:

Модель металу - Модифікована KE

Модель шлаку - Модифікована KE + Nu / Eps

Розрахунок кінцевої температури - точний.

Точний склад кінцевої проби металу - вкл.

Елементний склад шлаку - вкл.

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт по практичній роботі №6 за курсом КВС, варіант _____

студента (ки) гр. _____ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами					
	а	б	в	г	д	е
М поч. шл.	1,5 ... 2,5	2,0 ... 3,0	2,5 ... 3,5	3,0 ... 4,0	3,5 ... 4,5	4,0 ... 5,0
FeMn						
Ав-87						
Коксик						
Карбід Si						
Вапно						немає
Вапняк	немає	немає	немає	немає	немає	
Загальна маса, т						
Вартість, у.о.						
Склад металу, мас. %						
[C]						
[Si]						
[Mn]						
[S]						
[P]						
[O]						
М мет. т						
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)						
(SiO ₂)						
(MnO)						
(S)						
(P ₂ O ₅)						
(Al ₂ O ₃)						
(CaO)						
(MgO)						
Осн-ть шл.						
М шлаку, т						
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}						
{CO ₂ }						
М газу, т						
V газу, тис.м ³						
Т-ра, °C						

Практична робота №7 за курсом КВС «Моделювання реакційної зони і розрахунок втрат заліза при продувці чавуну в кисневому конвертері»

Варіанти завдань відповідають номеру в списку групи.

1. Вихідні дані:

Початковий метал: рідкий чавун 1 т: С 4,2%; Mn 0,2 ... 0,5%; С; Si 0,6 ... 0,9%; S 0,040%; P 0,020%, з температурою 1350 °С.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» розрахувати температуру і хімічний склад металевої, шлакової і газової фаз реакційної зони при продувці рідкого передельного чавуну в кисневому конвертері:

- середньозважений тиск 120 кПа (1,2 атм);
- матеріали: чавун рідкий переробний 1 т, кисень;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{окр}} = 1600$ – номер варіанту, °С;
- маса кисню, що вдувається, т:
а) 0; б) 0,05; в) 0,10; г) 0,12; д) 0,14; е) 0,16.

3. Для кожного з пунктів (а-е) завдання 2 зафіксувати і занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса, вартість в у.о.;
- б) кінцева температура;
- в) маси металу, шлаку і газу;
- г) склад металу в масових% / кг;
- д) склад шлаку в масових% оксидів і кг;
- е) молекулярний і атомарний склад газу в атм / кг;
- ж) мінімальні (в газову фазу) і максимальні (в газову і шлакову фази) втрати заліза в кг і %, виходячи з витрати 100 кг кисню на 1 т металу:

$$\Delta k_{\text{г}}_{\text{min}} = \{Fe, \text{кг}\}; \Delta k_{\text{г}}_{\text{max}} = [Fe, \text{кг}]_0 - [Fe, \text{кг}]_i$$
$$\Delta\% = 0,01 \cdot \Delta k_{\text{г}} / \{O_2, m\}$$

4. За результатами п.3 побудувати графіки залежності параметрів металевої, шлакової і газової фаз реакційної зони, що змінюються, від інтенсивності продувки (маси кисню на 1 т чавуну).

5. Для виконання роботи завантажити проект ТіТКВ.fwr, вибрати завдання «Реакц. зона» і перевірити Опції:

Модель металу - Модифікована КЕ

Модель шлаку - Модифікована КЕ + Nu / Eps

Розрахунок кінцевої температури - точний.

Точний склад кінцевої проби металу - вкл.

Елементний склад шлаку - викл.

Поліпшена збіжність, повільніший розрахунок - вкл.

6. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт по практичній роботі №7 за курсом КВС, варіант _____

студента (ки) гр. _____ (ПІБ)

Матеріали	Маси матеріалів (г) за варіантами					
	а	б	в	г	д	е
Кисень	0	0,05	0,10	0,12	0,14	0,16
Чавун перер.	1	1	1	1	1	1
Загальна маса, г						
Вартість, у.о.						
Склад металу реакційної зони, мас. % / Кг						
[Fe], кг						
[C],%						
[Si],%						
[Mn],%						
[S],%						
[P],%						
[O],%						
М мет. т						
Склад реакційної зони, мас. % / Кг						
(Fe), кг	-					
(FeO),%	-					
(SiO ₂),%	-					
(MnO),%	-					
(S),%	-					
(P ₂ O ₅),%	-					
М шлаку, т	0					
Молекулярний і атомарний склад газу реакційної зони, атм / кг						
{CO}, атм	-					
{CO ₂ }, атм	-					
{Fe}, атм	-					
{Fe}, кг	-					
{C}, кг	-					
{O}, кг	-					
М газу, т	0					
V газу, тис.м ³	0					
Мінімальні та максимальні втрати заліза, кг /%						
Δ_{\min} Fe, кг	0					
Δ_{\min} Fe, %	0					
Δ_{\max} Fe, кг	0					
Δ_{\max} Fe, %	0					
T-ра, °C						

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Харченко А.В., Личконенко Н.В., Мосейко Ю.В. Возможности и перспективы использования программы «Excalibur» в учебном процессе. *Зб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2013. Вип. 1 (29). С. 169-175.
2. Бойченко Б. М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология. Дніпропетровськ: Дніпро-ВАЛ, 2006. 454 с.
3. Колпаков С.В., Старов Р.В., Смоктий В.В. и др. Технология производства стали в современных конвертерных цехах. М.: Машиностроение, 1991. 464с.
4. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов. Донецк: Высшая школа, 1984. 343 с.
5. Лапицкий В.И., Левин С.Л., Легкоступ О.И. и др. Конвертерные процессы производства стали. М.: Металлургия, 1974. 318 с.
6. Борнацкий И.И., Баптизманский В.И., Исаев Е.И. и др. Современный кислородно-конвертерный процесс. К.: Техніка, 1974. 263 с.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

ОСНОВНА:

1. Харченко О.В., Личконенко Н.В. Теорія сталеплавильного виробництва: навч.-метод. посібник. Запоріжжя: ЗДІА, 2017. 159 с.
2. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
3. Арсентьев П.П., Квитко И.П. Конверторный процесс с донным дутьём. М.: Металлургия, 1979. 176 с.
4. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М: Металлургия, 1974. 495 с.

ДОПОМІЖНА:

1. Роменец В.А., Кременевский С.В. Технично-економический анализ кислородно-конвертерного производства. М.: Металлургия, 1973. 511 с.
2. Косой Л.Д., Синельников В.А. Выплавка легированной стали в конвертерах. М.: Металлургия, 1979. 176 с.
3. Якушев А.М. Справочник конвертерщика. Челябинск: Металлургия, Челябинское отд., 1990. 448 с.

Методичне видання
(українською мовою)

Харченко Олександр Вікторович
Лічконенко Наталія Володимирівна
Панова Віра Олегівна

КОНВЕРТЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ

Методичні вказівки до практичних занять
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності 136 “Металургія”
освітньо-професійної програми “Металургія чорних металів”

Рецензент *О.Г. Кириченко*
Відповідальний за випуск *Ю.Ф. Терновий*