

Міністерство освіти і науки України  
Інженерний інститут Запорізького національного університету

**О.В. Харченко, Н.В. Лічконенко, В.О. Панова**

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ  
ПОЗААГРЕГАТНОГО РАФІНУВАННЯ МЕТАЛУ**

Методичні вказівки  
до лабораторних занять  
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра  
спеціальності 136 «Металургія»  
освітньо-професійної програми «Металургія»

Затверджено  
вченою радою ЗНУ  
Протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_

**Запоріжжя  
2019**

УДК 669.054  
Х227

Харченко О.В., Лічконенко Н.В., Панова В.О. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу : методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія». Запоріжжя : ЗНУ, 2019. 31 с.

Методичні вказівки призначені для закріплення теоретичних знань про процеси, що мають місце при позаагрегатній обробці металу і набуття практичних навичок роботи з багатофункціональною програмою «Excalibur». Вказівки містять загальні відомості про засоби позапічної обробки сталі і призначення та інтерфейс користувача програми «Excalibur», а також сім лабораторних робіт,.

Для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія» освітньо-професійної програми «Металургія».

Рецензент

*О.В. Явтушенко*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Обробки металів тиском

Відповідальний за випуск

*Ю.Ф. Терновий*, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри  
Металургії

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Загальні відомості про засоби позапічної обробки сталі.....	6
2. Лабораторні роботи із застосуванням багатofункціональної програми «Excalibur».....	10
2.1 Призначення й можливості програми.....	10
2.2 Інтерфейс користувача програми «Excalibur».....	13
3. Зміст лабораторних занять.....	17
<i>Лабораторна робота №1 «Оптимізація розкислення-легування конструкційної низьколегованої сталі 12ГС».....</i>	<i>17</i>
<i>Лабораторна робота №2 «Оптимізація розкислення напівспокійної конструкційної сталі 3пс».....</i>	<i>19</i>
<i>Лабораторна робота №3 «Оптимізація розкислення киплячої конструкційної сталі 08кп».....</i>	<i>21</i>
<i>Лабораторна робота №4 «Оптимізація легування конструкційної сталі 14ХГС».....</i>	<i>23</i>
<i>Лабораторна робота №5 «Оптимізація легування і десульфурації конструкційної сталі 09Г2С».....</i>	<i>25</i>
<i>Лабораторна робота № 6-7 «Вакуумування конструкційної сталі 12ГС».....</i>	<i>27</i>
Перелік використаної літератури.....	29
Перелік рекомендованої літератури.....	31

## ВСТУП

Сталь є найважливішим конструкційним матеріалом для машинобудування, транспорту, будівництва та інших галузей народного господарства. Останнім часом вимоги нових галузей техніки до якості сталі багатьох марок різко зросли і продовжують зростати. Тому одним з найбільш актуальних завдань, що стоять перед металургами, є отримання конкурентоспроможної продукції високої якості, що задовольняє потребам ринку. Конкурентоспроможність металопродукції при порівнянних показниках її якості визначається сумарними витратами на виробництво. Останні безпосередньо залежать від технічних і технологічних можливостей виробництва.

В останні десятиріччя спостерігається стійка тенденція до переносу максимально можливої кількості технологічних операцій із основних плавильних агрегатів у ківш. Здійснення технологічних операцій поза плавильним агрегатом одержало назву *позапічної (позаагрегатної) обробки*.

Застосування засобів позапічної обробки сталі, незважаючи на додаткові витрати при їх установці в сталеплавильних цехах, є економічно вигідним, оскільки сприяє скороченню часу перебування металу в основному агрегаті за рахунок перенесення ряду фізико-хімічних процесів в сталерозливний ківш і, як наслідок, збільшення продуктивності агрегатів. Реконструкція сталеплавильних цехів з установкою обладнання для позапічної обробки дозволяє підвищити продуктивність основних агрегатів на 20-30%, що забезпечує приблизно таке ж підвищення економічної ефективності виробництва сталі; знизити витрату енергетичних ресурсів на 20%; підвищити гнучкість управління технологічною лінією виробництва сталі, збільшуючи кількість плавок в серії на МБЛЗ [1].

Все це спричинило необхідність включення до навчального плану підготовки здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра зі спеціальності «Металургія» дисципліни «Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу».

Завданнями дисципліни є:

- формування знань про основні способи позапічного рафінування розплавів, галузі їх застосування, про сучасний рівень розвитку і досягнення останніх років в галузі позапічної обробки;
- ознайомлення з основами фізико-хімічних процесів, що мають місце в ході позаагрегатної обробки чавуну і сталі;
- ознайомлення з технологічними основами і конструкціями агрегатів для позапічної обробки металів і сплавів.

Залучення ЕОМ до управління циклом позаагрегатного рафінування металу дозволяє визначити оптимальні витрати матеріалів і енергії, а також найбільш ефективні режими процесу позаагрегатної обробки металу перед розливанням, що дозволяє досягти значних результатів по збільшенню ефективності виробництва сталей і сплавів. Тому **мета лабораторного практикуму** - навчити студента обирати необхідні засоби позапічної обробки розплаву та визначати необхідні умови, що забезпечують якісну обробку металу із застосуванням багатofункціональної програми «Excalibur».

## 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАСОБИ ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

У світовій металургійній практиці перші агрегати піч-ківш (LF), оснащені засобами для підігріву металу, з'являються в 1965 і 1967 рр. (фірми АСЕА-СКФ і Фінкл-Мор відповідно) а в Японії перший екземпляр ковша-печі був споруджений в 1971 р. З огляду на позитивні результати випробування цього зразка, агрегати «ківш-піч» (УКП) почали створюватися і в інших країнах. В результаті цього в 1986 р. в різних країнах (Японія, Німеччина, Франція, США та ін.) в промисловій експлуатації знаходилося більше 200 агрегатів «ківш-піч» (з них близько 150 - в електросталеплавильних і сталеливарних цехах). У 1997 р. в світі було вже 230 таких агрегатів [2].

За останні десять років кількість УКП, що експлуатуються в світовій металургії, зростає майже в 2 рази і сьогодні налічує понад 500 одиниць [3]. За наявними відомостями [1], на зарубіжних заводах зараз з використанням агрегатів «ківш-піч» проводиться комплексна обробка сталей різного сортаменту в ковшах ємністю 25-250 т. При цьому всі об'єкти, що будуються або модернізовані сталеплавильні цехи металургійних підприємств оснащуються сучасними УКП.

На вітчизняних металургійних підприємствах ковшова металургія почалася з розробки та впровадження процесів рафінування під час випуску металу. До 1998 року на металургійних заводах України агрегати позапічної обробки були відсутні. У наступні роки УКП були встановлені на ВАТ «Нижньодніпровський трубопрокатний завод, ВО ім. Фрунзе (Суми), НКМЗ (м. Краматорськ), ВАТ «Дніпроспецсталь», ММЗ «Істіл», ВАТ «Донецький металургійний завод», і Єнакіївському метзаводі [4]. У країнах СНД УКП експлуатуються на Волзькому і Сіверському трубних, Білоруському і Молдавському металургійних заводах, ВАТ «Тагмет», ОХМК, НТМК, ОЕМК, МЗ «Красный октябрь», ПО «Іжорський метзавод» тощо [4,5]. При цьому переважна більшість установок для всіх згаданих підприємств були закуплені по імпорту [4].

Появі на вітчизняних металургійних підприємствах УКП передувало їх оснащення УКДМ (установками комплексного доведення металу), позапічна обробка сталі на яких здійснювалась за рахунок перегріву металу в сталеплавильному агрегаті.

При використанні УКДМ метал перед випуском плавки перегрівають, щоб компенсувати втрати тепла від введення добавок, а також за рахунок

природних втрат при транспортуванні ковша від плавильного агрегату до розливання.

На думку ряду авторів [3-4], перегрів металу перед обробкою на УКДМ знаходиться в межах 60-800 °С. При цьому передача тепла відбувається в напрямку від металу до шлаку, добавкам і футеровці. Відносно низька, в більшості випадків, температура рафінувального шлаку на УКДМ визначає його порівняно малу активність. Нагріваючись від металу, шлак забирає його тепло. Для компенсації теплових втрат металу при відсутності УКП, в ряді випадків, використовують технологію хімічного підігріву [6], що викликає додаткову витрату алюмінію 0,42 кг/т і кисню 0,39 м<sup>3</sup>/т (при підігріві на 100 °С) і призводить до додаткового окислення металу.

Додатковому охолодженню і окисленню металу сприяє також інтенсивне перемішування розплаву на УКДМ в процесі його усереднювальної продувки заглиблювальною фурмою зверху. З огляду на короткочасність перемішування металу і шлаку не представляється можливим ефективно використання сульфідної ємності наведеного рафінувального шлаку. Все це викликає зміну стану розплаву і збільшує витрати на виробництво сталі.

До числа недоліків обробки сталі на УКДМ слід також віднести підвищену витрату вогнетривів (0,4 кг/т) [4]. Продування металу на УКДМ через донні пристрої, що використовується останнім часом, є більш технологічним, проте проблема охолодження металу не виключається. Наявність нагрівального модуля для нагріву сталі є головною відмінністю УКП від УКДМ. Як нагрівальний модуль, в основному, використовується електродуговий пристрій, що працює на змінному, рідше - на постійному струмі. Є відомості про використання для підігріву металу плазмотронів, а також хімічного підігріву металу в ковші за рахунок тепла окислення алюмінію киснем, що подається в робочий простір агрегату [3].

При підігріві металу на УКП температура шлаку вище температури металу за рахунок того, що електродуги занурені в шлак. Тому шлак знаходиться в рідкому стані і активно взаємодіє з металом протягом усього часу обробки на УКП, виключаючи період його формування. Наявність електродугового нагрівання дозволяє, за рахунок присадки ТШС, отримувати шлак необхідного складу.

На відміну від УКДМ продування металу аргонем (азотом) на УКП здійснюється протягом усього періоду обробки. Можливість «м'якого» регулювання витрати газу по ходу обробки в ковші та використання донних пробок різного виду забезпечує подачу диспергованого газу, що практично виключає можливість бурління шлакометалевого розплаву і, як наслідок, оголення дзеркала металу з його негативними наслідками [3].

Основні відомості про види, технологічні функції і конструкції УКП викладені в [4,7-8].

**УКП призначені для виконання наступних технологічних функцій** в заповненому сталерозливних ковші:

- усереднення складу і температури металу;
- коригування (підігрів або охолодження) сталі;
- коригування хімічного складу сталі;
- глибоке рафінування металу від шкідливих домішок високоосновним синтетичним шлаком, який формується з ТШС;
- модифікування сталі;
- коригування окисленості сталі;
- синхронізація роботи комплексу «сталеплавильний агрегат - МБЛЗ»;
- тривале збереження металу в ковші при аварійних ситуаціях в цеху.

**До складу УКП входять:**

- спеціальний сталевоз або стенд з одним або двома постановочними місцями;
- водоохолоджувана футерована кришка;
- система подачі аргону і (або) індуктор для перемішування металу;
- електричне обладнання (трансформатор, електродотримачі, електроди, система регулювання);
- система бункерів і течок для подачі кускових феросплавів і компонентів ТШС;
- трайб-апарати для введення алюмінієвої катанки і порошкового дроту;
- пристосування для відбору проб металу з ковша, виміру температури і вмісту газів в ковшовій ванні;
- прилади для експрес-аналізу проб металу і шлаку;
- заглиблювана фурма для обробки металу в ковші при аварійних ситуаціях з донною (ими) пористою (ими) вставкою (ами) в ньому;
- пристрій для вдування на дзеркало металу порошкоподібних матеріалів;
- система газовидалення і газоочистки;
- КВП і автоматика;
- машина (пристрій) для скачування шлаку;
- пульт управління з системою АСУТП.

За результатами досліджень і даними промислової практики, при використанні УКП досягаються вузькі марочні межі і фактичні коливання від плавки до плавки вмісту вуглецю (0,02-0,03%), марганцю (0,1%), кремнію (0,1%) , хрому (0,1%), алюмінію (0,02%), мікролегуючих елементів (0,01%),



зниження вмісту сірки, кисню і фосфору, глобуляризація неметалічних включень, стабільна робота МБЛЗ, висока якість, хімічна однорідність, фізико-механічні та службові властивості металопродукції, технологічність металу при подальшій переробці у відповідних галузях [9].

Для комплексного отримання металу з низькою газонасиченістю і незначною кількістю неметалевих включень на ряді металургійних підприємств, в тому числі вітчизняних, створені комплекси «УКП - вакууматор» [2]. При цьому досягнуто наднизький вміст шкідливих домішок (0,001-0,003% сірки, 0,003-0,007% фосфору, 0,0007-0,0010% кисню, 0,0013-0,0017% азоту, 0,00005-0,00015% водню, 250-500 неметалевих включень за шкалою MJDas). При практично незмінних показниках міцності сталі відзначається збільшення пластичності вакуумованого металу. Вакуумування покращує структуру металу, знижуючи його відсортювання по внутрішніх дефектах [1].

Дослідження, в т.ч. моделювання, окремих сторін і процесів позапічної обробки сталі на УКП здійснюються в СНД і в Україні. У роботах російських дослідників [10] методами математичного і фізичного моделювання вивчалися кінетика реакцій взаємодії системи «метал-шлак» на УКП, динаміка плавлення порошкоподібних добавок, що вводяться інжекційним способом, з урахуванням наморожування металеві оболонки і гідродинаміки процесів шлакової ванни.

Є дані про проведені роботи в цих напрямках НМетАУ, ІЕС НАНУ, ДонДТУ, ДДТУ, дослідницьких підрозділів металургійних підприємств. Прогноз хімічного складу і температури металу дозволяє вирішити завдання управління і підвищення ефективності роботи агрегату, цеху, підприємства. В основі системи прогнозування - термодинамічний розрахунок рівноважного складу. Побудована на основі дослідження комп'ютерна система автоматичного проектування і управління технологічним процесом випробування і впроваджена, зокрема, на Молдавському металургійному заводі [3].

## **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 розкисленні 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» [11] реалізовані пряма і зворотна задачі, що працюють в тандемі. Алгоритм прямої задачі заснований на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази і її наступних модифікаціях [13], ентальпійному тепловому балансі [14] та врахуванні кінетичного запізнювання [15]. В алгоритмі зворотної задачі реалізований універсальний метод фазових операторів, окремим випадком яких є диференціальні коефіцієнти засвоєння (ДКЗ) в металі [16].

Програма «Excalibur» є розвитком інформаційно-технологічної системи «Форвард» [17] і програми «Оракул» [18]. Промислова реалізація одного з варіантів програми - система управління плавкою та позаагрегатною обробкою «Гіббс»® [19] – впроваджена на Білоруському металургійному заводі.

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;
- Повний розрахунок плавки в ДСП, в тому числі: динаміки плавлення брухту, мас і хімічного складу металу, шлаку і газу, температури по ходу плавки. Облік кінетичного запізнювання, скачування шлаку, теплових втрат і геометричних параметрів печі;
- 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».

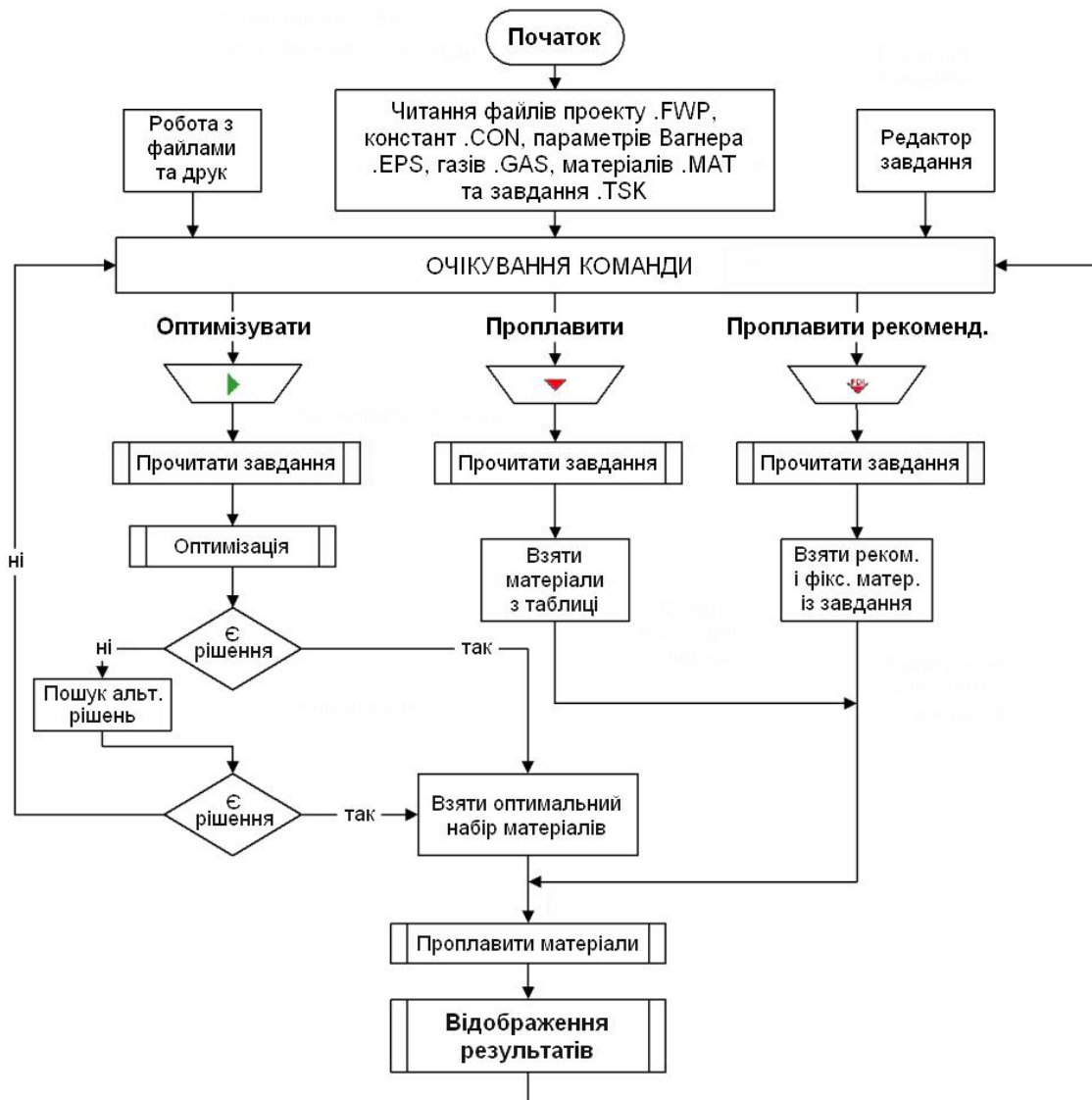


Рисунок 2.1 – Концептуальна блок-схема основних режимів роботи програми «Excalibur»

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 ентальпія 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.

## **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 спливаючі 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	Фуеровка	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	Окалина		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»

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.

Файл заданий - Excalibur.TSK

132459 | 132459-б/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.	Иzv. нач. М мет.
<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> 230 - <input type="text"/> 255
Мин / макс М шл.	Иzv. нач. М шл.
<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/> 3,5 - <input type="text"/> 4,5
Мин / макс осн-ть	Т-ра окр. среды
<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/>
Мин / макс М газа	Иzv. нач. т-ра
<input type="text"/> <input type="text"/> 0,3	<input type="text"/> 1625
Мин / макс т-ра	Qз, МДж
<input type="text"/> <input type="text"/>	<input type="text"/>
	Qпот, МДж
	<input type="text"/>

Отменить    Справка    Принять

Рисунок 2.3 – Форма редактора задания на плавку

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

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

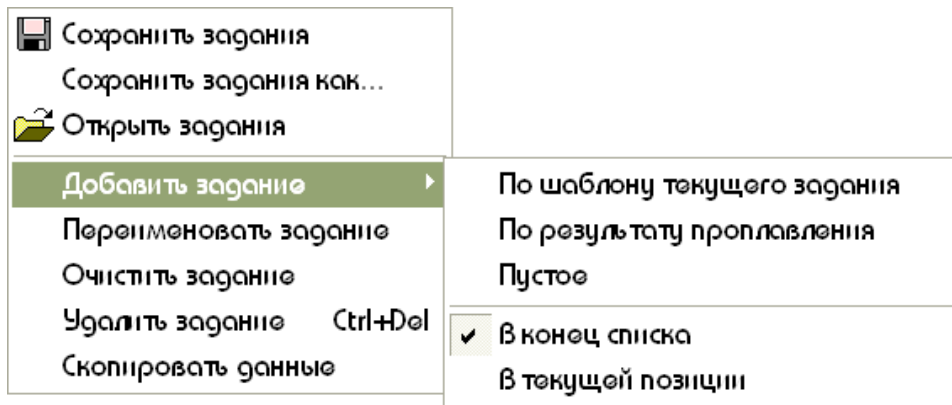


Рисунок 2.4 – Контекстне меню редактора завдання на плавку

На головній формі (рис. 2.2) швидке перемикання між файлами завдань і окремими завданнями здійснюється за допомогою двох випадаючих меню у верхній частині форми.

### 3. ЗМІСТ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ



Варіанти завдань всіх практичних робіт відповідають номеру в списку групи.

**Лабораторна робота №1**  
**«Оптимізація розкислення-легування конструкційної**  
**низьколегованої сталі 12ГС»**

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89):

C 0,09–0,15%; Mn 0,8–1,2%; Si 0,5–0,8%; S до 0,040%; P до 0,035%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; C 0,06%; Mn 0,05%; S 0,035%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати розкислення-легування спокійної конструкційної сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89) при наступних умовах:

- середній тиск 100 кПа (1 атм);
  - дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, АВ-87, коксик, карбід Si, вапно, ел/енергія;
  - температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
  - початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.
- а) + без обмеження за мінімальною кінцевою температурою;
- б) + мінімальна кінцева температура 1605 + номер варіанта, °С;
- в) + відсутність карбіду Si;
- г) + відсутність електроенергії;
- д) + відсутність FeMn;
- е) + основність шлаку не менше 1,8;
- ж) + максимальна маса шлаку не більше 2,4т;

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;
- б) кінцева температура, °С;
- в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- г) основність шлаку;
- д) склад металу в ваг. %;
- е) склад шлаку в ваг. % оксидів;
- ж) загальна вартість розкислення-легування в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний; Точний склад кінцевої проби металу – вкл.; Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

Елементний склад шлаку – викл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт з лабораторної роботи №1 по курсу ФХППРМ, варіант \_\_\_\_\_  
 студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ ( ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn					–	–	–
SiMn							
FeSi65							
AB-87							
Коксик							
Карбід Si			–	–	–	–	–
Вапно							
Е/е МВт*год				–	–	–	–
Загальна маса, т							
Вартість лег., у. о.							
<b>Склад металу, ваг. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, ваг. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Температура, °С							

**Лабораторна робота №2**  
**«Оптимізація розкислення напівспокійної конструкційної сталі 3пс»**

1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 3пс (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%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; C 0,05%; Mn 0,05%; S 0,040%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «Excalibur» оптимізувати розкислення конструкційної сталі 3пс за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- маса газу, що утворюється, від 0 до 0,15 т;
- дозволені: FeMn, SiMn, FeSi65, АВ-87, коксик, карбід Si, ел/енергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.

- а) + без обмеження за мінімальною кінцевою температурою;
- б) + мінімальна кінцева температура 1605 + номер варіанта, °С;
- в) + відсутність карбиду Si;
- г) + відсутність електроенергії;
- д) + відсутність FeMn;
- е) + основність шлаку не менше 2 + дозволити вапно;
- ж) + вміст марганцю в пробі вихідного металу 0,10%;

3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

- а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;
- б) кінцева температура, °С;
- в) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- г) основність шлаку;
- д) склад металу в ваг. %;
- е) склад шлаку в ваг. % оксидів;
- ж) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Перед початком виконання роботи перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний

Точний склад кінцевої проби металу – вкл.

Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

Елементний склад шлаку – викл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт з лабораторної роботи №2 по курсу ФХППМ, варіант \_\_\_\_\_  
 студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn					–	–	–
SiMn							
FeSi65							
АВ-87							
Коксик							
Карбід Si			–	–	–	–	–
Вапно							
Е/е МВт*год				–	–	–	–
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у. о.</b>							
<b>Склад металу, ваг. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, ваг. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
<b>Температура, °С</b>							

## Лабораторна робота №3 «Оптимізація розкислення киплячої конструкційної сталі 08кп»

### 1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 08кп (ГОСТ 1050-88):

C 0,05–0,11%; Mn 0,3–0,5%; Si до 0,03%; S до 0,040%; P до 0,035%;

Вихідний метал: маса 230–255 т; C 0,05%; Si 0,01%; Mn 0,05%; S 0,035%;

P 0,005%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 3,5–4,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

### 2. За допомогою програми «Excalibur» оптимізувати розкислення киплячої конструкційної сталі 08кп (ГОСТ 1050-88) за наступних умов:

- середній тиск 1,5 атм;
- кінцевий вміст кисню в ковшевій пробі 0,04-0,065%;
- маса газу, що утворюється до 0,4 т;
- дозволені: FeMn (до 1,5т), SiMn, АВ-87 (до 0,1т), коксик (до 0,1т), ел/енергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.

а) + без обмеження за мінімальною кінцевою температурою;

б) + мінімальна кінцева температура 1610 + номер варіанта, °С;

в) + відсутність електроенергії;

г) + відсутність АВ-87;

д) + вміст марганцю в пробі вихідного металу 0,10%;

е) + основність шлаку не менше 2,5+дозволити вапно;

ж) + відома початкова маса шлаку 3–4 т.

### 3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;

б) кінцева температура, °С;

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

г) основність шлаку;

д) склад металу в ваг. %;

е) склад шлаку в ваг. % оксидів;

ж) загальна вартість розкислення в умовних одиницях.

### 4. Перед початком виконання роботи перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний

Точний склад кінцевої проби металу – вкл.

Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

Елементний склад шлаку – викл.

### 5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт з лабораторної роботи №3 по курсу ФХППМ, варіант \_\_\_\_\_  
 студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn							
SiMn							
AB-87				–	–	–	–
Коксик							
Вапно							
E/e MBт*год			–	–	–	–	–
Загальна маса, т							
Вартість легування, у. о.							
<b>Склад металу, ваг. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, ваг. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Об'єм газу, м <sup>3</sup>							
Температура, °C							

## Лабораторна робота №4 «Оптимізація легування конструкційної сталі 14ХГС»

### 1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 14ХГС (ГОСТ 19281-89):

C 0,11–0,16%; Mn 0,9–1,3%; Si 0,4–0,7%; Cr 0,5–0,8%; S до 0,040%; P до 0,035%;

Вихідний метал: маса 147-151 т; C 0,08%; Si 0,01%; Mn 0,05%; Cr 0,05%; S 0,030%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25-2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

### 2. За допомогою програми «Excalibur» оптимізувати легування сталі 14ХГС за наступних умов:

- середній тиск 100 кПа (1 атм);
- дозволені: FeMn (до 1,5т), SiMn, FeSi65, ФХ100Б, ФХ800Б, ФСХ33, коксик (до 0,1т), карбід Si, електроенергія (до 1 МВт\*год);
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- вихідна температура металу 1620 + номер варіанта, °С.

а) + мінімальна кінцева температура 1605 + номер варіанта, °С;

б) + відсутність феросилікохрому ФСХ33;

в) + відсутність ферохрому ФХ800Б;

г) + відсутність феромарганцю FeMn;

д) + вміст хрому і марганцю в пробі вихідного металу по  $0,05+0,01 \cdot \text{№ вар.}$ , %;

е) + відсутність карбіду Si;

ж) + відома початкова маса пічного шлаку 1–2 т.

### 3. Для кожного з пунктів (а–ж) завдання 2 зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) набір використаних матеріалів та їх маси в т, загальна маса в т;

б) кінцева температура, °С;

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

г) основність шлаку;

д) склад металу в вагових %;

е) склад шлаку в вагових % оксидів;

ж) загальна вартість розкислення-легування в умовних одиницях.

### 4. Перед початком виконання роботи перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний

Точний склад кінцевої проби металу – вкл.

Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

### 5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт з лабораторної роботи №4 по курсу ФХППМ, варіант \_\_\_\_\_  
 студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn				–	–	–	–
SiMn							
FeS65							
ФХ100Б							
ФХ800Б			–	–	–	–	–
ФХ33		–	–	–	–	–	–
Коксик							
Карбід Si						–	–
E/e МВт*год							
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у.о.</b>							
<b>Склад металу, ваг. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Cr]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, ваг. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Температура, °C							

**Лабораторна робота №5**



## «Оптимізація легування і десульфурзації конструкційної сталі 09Г2С»

### 1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 09Г2С (ГОСТ 19281-89):

С до 0,12%; Мп 1,3–1,7%; Si 0,5–0,8%; S до 0,030%; Р до 0,035%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; С 0,05%; Мп 0,12%; S 0,032%; Р 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,3%; Р 0,2%; СаО 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

2. За допомогою програми «Excalibur» оптимізувати легування конструкційної сталі 09Г2С і забезпечити в ній максимально припустимий рівень вмісту сірки 0,030% за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- дозволено: FeMn, SiMn, FeSi65, АВ-87(до 0,5т), карбід Si, вапно (до 2т), E/e (до 2 МВт\*год);
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °С;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °С.

а) + мінімальна кінцева температура 1610 + номер варіанта, °С;

б) + відсутність FeMn;

в) + відсутність карбіду Si;

г) + максимально припустима кількість електроенергії 1 МВт\*год;

д) + максимально припустима кількість вапна 1т;

е) + максимально припустима кількість АВ-87 0,2т;

ж) + відома початкова маса пічного шлаку 1–2 т.

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

а) набір використаних матеріалів і їх маси в т, загальна маса в т;

а) кінцева температура, °С;

б) загальні маси металу і шлаку, т;

в) основність шлаку;

г) склад металу в вагових %;

е) склад шлаку в вагових % оксидів;

ж) загальна вартість легування в умовних одиницях.

4. Перед початком виконання роботи перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний

Точний склад кінцевої проби металу – вкл.

Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

5. Рекомендована форма для занесення даних в звіт:

Звіт з лабораторної роботи №5 по курсу ФХППМ, варіант \_\_\_\_\_  
 студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ (ПІБ)

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) по варіантам						
	а	б	в	г	д	е	ж
FeMn		-	-	-	-	-	-
SiMn							
FeSi65							
AB-87							
Карбід Si			-	-	-	-	-
Вапно							
Е/е МВт*год							
<b>Загальна маса, т</b>							
<b>Вартість лег., у.о.</b>							
<b>Склад металу, ваг. %</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, ваг. %</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
<b>Температура, °С</b>							

## Лабораторна робота № 6-7 «Вакуумування конструкційної сталі 12ГС»

### 1. Вихідні дані:

Склад готової сталі 12ГС (ГОСТ 19281-89):

C 0,09–0,15%; Mn 0,8–1,2%; Si 0,5–0,8%; S до 0,040%; P до 0,035%.

Вихідний метал: маса 147–151 т; C 0,06%; Mn 0,05%; S 0,035%; P 0,015%.

Вихідний (пічний) шлак: маса 1,25–2,5 т; FeO 25%; SiO<sub>2</sub> 20%; MnO 5%; S 0,1%; P 0,4%; CaO 45%; MgO 3%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1,5%.

### 2. За допомогою програми «Excalibur» оцінити вплив обробки вакуумом на хімічний склад сталі, шлаку і газової фази за наступних умов:

- початковий тиск 1 атм;
- дозволено: FeMn, SiMn, FeSi65, коксик, карбід Si, вапно, електроенергія;
- температура навколишнього середовища  $t_{\text{навк}} = 30$  – номер варіанта, °C;
- початкова температура металу 1620 + номер варіанта, °C;
- мінімальна кінцева температура 1615 + номер варіанта, °C.

а) оптимізувати легування ст. 12ГС при початковому тиску 1 атм;

б) + знизити тиск до 0,5 атм (відредагувати поле «Тиск» на головній формі програми і натиснути <Enter>);

в) + 0,1 атм; г) + 0,05 атм; д) + 0,01 атм; е) + 0,005 атм; ж) + 0,001 атм.

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

- а) набір використаних матеріалів в т;
- б) склад металу і газу в вагових %, склад шлаку в вагових % оксидів;
- в) склад металу, шлаку і газу в кг;
- г) загальні маси металу, шлаку і газу, т;
- д) кінцева температура, °C.

### 4. В координатах $\ln(P) - X$ , $\ln(C, O, Mn, \%) - Y$ побудувати графічні залежності відсоткового (% за вагою) складу фази від тиску: а) металу; б) шлаку; в) газу.

### 5. В координатах $\ln(P) - X$ , $\ln(C, O, Mn, \text{кг}) - Y$ побудувати графічні залежності вагового (в кг) складу фази від тиску: а) металу; б) шлаку; в) газу.

### 6. В координатах $\ln(P) - X$ , $t^{\circ}\text{C} - Y$ побудувати графічну залежність кінцевої температури від тиску.

### 7. Дати пояснення побудованим графікам.

### 8. Перед початком виконання роботи перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – точний,

Точний склад кінцевої проби металу – вкл.,

Автоматично оцінювати [O] на випуску – вкл.

Звіт з лабораторної роботи №6-7 по курсу ФХППРМ, варіант \_\_\_\_\_

студента(ки) гр. \_\_\_\_\_ (ПІБ)

	Завдання						
	а	б	в	г	д	е	ж
<b>Тиск, атм</b>	1	0,5	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001
<b>Матеріали (оптим. при 1 атм)</b>	FeMn	SiMn	FeS65	Коксик	Карбид Si	Известь	Э/э МВг*ч
<b>Склад металу, ваг. % / кг</b>							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
<b>Склад шлаку, ваг. % / кг</b>							
(FeO)							
(SiO <sub>2</sub> )							
(MnO)							
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )							
Маса шлаку, т							
<b>Склад газової фази, ваг. % / кг</b>							
{Fe}							
{C}							
{Mn}							
{Mg}							
{O}							
Маса газу, т							
Об'єм газу, м <sup>3</sup>							
<b>Т-ра, С</b>							

### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мельник С. Г. Производство стали улучшенного качества с применением внепечной обработки. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 1999. № 7, . С. 155-164.
2. Основные направления исследований технологи обработки стали на агрегате «ковш-печь» / В. А. Вихлевщук В.А. и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сборник научных трудов*. 2004. Вип. 8. С. 189-195.
3. Особенности современного оборудования и технологий внепечной обработки стали / В. П. Пиптюк и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сборник научных трудов*. 2005. Вип. 11. С. 67-79.
4. Производство стали на агрегате ковш-печь / Дюдкин Д.А. и др. Донецк : ООО «Юго-Восток» ЛТД, 2003. 300 с.
5. Опыт эксплуатации установок печь-ковш в сталеплавильных цехах машиностроительных заводов / С. А. Иодковский и др. *Труды Первого конгресса сталеплавыльщиков*, 12-15 октября 1992 г. Москва: ОАО «ЧЕРМетинформация», 1993. С. 227-232
6. Совершенствование конвертерного производства стали в ОАО ММК / Р. С. Тахаутдинов и др. *Сталь*. 2002. № 1. С. 12-14
7. Смирнов А. Н., Сафонов В. И. Вне печи. *Металл*. 2004. № 12. С. 20-24
8. Проектирование и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов : учебник / Гладких В. А. и др. Днепропетровск, 2004. 736 с.
9. Вихлевщук В. А., Харахулах В. С., Бродский С. С. Ковшевая доводка стали : монография. Днепропетровск, 2000. 190 с.
10. Новиков Ю. П. Гидродинамические и тепловые процессы в шлаковой ванне трехфазной печи. *ЭлектрOMETаллургия*. 2001. № 12. С. 19-23
11. Возможности и перспективы использования программы «Excalibur» в учебном процессе / А. В. Харченко и др. *Сб. наукових праць ЗДІА. Металургія*. 2013. Вип 1(29). С. 169-175.

12. Пономаренко А. Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему. *Журнал физической химии*. 1974. № 7, т. 48. С. 1668-1674; № 8. С. 1950-1958.
13. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Корзун Е. Л. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2004. №8. С. 135-139.
14. Харченко А. В. Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса. *Металл и литье Украины*. 2005. № 6. С. 13-17.
15. Харченко А. В., Пономаренко А. Г. О кинетике межфазного массопереноса в металлургических агрегатах. *Металл и литье Украины*. 2002. № 12. С. 41-42.
16. Харченко А. В., Пономаренко А. Г., Довгонюк С. В. Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 10. С. 131-137.
17. Разработка информационно–технологической системы «Форвард» для управления металлургическими процессами в реальном масштабе времени / А. В. Харченко и др. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991. № 12. С. 89-91.
18. Храпко С. А., Иноземцева Е. Н., Харченко А. В. Термодинамическая модель системы «металл-шлак-газ» и интегрированная система «Оракул»: использование для прогнозных расчетов и управления в составе АСУТП и разработки сталеплавильных процессов. *Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии* : зб. материалов Всесоюзной конф. Новокузнецк. 1991. С. 222-223.
19. Промышленное освоение системы управления внепечной обработкой стали (печь-ковш-вакууматор) ГИББС® на БМЗ / Р. В. Синяков и др. *Металл и литье Украины*. 2005. № 3-4. С. 98-100.

## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : навч. посіб. / Д. Ф. Чернега та ін. Київ, 2006. 503 с.
2. Величко О. Г., Бойченко Б. М., Стоянов О. М. Технології підвищення якості сталі : навч. посіб. Дніпропетровськ, 2009. 212 с.
3. Поволоцкий Д. Я., Кудрин В. А., Вишкарев А. Ф. Внепечная обработка стали : Москва, 1995. 256 с.
4. Кудрин В. А. Металлургия стали : учебник для вузов. Москва : Металлургия, 1989. 560 с.
5. Зборщик О. М. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу : навч. посіб. Донецьк : ДонНТУ, 2001. 154 с.
6. Бигеев А. М., Бигеев В. А. Металлургия стали : учебник. Магнитогорск, 2000. 544 с.
7. Поволоцкий Д. Я. Физико-химические основы процессов производства стали : компьютерная версия учебного пособия для вузов. Изд. 2-е, перер. Челябинск : ЮУрГУ, 2007. 183 с.
8. Ковальов Г. М. Позапічна обробка чорних металів : навч. посіб. Донецьк : ДонГТУ, 1997. 213 с.
9. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія : підручник. Дніпропетровськ, 2004. 454 с.
10. Внепечные способы улучшения качества стали / Чуйко Н. М. и др. Киев, 1978. 128 с.
11. Внепечное рафинирование чугуна и стали / Борнацкий И. И. и др. Киев, 1979. 168 с.
12. Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу : навчальний посібник для студентів спеціальності 6.050401 «Металургія чорних металів» денної та заочної форми навчання / Воденніков С. А., Харченко О. В., Лічконенко Н. В., Громак Г. А. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 108 с.

Навчально-методичне видання  
(українською мовою)

Харченко Олександр Вікторович  
Лічконенко Наталія Володимирівна  
Панова Віра Олегівна

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ  
ПОЗААГРЕГАТНОГО РАФІНУВАННЯ МЕТАЛУ

Методичні вказівки до лабораторних занять  
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра  
спеціальності 136 «Металургія»

Рецензент *О.В. Явтушенко*  
Відповідальний за випуск *Ю.Ф. Терновий*  
Коректор *В.О. Панова*