О. В. Харченко

НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС «EXCALIBUR»
Версія 2.00

Запоріжжя – 2023

ЗМІСТ

6. ТИПОВІ ПРИКЛАДИ ПРЯМОЇ І ЗВОРОТНОЇ ЗАДАЧ 4
6.1. Оптимізація розкислення та легування сталі в ковші 5
6.1.1. Спокійна низьколегована сталь 6
6.1.2. Напівспокійна сталь 8
6.1.3. Кипляча сталь 10
6.2. Обробка сталі в ковші-печі 12
6.3. Оптимізація завалки 15
6.4. Моделювання електродугової плавки 18
6.4.1. Алгоритм розрахунку плавлення брухту 20
11. НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС «EXCALIBUR» 21
11.1. Загальні відомості 21
11.2. Головна форма 23
11.2.1. Таблиця матеріалів 24
11.2.2. Таблиця хімічних елементів 24
11.2.3. Таблиця газів 26
11.2.4. Список альтернативних рішень 27
11.2.5. Панель параметрів 28
11.2.6. Панель інструментів 29
11.2.7. Головне меню 30
11.2.8. Статусний рядок 32
11.2.9. Випадаючий список вибору файлу завдань 33
11.2.10. Випадаючий список вибору завдання на плавку 33
11.3. Редактор завдання на плавку 33
11.3.1. Таблиця обмежень щодо складу металу 36
11.3.2. Таблиця обмежень щодо складу шлаку 37
11.3.3. Таблиця обмежень за матеріалами 37
11.3.4. Панель інших обмежень та вихідних даних 38
11.3.5. Елемент управління вкладками 39
11.4. Ефективність матеріалів 39
11.5. Форма процесу електродугової плавки 42
11.5.1. Графік хімічного складу металу 43
11.5.2. Графік температури, мас металу та шлаку 44
11.5.3. Графік завдання матеріалів та енергоносіїв 44
11.5.4. Панель поточних параметрів плавки 44
11.5.5. Панель управління моделюванням електродугової плавки ... 45
11.6. Крива електронейтральності 46
11.7. Опції 46
11.7.1. Загальні опції 49
11.7.2. Опції плавки в ДСП 52
11.7.3. Опції збереження 53
11.8. Службові файли 53

11.8.1. Файл проєкту «Excalibur» (FWP) 54
11.8.2. Файл матеріалів (MAT) 54
11.8.3. Файл констант та теплофізичних даних (CON) 56
11.8.4. Файл завдань на плавку (TSK) 58
11.8.5. Файл протоколу електродугової плавки (HEA) 60
11.8.6. Файл газових констант (GAS) 62
11.8.7. Файл параметрів Вагнера (EPS) 63
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 64

1. ТИПОВІ ПРИКЛАДИ ПРЯМОЇ І ЗВОРОТНОЇ ЗАДАЧ

Для роботи з прикладами прямої та зворотної задач використовується навчально-дослідницький програмний комплекс (ПК) «Excalibur» [9-11]. Опис та інтерфейс користувача ПК «Excalibur» наведено у розділі 11.

У каталозі ПК «Excalibur» потрібна наявність наступних файлів:

```
8644.HEA        DSP.MAT         EXCALIBUR.EPS   PECHKOVSH.TSK
ALLOYING.FWP    DSP.TSK         EXCALIBUR.EXE   ZAVALKA.CON
ALLOYING.MAT    ELEMENTS.FWP    EXCALIBUR.GAS   ZAVALKA.FWP
ALLOYING.TSK    ELEMENTS.MAT    EXCALIBUR.INI   ZAVALKA.MAT
DSP.CON         ELEMENTS.TSK    PECHKOVSH.FWP   ZAVALKA.TSK
DSP.FWP         EXCALIBUR.CON   PECHKOVSH.MAT
```

Користувачеві потрібно буде відкривати файли проектів `ALLOYING.FWP`, `PECHKOVSH.FWP`, `ZAVALKA.FWP`, `DSP.FWP`, `ELEMENTS.FWP`, наприклад, за допомогою кнопки на панелі інструментів (див. §2.2.6).

При роботі з прямою задачою основною дією користувача є проплавлення набору матеріалів, зазначених у таблиці матеріалів, наприклад, за допомогою кнопки або функціональної клавіші F9. Колонка мас таблиці матеріалів редагується і дозволяє користувачеві задавати довільні маси матеріалів.

У зворотної задачі користувач оптимізує набір матеріалів, який автоматично проплавляється. Для оптимізації найпростіше використовувати кнопку або функціональну клавішу F10.

В окремих випадках, коли автоматична оптимізація не призводить до бажаного результату, користувач може діяти за принципом «Що, якщо?», по черзі проплавляючи різні комбінації матеріалів. Якщо в такий спосіб буде знайдено будь-який прийнятний варіант, його можна буде використовувати як перше наближення для зворотної задачі шляхом включення в набір рекомендованих матеріалів та вимкнення опції «Автоматичний пошук початкового наближення». Набір рекомендованих матеріалів можна скоригувати за допомогою редактора завдань (F5).

У всіх прикладах матеріали мають орієнтовні ціни, наведені лише з метою демонстрації рішення прямої та зворотної задач та можливостей

програмного комплексу. При цьому слід мати на увазі, що співвідношення цін на матеріали суттєво впливає на оптимальний набір матеріалів, вартість якого має бути мінімальною у цих умовах. Для проектування реальної технології чи роботи програми у виробничих умовах необхідно використовувати планові чи фактичні ціни конкретного підприємства.

У наведених нижче прикладах показані варіанти легування, в яких навмисно виключено або обмежено деякі матеріали зі списку оптимізованих. Насправді це означає відсутність (нестачу) того чи іншого матеріалу на даний момент легування. Слід пам'ятати, що варіантів з виключенням чи обмеженням окремих матеріалів існує безліч. Застосування того чи іншого варіанту залежить від конкретної виробничої обстановки.

ПК «Excalibur» адекватно відпрацьовує досить складні ситуації, коли користувач задає комплекс обмежень на температуру, хімічний склад металу та шлаку, доступність матеріалів, маси металу, шлаку та газу, основність шлаку.

1.1. Оптимізація розкислення та легування сталі в ковші

Файл матеріалів `ALLOYING.MAT`, що використовується в прикладах, має наступний зміст:

```
     @Fe         C       Si      Mn       Al       S      P     Mg
FeMn         |   6/7    0.3/1   77.5/81  0      .03     .70     0   $ 2375 #0.95
SiMn         |   1.4    17.0     60      0      .03     .63     0   $ 2550 #0.95
FeSi45       |   0.15    45     0.3/1    0      .03      .1     0   $ 1955 #0.95
FeSi65       |   0.15    65     0.3/1    0      .03      .1     0   $ 2300 #0.95
AB-87        |    0      0/4      0    86/88     0       0    0.5 $ 6085 #0.8

@                C        S        P
Коксик       |  75/80     0/1.5   0/.01     $ 140 #0.75/0.85

@                SiC
Карбід Si    |  94/97 $ 1200

@              FeO   Al2O3   SiO2 MnO CaO MgO
Футерівка    | 2.5   5.5     65    2   15  10    $ 0

@FeO
Окалина      | $ 50
```

При необхідності редагуємо його (див. §2.8.2), наприклад, з метою коригування цін на матеріали або уточнення їхнього хімічного складу.

За допомогою кнопки 📂 відкриємо файл проекту `ALLOYING.FWP`.

Відкриємо в меню **Опции** вкладку **Общие** та переконаємося, що всі установки мають значення за замовчуванням (див. §2.7.1). Зокрема,

автоматична оцінка окисленості металу [O] на випуску та автоматичний пошук початкового наближення мають бути включені, а точний склад проби металу – вимкнено. Розрахунок температури – точний.

Вихідні дані для всіх прикладів легування та розкислення в ковші однакові:

- Зі сталеплавильного агрегату в ківш випускається 147-151 т напівпродукту, що містить 0,05% C, 0,05% Mn, 0,038% S, 0,015% P;
- У ківш потрапляє 1,25-2,5 т пічного шлаку, що містить 23% FeO, 16% SiO_2, 5% MnO, 0,1% S, 0,4% P_2O_5, 50% CaO, 4% MgO, 1,5% Al_2O_3;
- Початкова температура розплаву 1625 °C;
- В результаті ерозії та розчинення в шлак переходить 100 кг футерування ковша.

Використовуючи редактор завдання на плавку (функціональна клавіша F5), за необхідностю коригуємо вихідні дані та обмеження.

1.1.1. Спокійна низьколегована сталь

З випадаючого списку 10 (§2.2.10, рис. 2.1) виберемо завдання на плавку спокійної низьколегованої сталі 12MnSi4-3 (12ГС). Для цієї марки сталі необхідно забезпечити вміст вуглецю 0,09-0,15%, марганцю 0,8-1,2%, кремнію 0,5-0,8%, не більше 0,040% сірки і не більше 0,035% фосфору.

У таблиці матеріалів та елементів на головній формі видно результат проплавлення набору рекомендованих матеріалів: 2 т феромарганцю (FeMn), 1,5 т феросиліцію 65% (FeSi65), 0,1 т алюмінію вторинного (АВ-87), вартістю 8809 у.о., який не є оптимальним (табл. 1.1 варіант I).

Одним із способів (див. §§2.2.6, 2.2.7), наприклад, за допомогою функціональної клавіші F10, включимо оптимізацію матеріалів. Час рахунку становить частки секунди. В результаті для отримання сталі заданого складу достатньо задати в ківш набір матеріалів: 1,952 т феросилікомарганцю (SiMn), 0,72 т феросиліцію 65% (FeSi65) та 0,398 т карбіду кремнію загальною вартістю 7111 у.о. (табл. 1.1, варіант II).

Таблиця 1.1 – *Вихідні дані та результати розрахунків різних варіантів легування спокійної низьколегованої сталі 12MnSi4-3*

Матеріали	**Ціна за 1 т, у.о.**		**Маси матеріалів (т) за варіантами легування**				
			I	**II**	**III**	**IV**	**V**
FeMn	2375		2		1,496	1,5	нет
SiMn	2550			1,952			1,955
FeSi45	1955					2,394	1,668
FeSi65	2300		1,5	0,72	1,647	нет	нет
АВ-87	6085		0,1				
Коксик	140						0,079
Карбід Si	1200			0,398	нет	нет	нет
Вартість легування, у.о.			**8809**	**7111**	**7341**	**8243**	**8257**
Склад металу, %	**На випуску**	**Завдання**	**Метал в ковші**				
[C]	0,05	0,09-0,15	0,12-0,14	0,13-0,15	0,10-0,12	0,10-0,12	0,09-0,11
[Si]		0,50-0,80	0,48-0,57	0,50-0,59	0,50-0,59	0,50-0,59	0,50-0,59
[Mn]	0,05	0,80-1,20	1,03-1,10	0,80-0,83	0,80-0,85	0,80-0,86	0,80-0,83
[S]	0,038	≤ 0,040	0,015-0,016	0,015-0,017	0,015-0,017	0,015-0,016	0,015-0,016
[P]	0,015	≤ 0,035	0,025-0,028	0,023-0,027	0,023-0,026	0,023-0,027	0,024-0,027
Маса металу, т	147-151		150,4-154,5	149,9-154	150,0-154,1	150,7-154,8	150,5-154,6
Склад шлаку, %	**На випуску**	**Завдання**	**Шлак в ковші**				
(FeO)	23		0,20-0,23	0,21-0,23	0,22-0,24	0,21-0,22	0,21-0,23
(SiO_2)	16		34,6-34,7	39,8-43,9	39,7-43,8	39,8-43,9	39,8-43,9
(MnO)	5		2,35-2,43	1,97-1,98	1,99-2,07	1,96-2,04	1,97-1,99
(Al_2O_3)	1,5		6,93-11,2	1,74-1,76	1,74-1,76	1,74-1,75	1,74-1,75
(CaO)	50		45,8-50,8	46,5-51,2	46,8-51,2	46,4-51,2	46,4-51,2
(MgO)	4		4,30-4,41	4,43-4,32	4,43-4,32	4,43-4,31	4,43-4,31
(S)	0,1		1,29-2,78	1,29-2,77	1,28-2,77	1,31-2,83	1,30-2,87
(P_2O_5)	0,4		0,003-0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
Маса шлаку, т	1,25-2,5		1,4-2,49	1,38-2,47	1,38-2,47	1,38-2,47	1,38-2,47
Т-ра, °С	1625		1581-1594	1583-1596	1586-1599	1578-1592	1582-1595

Примітка. За варіантом I оптимізація не проводилася.

За допомогою контекстного меню таблиці матеріалів (що активується натисканням правої кнопки миші) зі списку доступних матеріалів послідовно видаляємо карбід кремнію, феросиліцій FeSi65, феромарганець FeMn і включаємо оптимізацію. Із запровадженням кожного нового обмеження

вартість легування незмінно підвищується (табл. 1.1, варіанти III-V), залишаючись, однак, мінімальною для цих умов.

Подальша заборона доступних матеріалів призведе до спрацьовування алгоритму пошуку альтернативних рішень із неповною відповідністю заданим обмеженням.

1.1.2. Напівспокійна сталь

З випадаючого списку 10 (§2.2.10, рис. 2.1) виберемо завдання на плавку напівспокійної вуглецевої сталі С18.

На відміну від спокійної сталі, для розкислення напівспокійної сталі недостатньо забезпечити лише вимоги щодо хімічного складу (C 0,14-0,22%, Mn 0,45-0,65%, Si 0,04-0,14%, S ≤ 0,050%, P ≤ 0,040%). Необхідно також забезпечити оптимальну газонасиченість металу в ковші, при якій злиток напівспокійної сталі має трохи опуклий меніск. Для сталі С18 оптимальна газонасиченість становить 0,33...1,0 кг на тонну рідкої сталі. При нестачі газу спостерігається значна садинна раковина (увігнутий меніск), а при його надлишку – рослість зливка та перевитрата алюмінію на розливанні. В обох випадках знижується вихід придатного металу.

У таблиці матеріалів та елементів на головній формі видно результат проплавлення набору рекомендованих матеріалів (1,4 т феромарганцю, 0,35 т коксику, вартість 3619 у.о.), який не є оптимальним (табл. 1.2 варіант I).

Одним із способів (див. §§2.2.6, 2.2.7), наприклад, за допомогою функціональної клавіші F10, включимо оптимізацію матеріалів. Час розрахунку становить частки секунди. В результаті для отримання сталі заданого складу та оптимальної газонасиченості достатньо задати в ківш набір матеріалів: 0,804 т феромарганцю FeMn, 0,166 т коксику та 0,267 т карбіду Si загальною вартістю 2253 у.о. (табл. 1.2, варіант II).

За допомогою контекстного меню таблиці матеріалів (що активується натисканням правої кнопки миші) зі списку доступних матеріалів послідовно видаляємо карбід кремнію, феросиліцій FeSi65, феросиліцій FeSi45 і включаємо оптимізацію. Як і в попередньому прикладі, із запровадженням кожного нового

обмеження вартість розкислення незмінно підвищується (табл. 1.2, варіанти III-V), залишаючись мінімальною для цих умов.

Таблиця 1.2 – *Вихідні дані та результати розрахунків різних варіантів розкислення напівспокійної вуглецевої сталі С18*

Матеріали	**Ціна за 1 т, у.о.**		**Маси матеріалів (т) за варіантами розкислення**				
			I	**II**	**III**	**IV**	**V**
FeMn	2375			0,804	0,804	0,804	
SiMn	2550		1,4				1,045
FeSi45	1955					0,418	нет
FeSi65	2300				0,288	нет	нет
АВ-87	6085						0,025
Коксик	140		0,35	0,166	0,303	0,309	0,363
Карбід Si	1200			0,267	нет	нет	нет
Вартість легування, у.о.			**3619**	**2253**	**2614**	**2770**	**2868**
Склад металу, %	**На випуску**	**Завдання**	**Метал у ковші**				
[C]	0,05	0,14-0,22	0,16-0,22	0,14-0,20	0,15-0,21	0,15-0,21	0,15-0,21
[Si]		0,04-0,14	0,05-0,08	0,04-0,07	0,04-0,07	0,04-0,07	0,04-0,07
[Mn]	0,05	0,45-0,65	0,57-0,60	0,45-0,48	0,45-0,49	0,45-0,49	0,45-0,47
[S]	0,038	≤ 0,050	0,033-0,036	0,034-0,037	0,034-0,038	0,034-0,038	0,034-0,038
[P]	0,015	≤ 0,040	0,021-0,024	0,019-0,022	0,019-0,022	0,019-0,022	0,019-0,023
Маса металу, т	147-151		148,6-152,7	148,2-152,3	148,3-152,4	148,4-152,5	148,3-152,4
Склад шлаку, %	**На випуску**	**Завдання**	**Шлак у ковші**				
(FeO)	23		0,76-1,04	0,78-1,09	0,75-1,09	0,75-1,07	0,72-1,05
(SiO_2)	16		33,3-38,9	31,7-36,7	31,8-36,3	31,8-36,5	30,5-33,9
(MnO)	5		4,26-4,95	3,49-4,09	3,43-4,09	3,43-4,08	3,18-3,97
(Al_2O_3)	1,5		1,84-1,86	1,91-1,97	1,91-1,98	1,91-1,98	3,35-4,69
(CaO)	50		49,2-54,0	51,9-56,1	52,3-56,1	52,2-56,1	52,2-56,1
(MgO)	4		4,59-4,67	4,82-4,85	4,84-4,85	4,84-4,85	4,85-4,86
(S)	0,1		0,29-0,84	0,23-0,57	0,23-0,66	0,23-0,68	0,23-0,68
(P_2O_5)	0,4		0,034-0,060	0,040-0,072	0,039-0,072	0,038-0,072	0,042-0,075
Маса шлаку, т	1,25-2,5		1,3-2,34	1,23-2,25	1,22-2,26	1,23-2,26	1,23-2,26
Маса газу, т		0,05-0,15	0,025-0,089	0,072-0,15	0,082-0,15	0,081-0,15	0,084-0,15
Температура, °С	1625		1596-1606	1600-1608	1598-1607	1596-1606	1598-1607

Примітка. За варіантом I оптимізація не проводилася.

1.1.3. Кипляча сталь

З випадаючого списку 10 (§2.2.10, рис. 2.1) виберемо завдання на плавку киплячої вуглецевої сталі С8 (08кп).

Так само як і для напівспокійної сталі, для розкислення киплячої сталі недостатньо забезпечити лише вимоги за хімічним складом (C 0,05-0,11%, Mn 0,30-0,50%, Si ≤ 0,03%, S ≤ 0,040%, P ≤ 0,035%). Кипляча сталь при розливанні повинна мати окисленість, при якій сталевий злиток кристалізується з оптимальним балом розкислення 1. Для сталі 08кп оптимальний вміст кисню становить 0,050...0,070%. При зниженій окисленості спостерігається значна садинна раковина (бал 3), а при підвищеній – рослість зливка та перевитрата алюмінію на розливанні (бал 0). В обох випадках знижується вихід придатного металу.

Необхідно також обмежити газоутворення величиною 1,3...1,4 кг/т, щоб уникнути закипання металу в ковші.

Крім того, з міркувань зниження браку металу за розшаруванням зі списку доступних матеріалів виключаються всі кремнійвмісні матеріали: SiMn, FeSi45, FeSi65 і карбід Si.

У таблиці матеріалів та елементів на головній формі видно результат проплавлення набору рекомендованих матеріалів (1 т FeMn, вартість 2375 у.о.), який не є оптимальним (табл. 1.3 варіант I).

Одним із способів (див. §§2.2.6, 2.2.7), наприклад, за допомогою функціональної клавіші F10, включимо оптимізацію матеріалів. Час розрахунку становить частки секунди. В результаті для одержання сталі заданого складу та забезпечення інших обмежень достатньо задати в ківш набір матеріалів: 0,85 т феромарганцю FeMn та 0,015 т коксику загальною вартістю 2021 у.о. (табл. 1.3, варіант II).

Зі списку доступних матеріалів послідовно видаляємо коксик, вторинний алюміній АВ-87 і включаємо оптимізацію (табл. 1.3, варіанти III-IV).

Таблиця 1.3 – *Вихідні дані та результати розрахунків різних варіантів розкислення киплячої вуглецевої сталі С8*

Матеріали	**Ціна за 1 т, у.о.**		**Маси матеріалів (т) за варіантами розкислення**			
			I	**II**	**III**	**IV**
FeMn	2375		1	0,85	0,839	0,903
SiMn	2550			нет	нет	нет
FeSi45	1955			нет	нет	нет
FeSi65	2300			нет	нет	нет
АВ-87	6085				0,028	нет
Коксик	140			0,015	нет	нет
Карбід Si	1200			нет	нет	нет
Вартість легування, у.о.			**2375**	**2021**	**2163**	**2145**
Склад металу, %	**На випуску**	**Завдання**	**Метал у ковші**			
[C]	0,05	0,05-0,11	0,05-0,07	0,05-0,07	0,05-0,07	0,05-0,07
[Si]		≤ 0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
[Mn]	0,05	0,30-0,50	0,40-0,52	0,36-0,46	0,36-0,46	0,37-0,48
[S]	0,038	≤ 0,040	0,034-0,038	0,034-0,039	0,034-0,039	0,034-0,039
[P]	0,015	≤ 0,035	0,016-0,022	0,015-0,021	0,015-0,021	0,015-0,021
[O]		0,05-0,07	0,048-0,065	0,050-0,068	0,050-0,068	0,051-0,068
Маса металу, т	147-151		148-152	147,9-151,9	147,9-151,9	147,9-152
Склад шлаку, %	**На випуску**	**Завдання**	**Шлак у ковші**			
(FeO)	23		4,36-6,55	4,10-6,49	3,82-6,20	4,43-6,74
(SiO_2)	16		18,8-21,2	19,2-21,7	19,1-21,2	19,0-21,4
(MnO)	5		14,2-15,4	12,0-13,6	11,1-12,9	13,2-14,4
(Al_2O_3)	1,5		1,78-2,00	1,82-2,06	3,33-5,11	1,79-2,02
(CaO)	50		52,3-52,7	53,5-54,5	53,1-53,2	52,7-53,3
(MgO)	4		4,53-4,92	4,64-5,07	4,61-4,98	4,57-4,97
(S)	0,1		0,23-0,30	0,20-0,26	0,20-0,25	0,21-0,28
(P_2O_5)	0,4		0,42-0,61	0,46-0,67	0,46-0,66	0,47-0,66
Маса шлаку, т	1,25-2,5		1,21-2,42	1,18-2,37	1,2-2,38	1,2-2,4
Маса газу, т		≤ 0,2	0,10-0,11	0,11-0,12	0,082-0,096	0,096-0,11
Темпера-тура, °С	1625		1609-1613	1610-1613	1613-1615	1610-1613

Примітка. За варіантом I оптимізація не проводилася.

Якщо заборонити останній доступний матеріал (FeMn), спрацює алгоритм пошуку альтернативних рішень, який знову вкаже на брак 0,903 т феромарганцю FeMn, тобто на варіант розкислення IV.

1.2. Обробка сталі в ковші-печі

Файл матеріалів `PECHKOVSH.MAT`, що використовується в прикладі, має наступний зміст (ціни вказані в у.о.):

@Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	Ni	Mo	
ФМн70	6/7	3/6	65/72	0	0/.02	0/.7	0	0	0	0	$ 375
МнС17А	0/2.5	16/18	65/72	0	0/.02	0/.1	0	0	0	0	$ 385
ФС45	0/.1	43/46	0/.6	0/2	0/.02	0/.05	0	0/.5	0	0	$ 250
ФХ800	7.89	1.5	0	0	0/.05	0/.05	0	67.7	0	0	$ 714
ФМо60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	$ 1000
Коксик	75/80	0	0	0	0/.01	0/.01	0	0	0	0	$ 110
АВ-88	0	0/2	0	90/88	0	0	0/2	0	0	0	$ 700
Нікель Н-1	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	$ 8000

@	CaO	CaCO3	SiO2	MgO	Al2O3	Fe2O3	FeO	S	P	CaF2	
Вапно	99	0	0	0.7	0	0	.6	0/.09	0/.05	0	$ 55
Магнезит	2.92	0	2.86	91.27	0.53	1.88	0	0	0	0	$ 60
Доломіт	39	0	3.4	30.5	.07	0	1.8	0	0	0	$ 60
Шпат	1	0	21	0	0	0	0	0/.02	0	75	$ 60

При необхідності редагуємо його (див. §2.8.2), наприклад, з метою коригування цін на матеріали або уточнення їхнього складу.

За допомогою кнопки відкриємо файл проекту `PICHKOVSH.FWP`.

Відкриємо в меню **Опції** вкладку **Загальні** и убедимся, та переконаємося, що всі установки мають значення за замовчуванням (см. §2.7.1). Зокрема, автоматична оцінка [O] на випуску та автоматичний пошук початкового наближення мають бути включені, а точний склад проби металу – вимкнено. Розрахунок температури – точний.

За допомогою функціональної клавіші F5 відкриємо редактор завдання та переконаємося в коректності поставленої зворотної задачі, що полягає в отриманні сталі 34CrNiMo4-12-1 (34ХН3МА) на установці ківш-піч УПК1 НКМЗ.

Вихідні дані:

- у ковші знаходиться 65-70 т напівпродукту, що містить 0,11% C, 0,09%Si, 0,16% Mn, 0,050% S, 0,010% P, 0,3%Cr, 0,24%Mo, 2,37%Ni;
- у ковші знаходиться 0,5-1,0 т шлаку, що містить 25% FeO, 16% SiO_2, 5% MnO, 0,1% S, 0,5% P_2O_5, 6% CrO, 40% CaO, 5% MgO, 3% Al_2O_3;
- початкова температура розплаву 1620 °C;
- метал підігрівається шляхом введення 3800 МДж електроенергії;
- теплові втрати становлять 1000 МДж;

- маса вапна, що одноразово задається, обмежена величиною 0,2 т;

Потрібно отримати сталь 34CrNiMo4-12-1 наступного складу: C 0,30-0,40%, Si 0,20-0,37%, Mn 0,50-0,80%, Cr 0,7-1,1%, Mo 0,3-0,4%, Ni 2,4-3,25%, S не більше 0,025%, P не більше 0,025%. При цьому, щоб сталь була спокійною, обмежуємо газоутворення величиною 0,01 т.

Вийдемо з редактора завдання натисканням кнопки **Прийняти**.

У таблиці матеріалів та елементів на головній формі видно результат проплавлення набору рекомендованих матеріалів (0,5 т МнС17А, 0,1 т ФС45, 0,4 т ФХ800, 0,1 т ФМо60, 0,15 т коксику, 0,05 т АВ-88, 0,1 т нікелю Н-1, вартість 1455 у.о.), який не є оптимальним (табл. 1.4, вариант I).

Одним із способів (див. §§2.2.6, 2.2.7), наприклад, за допомогою функціональної клавіші F10, включимо оптимізацію матеріалів. Час розрахунку складає близько 2 секунд. В результаті для отримання сталі заданого складу з обмеженим газовиділенням достатньо задати в ківш набір матеріалів: 0,359 т феросилікомарганцю МнС17А, 0,247 т феросиліцію ФС45, 0,373 т ферохрому ФХ800, 0,072 т феромолібдену ФМо60, 0,163 т коксику, 0,062 т нікелю Н-1 та 0,095 т магнезиту загальною вартістю 1058 у. е. (табл. 1.4, варіант II).

Далі зі списку доступних матеріалів послідовно видаляємо магнезит, доломіт, феросилікомарганець МнС17А і включаємо оптимізацію (табл. 1.4 варіанти III-V).

Таблиця 1.4 – *Вихідні дані та результати розрахунків різних варіантів обробки сталі 34CrNiMo4-12-1 на установці ківш-піч*

Матеріали	Ціна за 1 т, у.о.	Маси матеріалів (т) за варіантами обробки				
		I	II	III	IV	V
ФМн70	375					0,359
МнС17А	385	0,5	0,359	0,354	0,335	нет
ФС45	250	0,1	0,247	0,254	0,029	0,356
ФХ800	714	0,4	0,373	0,373	0,371	0,374
ФМо60	1000	0,1	0,072	0,072	0,072	0,073
Коксик	110	0,15	0,163	0,188	0,171	0,14
АВ-88	700	0,05			0,146	

Нікель Н-1	8000		0,1	0,062	0,063	0,059	0,064
Вапно	55				0,2	0,2	
Магнезит	60			0,095	нет	нет	0,088
Доломіт	60				0,164	нет	
Вартість легування, у.о.			**1455**	**1058**	**1084**	**1077**	**1096**
Склад металу, %	**До обробки**	**Завдання**	**Метал після обробки**				
[C]	0,11	0,30-0,40	0,29-0,36	0,31-0,37	0,34-0,40	0,32-0,38	0,32-0,36
[Si]	0,09	0,20-0,37	0,20-0,28	0,20-0,30	0,20-0,30	0,20-0,27	0,20-0,31
[Mn]	0,16	0,50-0,80	0,64-0,72	0,50-0,56	0,50-0,56	0,50-0,56	0,50-0,56
[Cr]	0,30	0,70-1,10	0,73-0,75	0,70-0,72	0,70-0,72	0,70-0,72	0,70-0,72
[Mo]	0,24	0,30-0,40	0,32-0,33	0,30-0,31	0,30-0,31	0,30-0,31	0,30-0,31
[Ni]	2,37	2,40-3,25	2,45-2,48	2,40-2,43	2,40-2,43	2,40-2,43	2,40-2,43
[S]	0,050	≤ 0,025	0,023-0,027	0,020-0,025	0,020-0,025	0,008-0,025	0,019-0,025
[P]	0,010	≤ 0,025	0,011-0,015	0,011-0,014	0,011-0,015	0,011-0,014	0,011-0,018
Маса металу, т	65-70		66,4-71,5	66,3-71,4	66,3-71,4	66,2-71,3	66,4-71,5
Склад шлаку, %	**До обробки**	**Завдання**	**Шлак після обробки**				
(FeO)	25		0,34-0,43	0,62-0,70	0,33-0,45	0,05-0,23	0,59-0,67
(SiO_2)	16		25,7-29,2	34,3-35,8	25,3-29,6	0,76-12,1	34,2-36,1
(MnO)	5		2,07-2,38	3,04-3,19	1,81-2,08	0,18-0,94	2,99-3,04
(CrO)	5		0,08-0,10	0,14-0,15	0,08-0,10	0,01-0,05	0,13-0,15
(Al_2O_3)	3		13,7-21,7	3,18-4,38	2,54-3,12	25,8-36,6	3,20-5,16
(CaO)	40		42,5-47,4	35,8-42,0	56,0-58,4	55,4-56,5	36,2-42,4
(MgO)	5		5,56-5,83	14,2-19,6	8,53-9,59	3,83-4,66	13,7-18,7
(S)	0,1		1,78-4,08	1,76-3,82	1,42-2,75	1,56-4,19	1,77-3,90
(P_2O_5)	0,5		0,006-0,007	0,002-0,004	0,004-0,005	0,001-0,007	0,003-0,004
Маса шлаку, т	0,5-1,0		0,47-0,84	0,56-0,95	0,79-1,18	0,70-1,08	0,56-0,95
Маса газу, т		≤ 0,01	0…0,028	0…0,01	0…0,01	0…0,009	0…0,01
Температура, °С	1620		1615-1624	1610-1620	1598-1610	1618-1626	1608-1618

Примітка. За варіантом І оптимізація не проводилася.

Витрати електроенергії на підігрів металу можуть коригуватися залежно від прогнозованої кінцевої температури. Наприклад, у варіанті ІІІ температура системи знизилася до 1598-1610 °С через додавання вапна і доломіту. Для підтримки температури на рівні вихідної в цьому випадку потрібно ввести щонайменше 4300 МДж тепла електроенергії.

1.3. Оптимізація завалки

У цьому прикладі проводиться розрахунок оптимального набору матеріалів, необхідних для отримання 100 т напівпродукту сталі з використанням продувки киснем і введенням тепла енергоносіїв.

Файл матеріалів `ZAVALKA.MAT`, що використовується в прикладі, має наступний зміст:

```
     @Fe       C      Si    Mn     S       P       O
Брухт А   |   .2    .2/.3 .5/.8 .02/.06 .01/.03 .01/.007 $ 100 #.98/.99
Стружка   | .05/.15 .2/.3 .5/.8 .02/.06 .01/.03 .01/.007 $ 75  #.75/.85

     @Fe      C    Mn    Si    S     P
Брухт чавуну| 3/4 .3/.5 .9/1   0.04 0.08 $ 100 #.9/.95
Чавун пер.  | 4.2 .2/.5 .6/.9  0.04 0.02 $ 130 @1350 *

     @      S     P     Al2O3 CaO   SiO2  CaF2  MgO   Fe2O3
Шпат      | 0.05  0     0     1     21    75    0     0     $ 150
Магнезит  | 0.05  0.03  0.53  2.92  2.86  0     91.27 1.88  $ 100
Вапно     | 0.05  0.05  2.2   89    3     0     4.6   0     $ 60
Вапняк    | 0.05  0.05  2.2   90    2     0     4.6   0     $ 20  #0.59

     @       C   Al2O3 SiO2  MgO   S
Коксик    | 87    3     5     3   1/2  $150  #0.8

     @O
Кисень    | $38
```

При необхідності редагуємо його (див. §2.8.2), наприклад, з метою коригування цін на матеріали або уточнення їхнього складу.

Для моделювання нерівноважності пічного шлаку зменшимо ентальпійну частину логарифму константи рівноваги заліза $K_{[Fe)}$ до величини –0,75, що відображено у файлі констант `ZAVALKA.CON`, який використовується в цьому прикладі.

За допомогою кнопки відкриємо файл проекту `ZAVALKA.FWP`.

Відкриємо в меню **Опції** вкладку **Загальні** та переконаємося, що всі установки мають значення за замовчуванням (див. §2.7.1).

За допомогою функціональної клавіші F5 відкриємо редактор завдання та переконаємось у коректності поставленої зворотної задачі відповідно до наступних вихідних даних та обмежень.

Вихідні дані:

- температура навколишнього середовища 20 °C;

Обмеження:

- кінцева температура розплаву 1550 °C;

- маса шлаку в межах 2…10 т;
- основність шлаку в межах 2…3;
- вміст вуглецю в напівпродукті в межах 0,09…0,12 %;
- відсоток стружки у загальній масі завалки не більше 25 %;
- маса рідкого передільного чавуну не менше 10 т;
- маса шпату не менше 0,2 т;
- маса магнезиту не менше 0,3 т.

Вийдемо з редактора завдання натисканням кнопки **Прийняти**.

У таблиці матеріалів та елементів на головній формі видно результат проплавлення набору рекомендованих матеріалів (95 т брхту А, 1,5 т кисню, 10 т чавуну передільного, 0,2 т шпату, 0,3 т магнезиту, 2 т вапняку, вартість 10957 у.о.), який не цілком відповідає заданим обмеженням. Зокрема, не забезпечується задана основність шлаку.

Відкриємо в меню **Опції** вкладку **Загальні** та відключимо автоматичний пошук початкового наближення та розрахунок температури (ні).

Одним із способів (див. §§2.2.6, 2.2.7), наприклад, за допомогою функціональної клавіші F10, включимо оптимізацію матеріалів. Час розрахунку складає близько 0,5 секунди. Для отримання напівпродукту заданої маси та складу необхідно задати наступний набір матеріалів: 91,703 т брухту А, 3,086 т стружки, 10 т чавуну передільного, 0,2 т шпату, 0,3 т магнезиту, 2,368 т вапняку та 1,443 т кисню (табл. 1.5, варіант II).

Далі зі списку доступних матеріалів послідовно видаляємо вапняк, вапно, стружку та включаємо оптимізацію (табл. 1.5 варіанти III-V). Загальна вартість матеріалів при цьому збільшується.

Для досягнення температури 1550 °С у варіантах I-III достатньо внести в систему 117200 МДж тепла енергоносіїв (нетто). Для варіантів IV-V потрібно 120000 МДж тепла. Кінцеву температуру можна перевірити, проплавляючи набори матеріалів із увімкненою опцією точного розрахунку температури.

Таблиця 1.5 – *Вихідні дані та результати розрахунків різних варіантів завалки*

Матеріали	**Ціна за 1 т, у.о.**	**Маси матеріалів (т) за варіантами завалки**				
		I	**II**	**III**	**IV**	**V**
Брухт А	100	95	91,703	91,606	73,045	95,037
Стружка	75		3,086	3,218	28,917	нет
Чугун пер.	130	10	10	10	10	10
Шпат	150	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Магнезит	100	0,3	0,3	0,3	1,796	1,755
Вапно	60			1,445	нет	нет
Вапняк	20	2	2,368	нет	нет	нет
Кисень	38	1,5	1,443	1,444	1,724	1,713
Вартість завалки, у.о.		**10957**	**10864**	**10904**	**11048**	**11074**
Склад металу, %	**Завдання**	**Напівпродукт**				
[C]	0,09-0,12	0,087-0,11	0,09-0,12	0,09-0,12	0,096-0,12	0,098-0,12
[Si]		0,003-0,006	0,003-0,007	0,003-0,007	0,002-0,004	0,002-0,004
[Mn]		0,14-0,29	0,15-0,31	0,15-0,31	0,08-0,18	0,09-0,18
[S]		0,013-0,030	0,013-0,031	0,013-0,031	0,009-0,022	0,009-0,022
[P]		0,009-0,026	0,009-0,026	0,009-0,029	0,011-0,030	0,011-0,030
Маса металу, т	≥ 100	100,8-101,9	100-101,4	100-101,4	100-103,9	100-101,1
Склад шлаку, %	**Завдання**	**Пічний шлак**				
(FeO)		25,3-38,2	21,7-34,0	21,5-33,7	35,6-48,7	35,6-47,1
(SiO_2)		14,0-20,6	13,9-20,4	14,1-20,5	10,6-16,1	11,0-16,1
(MnO)		10,5-15,7	10,1-14,8	9,96-14,7	8,90-14,8	9,19-14,7
(Al_2O_3)		0,65-0,66	0,76-0,77	0,77-0,78	0,16-0,17	0,17
(CaO)		27,8-28,3	32,2-32,7	32,4-33,0	2,78-2,91	2,89-2,95
(MgO)		7,70-7,85	7,88-8,02	7,84-7,97	28,1-29,3	28,7-29,3
(S)		0,25-0,72	0,24-0,70	0,24-0,69	0,25-0,71	0,25-0,71
(P_2O_5)		0,15-0,23	0,16-0,23	0,16-0,23	0,016-0,025	0,015-0,025
Маса шлаку, т	2-10	4,17-4,25	4,2-4,28	4,26-4,33	5,58-5,83	5,46-5,57
Осн. шлаку	2-3	1,76-2,54	2-2,88	2-2,86	2-2,92	2-2,86
Температура, °С	1550	1550	1550	1550	1550	1550

Примітка. За варіантом I оптимізація не проводилася.

Слід зазначити, що при розрахунку завалки істотну роль грає температура довкілля. Так, зниження цієї температури на 10 градусів тягне за собою збільшення питомих енерговитрат на 6 МДж/т.

1.4. Моделювання електродугової плавки

Файл матеріалів DSP.MAT, що використовується в цьому прикладі, має наступний зміст:

```
     @Fe      C    Si  Mn   S    P   O   Cu   Ni   Cr   Mo   Sn    V     Nb    Al    Ti    N     W    As     B   Co
Болото М   | .1   .009 .15 .045 .008 .033 .2  .10  .10 .014 .008 .0009 0.0008 .0002 .0002 .0055 .002 .008 .0001 .007 $0 @1700 *

     @       FeO  SiO2  MnO  Al2O3  MgO  CaO   S  P2O5
Болото Ш   | 25    20    4     4.9   5    40  .15  .1  $0 @1700 *

     @Fe       C       Si      Mn      S        P     O     Cu       Ni       Cr     Mo   Sn    V     Nb    Al    Ti    N    W   As    B   Co
Брухт_25   | .3/.5  .01/.4  .3/.7 .02/.05 .005/.02 .01 .19/.21 .114/.126     .1  .014 .008 .001 0.0003 .0001 .0003 .006 .002 .008 .0001 .007 $75 #0.98/0.99
Брухт_26   | .3/.5  .01/.4  .3/.7 .02/.05 .005/.02 .01      .1  .114/.126 .19/.21 .014 .008 .001 0.0003 .0001 .0003 .006 .002 .008 .0001 .007 $75 #0.98/0.99
Брухт_28   | .3/.5  .01/.4  .3/.7 .02/.05 .005/.02 .01 .19/.21 .114/.126 .19/.21 .014 .008 .001 0.0003 .0001 .0003 .006 .002 .008 .0001 .007 $75 #0.98/0.99
Брухт_608  | .3/.5  .01/.4  .3/.7 .02/.05 .005/.02 .01      .2  .114/.126     .1  .014 .008 .001 0.0003 .0001 .0003 .006 .002 .008 .0001 .007 $75 #0.98/0.99

     @Fe
Брухт_сер  | $75 #0.98/0.99

     @       C      S      P     Al2O3 CaO  CaCO3 SiO2  MgO   Fe2O3
Вапно      | 0   0/0.075 0.05  2.2   89    0    3     4.6   0     $ 60
Вапняк     | 0   0/0.05  0.05  5     0     85   4.95  4.95  0     $ 20  #0.99/1
Кокс       | 87   1/2    0.01  5     0     0    5     2     0     $ 100 #0.85
Магнезит   | 0   0/0.05  0.01  0.53  2.92  0    2.86  91.27 1.88  $ 100 @1600

     @O
Кисень     | $ 38

     @         C     S   P
Електроди  | 98/99 .01 .01 $200

     @Fe        C      Si     Mn      S     P
FeMn       |   6/7   0.3/1   77.5/81 .03   .70  $ 2375
SiMn       |   1.5   15/17   71/75   .03   .63  $ 2550
```

За потреби редагуємо його (див. §2.8.2) з метою уточнення складу матеріалів. Склад матеріалу Брухт_ср (середнього брухту), який не прописаний явно у файлі матеріалів, розраховується при зчитуванні файлу протоколу електродугової плавки (НЕА).

За допомогою кнопки відкриємо файл проекту `DSP.FWP`. При цьому автоматично завантажиться файл протоколу електродугової плавки `8644.HEA` (БМЗ, плавка № 8644).

Відкриємо в меню **Опції** вкладку **Загальні** та встановимо опцію розрахунку температури «Спрощ.». Усі інші установки повинні мати значення за замовчуванням (див. §2.7.1). Відкриємо вкладку **Електроплавка** та переконаємось, що всі установки мають значення за замовчуванням (див. §2.7.2).

Натисканням клавіші F5 відкриємо редактор завдання ДСП та встановимо температуру навколишнього середовища (інші установки містяться на панелі опцій електродугової плавки). Як і під час розрахунку завалки (див. §1.3), ця величина впливає на енерговитрати. Натиснимо кнопку **Прийняти** і таким чином закриємо редактор завдання.

Включимо підпрограму моделювання електродугової плавки шляхом вибору пункту меню **Графіки → Моделювання електродугової плавки** або

натисканням кнопки на панелі інструментів головної форми, або за допомогою функціональної клавіші F4.

На панелі поточних параметрів плавки (див. §2.5.4) відразу з'явиться результат «проплавлення» болота і магнезиту. На графіку хімічного складу (див. §2.5.1) кружками будуть позначені результати вимірювання хімічного складу металу за основними елементами, а на графіку температури, мас металу та шлаку (див. §2.5.2) – результати вимірювання температури. На графіку завдання матеріалів (див. §2.5.3) видно протокол завдання основних матеріалів та енергоносіїв.

Включимо відтворення електродугової плавки натисканням кнопки на панелі керування моделюванням електроплавкою (див. §2.5.5). В результаті побачимо траєкторії зміни хімічного складу, температури, маси рідкого металу та шлаку, які синхронно відображатимуться на двох графіках. При необхідності можна зупинити хід процесу за допомогою кнопки , або повністю зупинити його натисканням кнопки .

Після закінчення моделювання електродугової плавки на формі видно всі основні результати (рис. 2.5).

Середньозважена похибка розрахунку хімічного складу металу становила 0,006% за останнім виміром і 0,009% у середньому по плавці. Похибка розрахунку температури склала –3 °С за останнім виміром і 5 °С в середньому по плавці. Кінцева розрахункова температура становила 1660 °С.

На плавку витрачено усього 51733 кВтг електроенергії. Питомі витрати становили 451 кВтг на 1 тонну рідкої сталі (за вирахуванням болота). Баланс введеної енергії становив 169986 МДж.

Отримано 124,8 т рідкого металу, з яких 10 т перейдуть у болото наступної плавки. Утворилося 10,4 т шлаку, з яких 5,1 т скачано самопливом. У болоті на наступну плавку залишилося 5,3 т шлаку.

Повне розплавлення брухту відбулося на 3350 секунді від початку плавки.

Розрахунковий хімічний склад кінцевого напівпродукту: C 0,037%, Mn 0,15%, Si 0,001%, S 0,047%, P 0,010%.

Особливості та легенди графіків хімічного складу металу, графіків температури, мас металу та шлаку, графіка завдання матеріалів та енергоносіїв докладно описані в розділі 11 (див. §§2.5.1, 2.5.2, 2.5.3).

1.4.1. Алгоритм розрахунку плавлення брухту

Розрахунок плавлення брухту провадиться за наступним алгоритмом.

1. Розрахунок MeltQ – енергії, необхідної для проплавлення твердого матеріалу до заданої температури ліквідус (1505 °C) або для нагрівання (охолодження) рідкого матеріалу до цієї температури. Розрахунок виконується одноразово для підмножини використовуваних матеріалів (брухтів) по різниці тепломісткості матеріалу в поточному стані та при заданій температурі. Для металу та шлаку розрахунок повторюється на кожному кроці.

2. Розрахунок надлишка (браку) енергії для металу та шлаку:

$$\Delta Q_m = MeltQ_m M_m; \quad \Delta Q_s = MeltQ_s M_s . \tag{1.1}$$

3. Розрахунок кількості брухту, що розплавився (закристалізувався) на поточному кроці. Розрахунок бажано проводити для усередненого (середньозважено за масами елементів) брухту:

$$M_{лом} = \frac{Q_E - Q_L - \Delta Q_m - \Delta Q_s}{MeltQ_{лом}}, \tag{1.2}$$

де Q_E – кількість електроенергії, введеної на поточному кроці; Q_L – теплові втрати на поточному кроці.

До повного розплавлення брухту температура ванни автоматично підтримується («регулюється») на заданому рівні температури ліквідус (1505 °C).

2. НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС «EXCALIBUR»

2.1. Загальні відомості

Програмний комплекс (ПК) «Excalibur» [9-11] є наукомістким продуктом, в якому реалізовані найбільш передові досягнення теорії металургійних процесів останніх трьох десятиліть. Він служить потужним інструментом дослідника та технолога, що дозволяє розробляти нові технології, програвати різні варіанти ведення плавки, позапічної обробки, розкислення, легування, десульфурації та дефосфорації сталі. Зокрема, у програмному комплексі реалізовано пряму та зворотну задачі термодинамічного аналізу сталеплавильних процесів на основі методу хімічних потенціалів Гіббса та диференціальних коефіцієнтів засвоєння (див. гл. 1).

ПК «Excalibur» може використовуватися також як навчальна програма для студентів металургійних спеціальностей.

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

- виконання термодинамічного розрахунку рівноваги у багатокомпонентній гетерогенній системі «метал-шлак-газ» з урахуванням тепла хімічних реакцій;
- проведення інтегрованого термодинамічного розрахунку кінцевої температури системи на основі ентальпійного теплового балансу;
- можливість розрахунку парціальних тисків усіх атомарних та молекулярних складових газової фази;
- обчислення та відображення всіх інтегральних та парціальних термодинамічних функцій складових системи, включаючи всі фази та окремі хімічні елементи, на основі єдиного стандарту;
- точний облік теплоти енергоносіїв та теплових втрат, температури та агрегатного стану матеріалів;

- розрахунок та наочне відображення кінетики взаємодії фаз у сталеплавильному агрегаті на основі принципів нерівноважної термодинаміки та вирішення динамічної системи диференціальних рівнянь;
- повний розрахунок плавки в дуговій сталеплавильній печі (ДСП), у тому числі: динаміки плавлення брухту, мас та хімічного складу металу, шлаку та газу, температури по ходу плавки з урахуванням кінетичного запізнення, скачування шлаку, теплових втрат та геометричних параметрів печі;

В рамках повного та точного вирішення зворотної задачі термодинамічного моделювання ПК «Excalibur» забезпечує:

- оптимізацію мас всіляких легуючих та шихтових матеріалів (у будь-якому агрегатному стані) та витрати енергоносіїв за критеріями їх сумарної мінімальної вартості або максимальної продуктивності сталеплавильного агрегату;
- завдання та гарантоване виконання комплексу односторонніх та двосторонніх оптимізаційних обмежень за хімічним складом та масами кінцевих металу, шлаку та газу, а також масою шихтових матеріалів, витратою енергоносіїв, кінцевою температурою системи;
- застосування матричної алгебри фазових операторів та швидкодіючого алгоритму двоїстого симплекс-метода;
- розрахунок та облік перехресного впливу вмісту одних елементів на засвоєння та вміст інших у кожній із фаз;
- розрахунок консолідованої матриці впливу добавок матеріалів та енергоносіїв на масу та склад фаз, а також температуру системи;
- облік невизначеності вихідних та розрахункових даних шляхом завдання відповідних довірчих інтервалів «нижня межа – верхня межа»;
- практичну реалізацію принципу ситуаційного управління процесами на основі оперативного синтезу альтернативних варіантів легування,

розкислення та позапічної обробки сталі за відсутності рішення зворотної задачі у первісному вигляді.

Програмний комплекс має інтуїтивний дружній інтерфейс, що дозволяє користувачам ефективно працювати з ним, спираючись на мінімальну теоретичну підготовку у галузі металургії чорних металів та економіки. Для роботи з текстовими файлами (матеріалів тощо) потрібні також мінімальні практичні навички з інформатики.

ПК «Excalibur» захищено свідоцтвом України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022р. [11].

2.2. Головна форма

Типовий вид головної форми програмного комплексу представлен о на рис. 2.1.

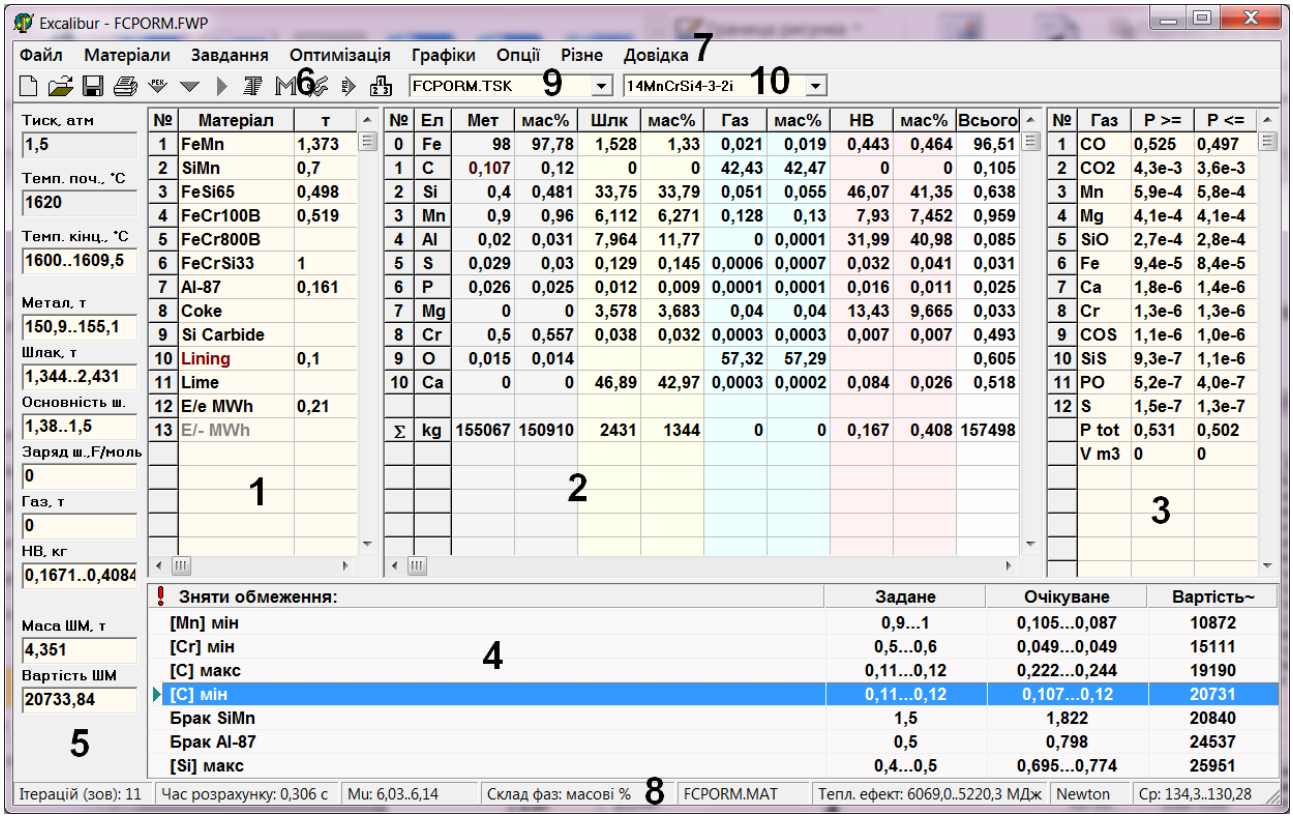
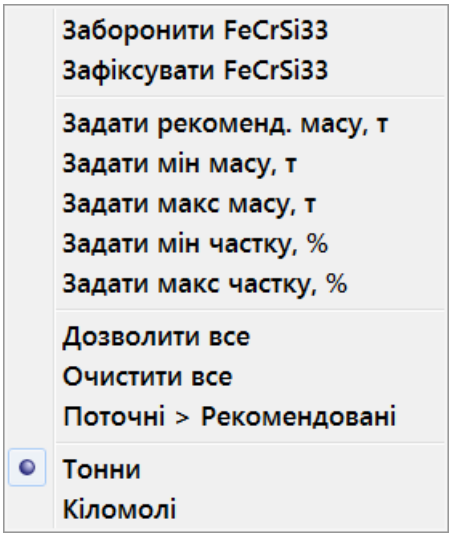


Рисунок 2.1 – *Загальний вид головної форми ПК «Excalibur»*

Елементи головної форми на рис. 2.1 позначені цифрами, які відповідають нумерації нижченаведених пунктів з поясненнями.

2.2.1. Таблиця матеріалів

Таблиця матеріалів 1 (рис. 2.1) містить список доступних матеріалів, які зчитуються з файлу матеріалів (MAT). Матеріали, що заборонені для використання під час оптимізації, виділені сірим кольором. З таблицею матеріалів асоційовано контекстне меню (рис.), що спливає при натисканні правої кнопки миші, що дозволяє забороняти та дозволяти матеріали окремо та в сукупності, очищати маси всіх матеріалів тощо.



У колонці мас спочатку відображаються маси рекомендованих матеріалів (у тоннах), що зчитуються з поточного завдання на плавку.

Після виконання команди **Оптимізувати** в колонці мас відображається оптимальний набір матеріалів (у тоннах), який забезпечує виконання всіх заданих обмежень. У разі вибору будь-якого альтернативного рішення (див. §2.2.4) у цій колонці відображається набір матеріалів, що забезпечує часткове виконання заданих обмежень.

Поля колонки мас є редагованими, що дозволяє встановити довільний набір матеріалів і проплавити його командою **Проплавити** шляхом натискання функціональної клавіші F9 або кнопки на панелі інструментів.

У колонку мас можна повернути (і проплавити) матеріали, що рекомендуються в поточному завданні, командою **Проплавити рекомендовані** шляхом натискання функціональної клавіші F8 або кнопки на панелі інструментів.

2.2.2. Таблиця хімічних елементів

Таблиця хімічних елементів 2 (рис. 2.1) містить список активних елементів, що формується відповідно до хімічного складу доступних матеріалів. Хімічні елементи, які не представлені в жодному з матеріалів, до списку не включаються.

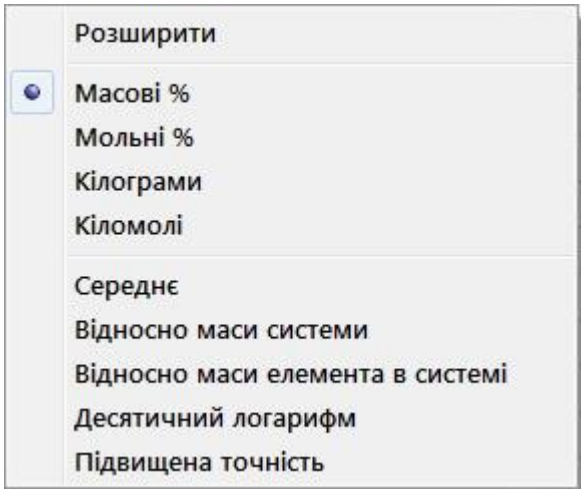
Колонки **Мет** і **мас%** містять нижню і верхню межі хімічного складу металу після проплавлення або оптимізації матеріалів. Для деяких елементів (наприклад, кисню) можливе перевищення нижньої межі вмісту над верхньою межею, що відображає взаємопов'язаність хімічного складу окремих елементів.

Колонки **Шлк** і **мас%** містять нижню і верхню межі хімічного складу шлаку після проплавлення або оптимізації матеріалів. За замовчуванням хімічний склад шлаку перераховується на масовий вміст оксидів елементів з позитивною валентністю. При виборі мольних відсотків, кілограмів або кіломолів (див. нижче), або за включеної опції «Елементний склад шлаку» (див. §2.7.1) хімічний склад шлаку в оксиди не перераховується.

Колонки **Газ** і **мас%** містять нижню і верхню межі хімічного складу газової фази після проплавлення або оптимізації матеріалів.

Хімічні склади всіх фаз за замовчуванням відображаються у вигляді відсотків за масою.

Якщо в результаті проплавлення матеріалів хімічний склад металу або шлаку не повністю відповідає заданим обмеженням, відповідні значення таблиці виділяються відтінками червоного кольору.



З таблицею елементів асоційовано спливаюче контекстне меню (рис.), активоване натисканням правої кнопки миші, що дозволяє представити хімічний склад фаз у вигляді масових відсотків (за замовчуванням), мольних відсотків, кілограмів і кіломолей. Крім того, це меню дозволяє усереднювати нижню та верхню межі вмісту елементів у фазах і представляти відповідні величини у вигляді десяткового логарифму.

Команда контекстного меню **Розширити** дозволяє побачити в таблиці елементів додаткову інформацію про поточні термодинамічні властивості

хімічних елементів у фазах, яка використовується для налаштування моделей та дослідницьких цілей. Ця інформація наведена у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – *Поточні термодинамічні властивості елементів у фазах*

Колонка	**Значение**
ln[K)	Логарифм константи рівноваги метал-шлак
ln[A)	Логарифм консолідованої константи рівноваги метал-шлак
ln[K}	Логарифм константи рівноваги метал-газ
ln[A}	Логарифм консолідованої константи рівноваги метал-газ
[g0]	Коефіцієнт активності в металі для нескінченно розбавленого розчину
[g]	Коефіцієнт активності у металі
(g)	Коефіцієнт активності у шлаку
{g}	Коефіцієнт активності у газовій фазі
ln[a]	Логарифм активності у металі
ln(a)	Логарифм активності у шлаку
ln{a}	Логарифм активності у газовій фазі
[h] st	Парціальна стандартна ентальпія в металі, кДж/моль
[h] m	Парціальна ентальпія змішування в металі, кДж/моль
(h) m	Парціальна ентальпія змішування в шлаку, кДж/моль
{h} m	Парціальна ентальпія змішування в газовій фазі, кДж/моль

2.2.3. Таблиця газів

Таблиця газів 3 (рис. 2.1) містить список активних компонентів газової фази, що формується відповідно до списку активних елементів та файлу газових термодинамічних даних (EXCALIBUR.GAS). З файлу даних зчитуються тільки гази, які містять активні елементи (див. §2.2.2).

У колонках **P >=** і **P <=** зазначені нижня і верхня межі парціальних тисків компонентів газової фази в атмосферах.

На панелі опцій (див. §2.7.1) може бути встановлений поріг тиску відображення газів, що дозволяє не показувати в таблиці гази з нікчемним парціальним тиском.

Сума парціальних тисків газів відображається у нижній частині таблиці. Якщо немає виділення газової фази, то ця сума менша або дорівнює зовнішньому тиску в системі. При виділенні газової фази сума парціальних тисків точно дорівнює зовнішньому тиску.

У нижній частині таблиці відображається також обсяг газу, що виділився, в кубічних метрах, приведений до нормальних умов.

2.2.4. Список альтернативних рішень

При вирішенні зворотної задачі не завжди існує рішення, яке повністю відповідає всім заданим обмеженням по хімічному складу металу та шлаку, мас фаз, основності шлаку, наявності матеріалів і т.д. (див. §**Ошибка! Источник сылки не найден.**). В такому випадку спрацьовує алгоритм пошуку альтернативних рішень шляхом послідовного зняття обмежень. Якщо в результаті зняття якого небудь обмеження знаходиться оптимальне рішення зворотної задачі, воно заноситься до списку альтернативних рішень 4 (рис. 2.1), розташованого в нижній частині головної форми.

У колонці **Зняти обмеження** відображається тип обмеження, що знімається, і вказується відповідна величина. У колонці **Задане** відображаються межі, в яких допускається зміна величини, що входить у дане обмеження. У колонці **Очікуване** відображаються очікувані нижня і верхня межі величини після зняття обмеження. У колонці **Вартість** наводиться вартість набору матеріалів даного альтернативного рішення.

Альтернативні рішення сортуються за їх вартістю у висхідному порядку.

Після пошуку альтернативних рішень автоматично відпрацьовується перше за списком рішення, що має мінімальну вартість набору матеріалів.

Пошук альтернативних рішень може тривати кілька хвилин. Хід пошуку відображається прогрес-індикатором у нижній частині панелі параметрів (див. §2.2.5).

Зі списку альтернативних рішень користувач може вибрати будь-яке на власний розсуд шляхом наведення покажчика миші на відповідний рядок списку і наступним натисканням лівої кнопки. Вибране альтернативне рішення зліва відзначається символом ▶.

Набір матеріалів, що відповідає обраному альтернативному рішенню, відображається в таблиці матеріалів. Цей набір автоматично проплавляється, а склади фаз, що утворюються, відображаються в таблицях елементів і газів.

2.2.5. Панель параметрів

Панель параметрів 5 розташована у лівій частині головної форми (рис. 2.1). Нижче наведено елементи панелі параметрів та їх функціональне значення.

Тиск, атм. Зовнішній тиск у системі в атмосферах. Поле є редагованим і дозволяє встановити тиск на розсуд користувача в діапазоні $3 \cdot 10^{-4}$ до 10^{6} атм. За замовчуванням тиск приймається рівним 1 атм.

Темп. поч., °С. Початкова температура системи. Якщо в поточному завданні на плавку не вказано початкову температуру системи, вона за замовчуванням приймається рівною 1600 °С. У такому разі це поле стає редагованим і дозволяє задати цю величину на розсуд користувача, не відкриваючи редактор завдання.

Темп. кінц., °С. Кінцева температура системи у стані рівноваги. Якщо в опціях (див. §2.7.1) заданий розрахунок температури (точний або спрощений), то в цьому полі відображається кінцева температура системи, яка отримується в результаті розв'язання узагальненої прямої задачі (див. §**Ошибка! Источник сылки не найден.**). В іншому випадку температура, що відображається, буде співпадати з початковою температурою системи.

Метал, т. Нижня і верхня межі маси металу в стані рівноваги, т.

Шлак, т. Нижня і верхня межі маси шлаку в стані рівноваги, т.

Основність ш. Нижня і верхня межі основності шлаку в стані рівноваги. Основність розраховується як частка від поділу $[(CaO)+(MgO)]/(SiO_2)$.

Газ, т. Нижня і верхня межі маси газової фази в стані рівноваги, т.

НВ, кг. Нижня і верхня межі маси неметалевих включень, кг.

Маса ШМ, т. Маса набору завантажених шихтових матеріалів, т.

Вартість ШМ. Вартість набору завантажених шихтових матеріалів в одиницях цін, зазначених у файлі матеріалів (див. §2.8.2).

2.2.6. Панель інструментів

Панель інструментів 6 (рис. 2.1) містить кнопки, за допомогою яких у програмі виконуються основні дії. Як правило, команди, які виконуються при натисканні кнопок панелі інструментів, доступні також у головному меню та за допомогою натискання певних сполучень «гарячих» клавіш. У наведеній нижче таблиці наведено команди, доступні в панелі інструментів.

Таблиця 2.2 – *Кнопки панелі інструментів, відповідні пункти меню та сполучення «гарячих» клавіш*

Кнопка	Пункт меню	Сполучення клавіш	Функціональне призначення
	Файл → Новий проєкт	Ctrl-N	Розпочати новий проєкт.
	Файл → Відкрити проєкт	Ctrl-O	Відкрити файл проєкту (FWP).
	Файл → Зберегти проєкт	Ctrl-S	Зберегти файл проекту (FWP).
	Файл → Друкувати проєкт	Ctrl-P	Надрукувати головну форму проєкту.
	Матеріали → Проплавити рекомендовані	F8	Проплавити рекомендовані матеріали із поточного завдання.
	Матеріали → Проплавити	F9	Проплавити матеріали, задані у таблиці матеріалів.
	Оптимізація → Почати	F10	Оптимізувати та проплавити матеріали відповідно до обмежень, заданих у поточному завданні на плавку.
	Оптимізація → Зупинити		Зупинити процес оптимізації
	Графіки → Кінетика релаксації	Ctrl-K	Включити модуль кінетики руху до рівноважного стану.

	Графіки → Моделювання електродугової плавки	F4	Включити модуль моделювання електродугової плавки.
			Помістити головну форму поверх всіх вікон.

2.2.7. Головне меню

Головне меню 7 (рис. 2.1) містить комплекс команд, які виконуються за допомогою вибору користувачем пунктів головного меню. У таблиці нижче наведено структуру меню та функціональне призначення відповідних команд.

Таблиця 2.3 – *Структура та команди головного меню*

Верхній рівень	**Перший рівень**	**Другий рівень / сполучення клавіш**	**Функціональне призначення**
Файл	Новий проєкт	Ctrl-N	Розпочати новий проєкт.
	Відкрити проєкт	Ctrl-O	Відкрити файл проекту (FWP).
	Відкрити файл	Константи	Відкрити файл констант (CON).
		Матеріали	Відкрити файл матеріалів (MAT).
		Завдання	Відкрити файл завдань на плавку (TSK).
		Шаблон плавки	Відкрити файл шаблону електродугової плавки (HEA).
	Зберегти проєкт	Ctrl-S	Зберегти проєкт у вигляді файлу (FWP).
	Зберегти проєкт як		Зберегти проєкт як файл (FWP) з ім'ям, відмінним від імені поточного проєкту.
	Друкувати проєкт	Ctrl-P	Друкувати головну форму проєкту.

	Вихід		Завершити роботу програми.
Матеріали	Відкрити файл матеріалів		Відкрити файл матеріалів (MAT).
	Проплавити рекомендовані	F8	Проплавити рекомендовані матеріали із поточного завдання.
	Проплавити поточні	F9	Проплавити матеріали, задані у таблиці матеріалів.
	Властивості		Відкрити форму властивостей використовуваних матеріалів (§2.4).
Завдання	Редактор завдання	F5	Відкрити редактор завдання на плавку (§2.3).
	Відкрити файл завдань		Відкрити файл завдань на плавку (TSK).
	Виключити завдання із проєкту		Виключити поточний файл завдань із проєкту.
Оптимізація	Оптимізувати матеріали	F10	Оптимізувати та проплавити матеріали відповідно до обмежень, заданих у поточному завданні на плавку.
	Зупинити		Зупинити процес оптимізації матеріалів.
Графіки	Крива електроней-тральності	F7	Вивести графік (Заряд шлаку) vs (Рівень Фермі електронів) (§**Ошибка! Источник ссылки е найден.**).
	Кінетика релаксації	Ctrl-K	Включити модуль кінетики руху до рівноважного стану (гл. 5).
	Моделювання електродугової плавки	F4	Включити модуль моделювання електродугової плавки (§1.4).

Опції			Відкрити діалогове вікно опцій (§2.7).
Довідка	Інструкція користувача	F1	Відкрити інструкцію користувача.
	Реєстрація...		Реєстрація програми.
	Про програму		Відкрити панель з короткими відомостями про програму.

2.2.8. Статусний рядок

Статусний рядок 8 розташований у нижньому краї головної форми (рис. 2.1). Він має кілька розділів із текстовою інформацією про режими роботи програми. У таблиці нижче наведено список розділів статус-рядка та їх зміст.

Таблиця 2.4 – *Розділи статусного рядка та їх зміст*

Розділ	**Зміст**
Ітерацій	Кількість зовнішніх ітерацій, витрачених на пошук оптимального набору матеріалів, або внутрішніх ітерацій витрачених на розрахунок прямої задачі.
Час розрахунку	Час розрахунку (с) проплавлення або оптимізації матеріалів.
Mu/RT	Нижня та верхня межі рівноважного значення рівня Фермі електронів у шлаку в одиницях *RT*.
Склад фаз	Одиниці вимірювання складів фаз: масові %, мольні %, кілограми або кіломолі.
*.MAT	Поточний файл матеріалів.
Тепл. эфект	Тепловий ефект хімічних реакцій у МДж – нижній та верхній межі. При спрощеному розрахунку та за відсутності розрахунку температури тепловий ефект обчислюється при початковій температурі системи (§Ошибка! Источник сылки не найден.).
Ньютон / Ланцюг	Метод вирішення системи рівнянь прямої задачі – Ньютона або ланцюжковий (прості ітерації) (§**Ошибка! Источник сылки не найден.**).

2.2.9. Випадаючий список вибору файлу завдань

Випадаючий список 9 (рис. 2.1) служить для швидкого вибору файлу завдань (TSK) на плавку у рамках поточного проєкту. У результаті вибору відкривається завдання, запам'ятоване в результаті останнього збереження проєкту під час роботи з даним файлом завдань. Рекомендовані матеріали відкритого завдання автоматично проплавляються.

Вибір файлу завдань у такий спосіб еквівалентний відкриттю файлу завдань з головного меню одним із двох способів, зазначених у табл. 2.3.

2.2.10. Випадаючий список вибору завдання на плавку

Випадаючий список 10 (рис. 2.1) служить для швидкого вибору завдання на плавку в рамках поточного файлу завдань і поточного проєкту. За допомогою цього елемента головної форми користувач може перейти до іншого завдання на плавку зі списку завдань поточного файлу TSK, не відкриваючи редактор завдань. Рекомендовані матеріали відкритого таким чином завдання автоматично проплавляються.

2.3. Редактор завдання на плавку

Вид форми редактора завдання на плавку наведено на рис. 2.2.

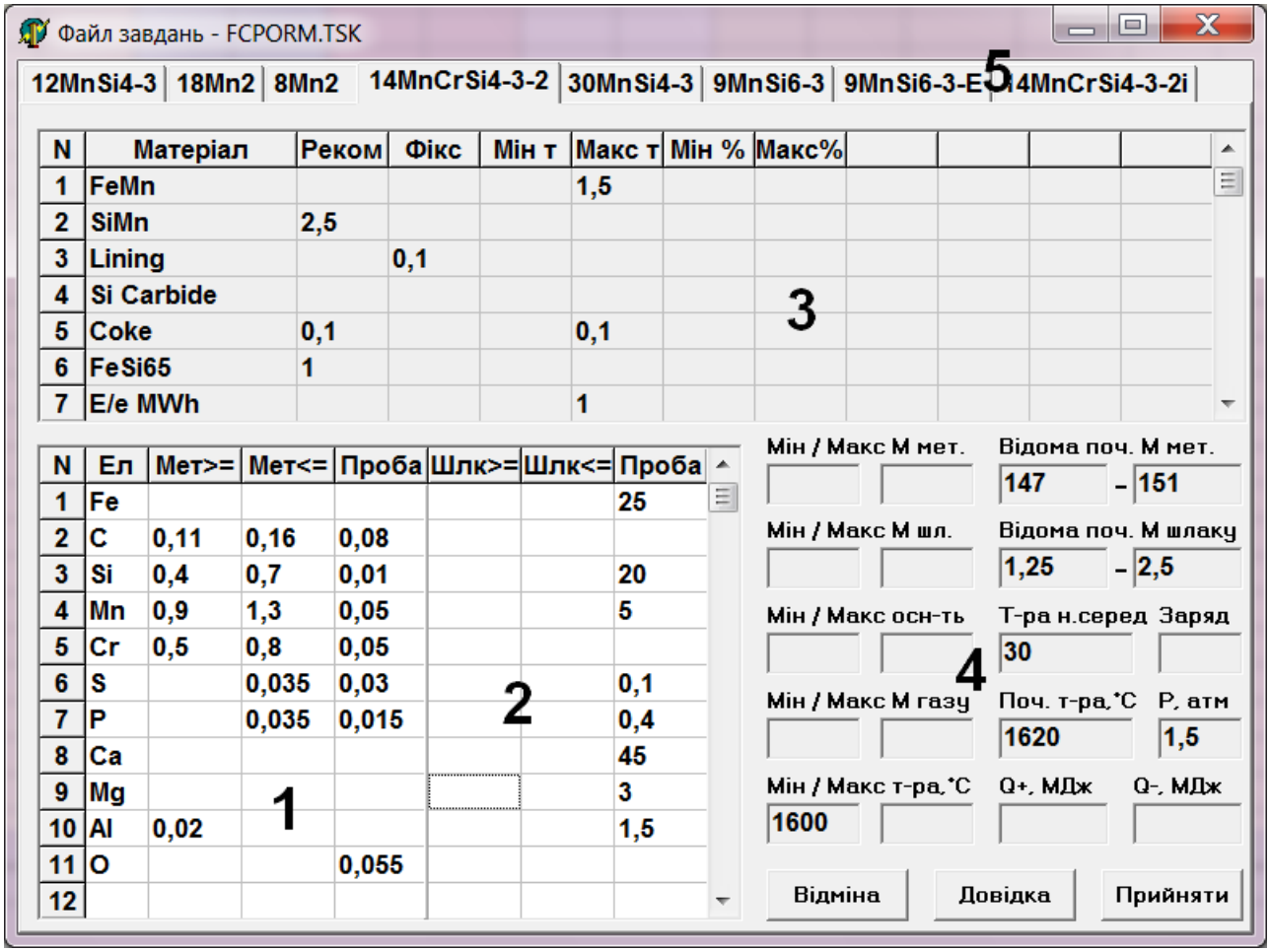


Рисунок 2.2 – *Форма редактора завдання на плавку*

Елементи форми редактора завдання на рис. 2.2 позначені цифрами, які відповідають нумерації нижченаведених пунктів з поясненнями.

Редактор завдання на плавку викликається вибором меню **Завдання → Редактор завдання** або натисканням функціональної клавіші F5. Поля форми редактора завдання автоматично заповнюються даними із поточного завдання на плавку.

Всі поля форми редактора завдання редагуються і можуть використовуватися для завдання всіляких обмежень до зворотної задачі та вихідних даних до прямої задачі. Активний елемент форми підсвічується білим кольором, тоді як решта має сірий відтінок.

Внесені зміни або приймаються натисканням кнопки **Прийняти** з наступним проплавленням рекомендованих матеріалів, або скасовуються натисканням кнопки **Скасувати.**

Форма редактора завдання має спливаюче контекстне меню (рис. 2.3), що активується натисканням правої кнопки миші. З його допомогою виконуються різноманітні дії над завданнями.

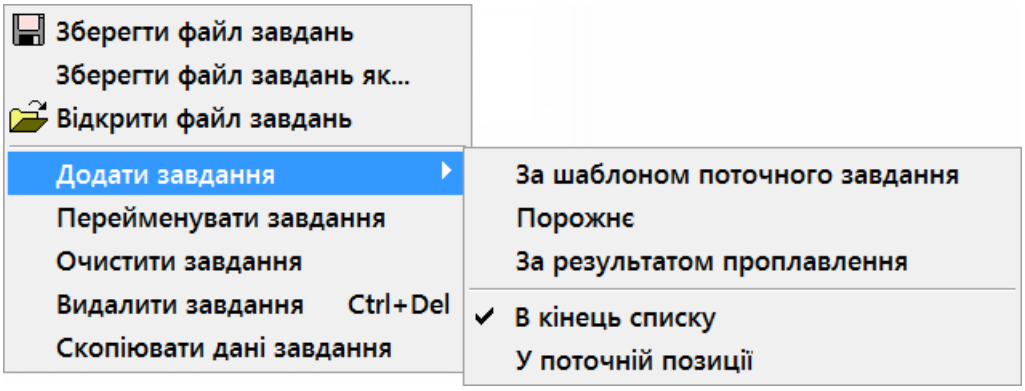


Рисунок 2.3 – *Контекстне спливаюче меню форми редактора завдання*

У табл. 2.5 наведено структуру контекстного меню та функціональне призначення відповідних команд.

Таблиця 2.5 – *Структура та команди контекстного меню редактора завдання*

Перший рівень	**Другий рівень / сполучення клавіш**	**Функціональне призначення**
Зберегти завдання		Зберегти всі завдання на плавку у поточному файлі завдань (TSK).
Зберегти завдання як		Зберегти всі завдання на плавку у файлі завдань (TSK) з ім'ям, відмінним від імені поточного файлу завдань.
Відкрити завдання		Відкрити файл завдань на плавку (TSK).
Додати завдання	За шаблоном поточного завдання	Додати нове завдання на плавку, копіюючи всі дані поточного завдання.
	Порожнє	Додати нове порожнє завдання на плавку.

	За результатом проплавлення	Додати нове завдання на плавку з параметрами вихідних металу та шлаку, отриманими внаслідок проплавлення чи оптимізації поточного завдання.
	В кінець списку	Завдання, що додається, поміщати в кінець списку завдань.
	У поточній позиції	Завдання, що додається, поміщати в поточну позицію списку завдань.
Перейменувати завдання		Перейменувати поточне завдання на плавку.
Очистити завдання		Очистити поточне завдання на плавку.
Видалити завдання	Ctrl-Del	Видалити поточне завдання на плавку зі списку завдань.
Копіювати дані завдання		Скопіювати дані з поточного завдання до всіх наступних завдань: вихідну масу і пробу шлаку, обмеження по масі газу, список всіх матеріалів, список контрольованих елементів.

2.3.1. Таблиця обмежень щодо складу металу

У колонках **Мет >=** та **Мет <=** таблиці 1 (рис. 2.2) задаються нижнє та верхнє обмеження щодо вмісту елементів у металі в масових відсотках. Якщо обмеження відсутнє, відповідний осередок має бути порожнім. Як правило, немає необхідності задавати обмеження щодо вмісту заліза.

У колонці **Проба** задається хімічний аналіз проби вихідного металу в масових відсотках. Якщо в пробі металу немає значення окисленості [O] і в опціях встановлено прапорець «Автоматично оцінювати [O] на випуску» (§2.7.1), то в наступних розрахунках це значення розраховується автоматично за рівновагою в підсистемі «метал-газ». Відсутність даних про вміст інших елементів, крім заліза, інтерпретується як вміст даного елемента в металі лише на рівні слідів. Вміст заліза у пробі металу ігнорується.

2.3.2. Таблиця обмежень щодо складу шлаку

У колонках **Шлк >=** і **Шлк <=** таблиці 2 (рис. 2.2) задаються нижнє і верхнє обмеження вмісту елементів у шлаку в масових відсотках. Якщо обмеження відсутнє, відповідний осередок має бути порожнім. Як правило, немає необхідності задавати обмеження щодо вмісту кисню.

У колонці **Проба** задається хімічний аналіз проби вихідного шлаку в масових відсотках. Відсутність даних про вміст елемента в пробі шлаку, крім кисню, інтерпретується як вміст елемента в шлаку на рівні слідів. Вміст кисню у пробі шлаку ігнорується.

За замовчуванням хімічний склад шлаку в таблиці визначається у вигляді масових відсотків оксидів для елементів з позитивною валентністю і масових відсотків інших елементів. При включеній опції «Елементний склад шлаку» (§2.7.1) хімічний склад шлаку визначається масовими відсотками для усіх елементів.

2.3.3. Таблиця обмежень за матеріалами

Таблиця 3 (рис. 2.2) у колонці **Матеріал** містить перелік контрольованих матеріалів, тобто матеріалів, на які накладено будь-які обмеження. Усі маси задаються у тоннах.

У колонці **Реком** задаються рекомендовані маси матеріалів, які автоматично проплавляються при відкритті завдання на плавку будь-яким способом. Ці маси не впливають на результат оптимізації матеріалів, але водночас використовуються як перше наближення, якщо вимкнено опцію «Автоматичний пошук поч. наближення у зворотної задачі». Користувач може використовувати це поле, наприклад, для завдання фактичної віддачі матеріалів у цій плавці.

У колонці **Фікс** задаються обов'язкові матеріали, тобто матеріали із фіксованою масою. При оптимізації маси цих матеріалів залишаються незмінними. Фіксована маса матеріалів, заборонених для використання при оптимізації, дорівнює нулю.

У колонках **Мін т** і **Макс т** задаються відповідно мінімальна та максимальна маса матеріалів. Наприклад, залишок даного матеріалу на складі або в бункері може бути вказаний у полі **Макс т**.

У колонках **Мін %** і **Макс %** задаються відповідно мінімально та максимально допустимий відсоток даного матеріалу в загальній масі матеріалів, що завантажуються. Наприклад, при розрахунку завалки можна задати відсоток вмісту легковагової стружки у певному інтервалі.

2.3.4. Панель інших обмежень та вихідних даних

Панель 4 (рис. 2.2) містить кілька редагованих полів, що використовуються у прямій та зворотній задачах. Значення цих полів вказані у табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – *Редаговані поля завдання на плавку*

Поле	Значення
Від. поч. М мет.	Відома початкова маса металу – нижня і верхня межі, тонн. Задається обов'язково при легуванні.
Від. поч. М шл.	Відома початкова маса шлаку – нижня і верхня межі, тонн. Задається обов'язково при легуванні.
Мін / макс М мет.	Мінімально та максимально допустима маса металу, тонн. Задається обов'язково при розрахунку завалки.
Мін / макс М шл.	Мінімально та максимально допустима маса шлаку, тонн.
Мін / макс осн-ть	Мінімально та максимально допустима основність шлаку.
Мін / макс М газу	Мінімально та максимально допустима маса газу, тонн. Задається при розкисленні киплячої та напівспокійної сталі.
Мін / макс т-ра	Мінімально та максимально допустима температура, °С.
Т-ра довкілля	Температура довкілля, °С. За замовчуванням приймається 20 °С. Має істотне значення для кінцевої температури системи, якщо маси матеріалів, що завантажуються, великі, наприклад, при розрахунку

	завалки.
Відома поч. т-ра	Відома початкова температура металу та шлаку, °С. Якщо температура не вказана, вона за замовчуванням дорівнює 1600 °С. Ця величина копіюється у полі **Темп. поч.**, на головній формі програми.
Qe, МДж	Прихід енергії до системи з енергоносіями, МДж.
Qвтр, МДж	Теплові втрати, МДж.

2.3.5. Елемент управління вкладками

У верхній частині форми редактора завдання на плавку знаходиться елемент керування вкладками 5 (рис. 2.2), за допомогою якого користувач може швидко перейти до іншого завдання на плавку. Кожна вкладка відповідає своїм завданням. Перехід до іншого завдання синхронізований зі списком вибору завдання на плавку, розташованим на головній формі.

Усі зміни, внесені користувачем у будь-якому завданні, зберігаються, якщо не було натиснуто кнопку **Скасувати**. Таким чином можна редагувати ряд завдань, не закриваючи форму редактора завдання.

2.4. Ефективність матеріалів

На формі ефективності матеріалів (рис. 2.4, *а-д*) відображаються основні теплофізичні властивості матеріалів, а також зміна маси і хімічного складу фаз (у кілограмах або масових відсотках) при додаванні в систему одиниці маси матеріалу. Ця форма доступна за допомогою меню **Матеріали → Властивості.** Перемикання між металом, шлаком та газом здійснюється за допомогою контекстного меню.

Властивості матеріалів

N	Матеріал	t,°C	Фаза	Рідкий	DT	H std	H mix	H	Q1600	C1600	Ціна
1	FeMn	30	м		-18,43	83,27	-360,7	-277,4	2216	0,908	4403
2	SiMn	30	м		-0,081	86,25	-624,1	-537,8	1988	0,895	5109
3	FeSi65	30	м		42,51	101,2	-1141	-1040	3399	1,039	4500
4	FeCr100B	30	м		-13,15	77,66	-358,8	-281,1	1844	0,93	6270
5	FeCr800B	30	м		-22,79	78,37	-542,7	-464,3	2328	1,058	5245
6	FeCrSi33	30	м		15,77	89,29	-647	-557,7	2455	0,972	4313
7	Al-87	30	м		74,49	126,5	-1251	-1124	2349	1,316	7448
8	Coke	30	м		-87,09	59,72	-152	-92,31	7825	1,413	300
9	Si Carbide	30	м		12,88	106,4	-908,9	-802,6	5730	1,399	2700
10	Lining	500	ш		-21,65	774,4	-15918	-15144	2674	1,156	0
11	Lime	30	ш		-3,943	232,4	-15941	-15708	1800	0,953	360
12	E/e MWh		е		28,13	3600	0	3600	0	0	500
13	E/- MWh		е	+	-28,13	-3600	0	-3600	0	0	50
14	Метал	1610	м	+	0	1463	-15,92	1447	1852	0,837	0
15	Шлак	1610	ш	+	0	2266	-15278	-13012	2321	1,062	0
16	Газ	1610	г		0	6443	-6071	372,5	-137944	3,588	0

Властивості | Метал | Шлак | Газ | Склад

T-pa,°C | Фаза | Ознака рідкого стану | Темп. к-т, К/т | H (стандартна, змішування, повна) | Тепловміст, кДж/кг | Теплоємність...

а)

Дія матеріалів на поточний метал

N	Матеріал	Маса	[Fe]	[C]	[Si]	[Mn]	[Al]	[S]	[P]	[Mg]	[Cr]	[O]	[Ca]
1	FeMn	813,6	120,1	46,57	3,182	644,8	-0,449	0,208	6,295	-0,008	0	-7,218	0
2	SiMn	824,3	193,2	44,25	93,61	493,5	0,795	-0,208	5,766	0,004	0	-6,575	0
3	FeSi65	885,6	341,1	99,72	410,6	42,97	5,535	-1,55	1,586	0,043	0	-14,41	0,0001
4	FeCr100B	930,6	293,7	16,49	-9,441	-3,213	-0,522	0,291	0,215	-0,009	635,5	-2,301	0
5	FeCr800B	916,5	235	48,3	2,217	2,728	-0,297	0,277	0,303	-0,009	635,5	-7,441	0
6	FeCrSi33	908,3	226,5	58,68	205,9	20,17	2,77	-0,807	0,458	0,018	403,1	-8,377	0
7	Al-87	516,3	24,76	132,9	216,5	43,62	119,1	-2,66	0,783	0,074	0	-18,74	0,0001
8	Coke	500,1	52,13	305,2	121,7	59,81	2,615	6,09	0,89	0,004	0	-48,37	-0,0001
9	Si Carbide	835,9	43,84	241	510,6	70,66	7,675	-2,093	1,117	0,054	0	-36,98	0,0001
10	Lining	-35,01	-9,216	-4,5	20,25	-40,03	-0,577	-0,775	-0,326	0,028	0	0,135	-0,0001
11	Lime	-86,28	-22,59	36,94	-53,37	-40	-1,217	-0,599	0,32	0,003	0	-5,77	0
12	E/e MWh	36,85	2,299	-22,64	39,44	11,59	2,077	-0,158	0,075	0,022	0	4,134	0
13	E/- MWh	-36,85	-2,299	22,64	-39,44	-11,59	-2,077	0,158	-0,075	-0,022	0	-4,134	0
14	Метал	1000	991,7	1,528	1,212	4,657	0,037	0,404	0,205	0,0003	0	0,245	0
15	Шлак	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	Газ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Властивості | Метал | Шлак | Газ | Склад

Зміна маси фази (кг) та її складу (кг) при додаванні 1т матеріалу

б)

Дія матеріалів на поточний шлак

N	Матеріал	Маса	(FeO)	(C)	(SiO2)	(MnO)	(Al2O3)	(S)	(P2O5)	(MgO)	(Cr2O3)	(O)	(CaO)
1	FeMn	89,3	-5,595	0	5,711	88,28	0,848	0,062	0,012	0,02	0	22,03	0,0001
2	SiMn	179,5	-6,167	0	127	60,08	-1,502	0,478	-0,221	0,015	0	78,72	0,0001
3	FeSi65	361,6	-22,65	0	442,6	-47,39	-10,46	1,836	-1,457	-0,037	0	213,1	0
4	FeCr100B	51,66	0,472	0	40,53	5,4	3,679	-0,053	0,052	0,03	1,523	25,19	0,0001
5	FeCr800B	11,28	-6,632	0	15,58	-2,297	3,254	-0,039	-0,149	0,018	1,523	8,194	0,0001
6	FeCrSi33	205,6	-11,26	0	240,4	-21,68	-2,54	0,902	-0,723	-0,006	0,954	118,8	0,0001
7	Al-87	621,6	-21,79	0	-403,2	-56,17	1090	2,662	-1,794	13,18	0	283,6	-0,0001
8	Coke	-412,7	-67,97	0	-260,4	-77,48	-4,941	0,283	-1,943	-0,134	0	-175,6	-0,0005
9	Si Carbide	174,2	-57,1	0	338,7	-91,23	-14,5	2,093	-2,558	-0,118	0	137,2	-0,0003
10	Lining	1023	37,32	0	606,7	71,7	56,09	0,775	0,747	99,94	0	456,8	150
11	Lime	1187	29,44	0	144,2	51,71	24,3	1,099	0,413	46,02	0	378,6	890
12	E/e MWh	-106,5	-3,014	0	-84,4	-15,02	-3,925	0,157	-0,173	-0,069	0	-51,09	-0,0003
13	E/- MWh	106,5	3,014	0	84,4	15,02	3,925	-0,157	0,173	0,069	0	51,09	0,0003
14	Метал	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Шлак	1000	31,21	0	332,2	58,14	35,9	0,936	0,515	39,49	0	372,9	502,1
16	Газ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Властивості | Метал | Шлак | Газ | Склад

Зміна маси фази (кг) та її складу (кг) при додаванні 1т матеріалу

в)

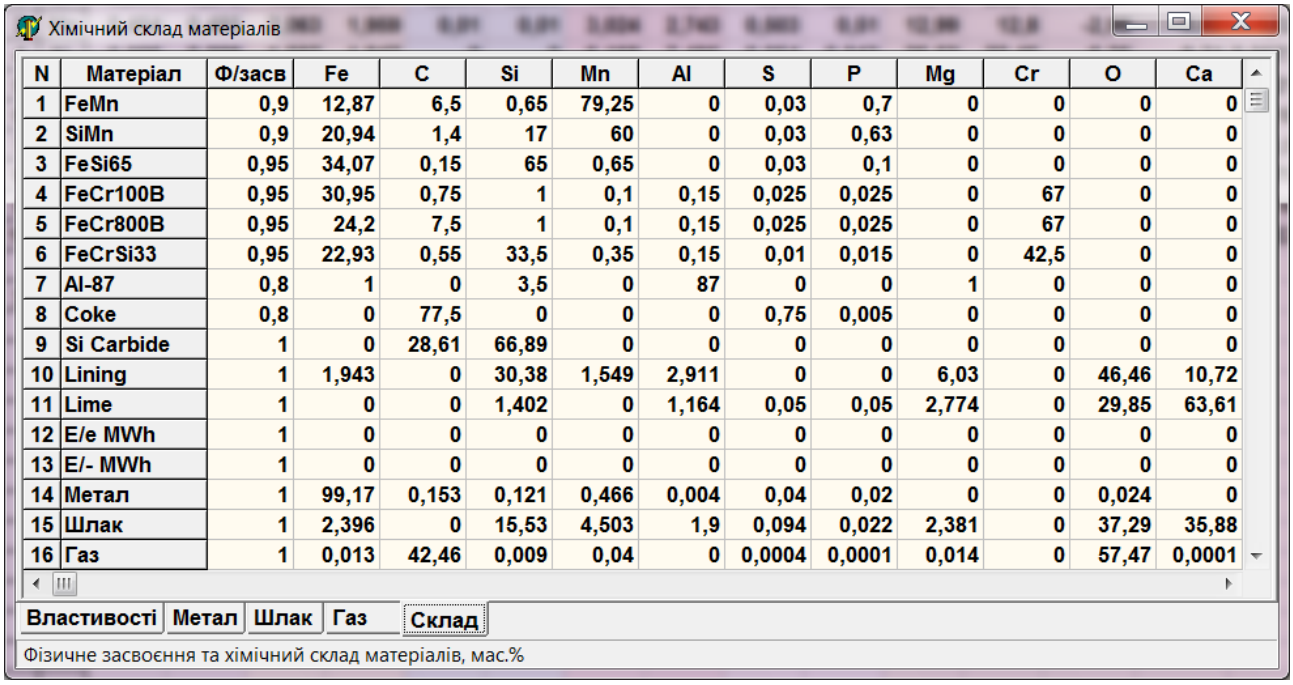
Дія матеріалів на поточний газ

N	Матеріал	Маса	{Fe}	{C}	{Si}	{Mn}	{Al}	{S}	{P}	{Mg}	{Cr}	{O}	{Ca}
1	FeMn	-2,856	-0,004	11,93	-0,001	0,042	0	0	0	-0,004	0	-14,82	-0,0001
2	SiMn	-103,8	-0,013	-31,65	-0,003	-0,002	0	-0,0004	0	-0,013	0	-72,14	-0,0001
3	FeSi65	-297,1	-0,029	-98,29	0,005	-0,095	0	-0,001	-0,0002	-0,021	0	-198,7	-0,0001
4	FeCr100B	-32,3	-0,007	-9,368	-0,005	-0,019	0	-0,0002	0	-0,009	0,0002	-22,89	-0,0001
5	FeCr800B	22,19	-0,002	22,95	0,0007	0,0005	0	0	0	-0,002	0,0002	-0,752	0
6	FeCrSi33	-163,9	-0,018	-53,46	0,0005	-0,056	0	-0,0006	-0,0001	-0,015	0,0001	-110,4	-0,0001
7	Al-87	-397,9	-0,034	-132,9	-0,015	-0,121	0	-0,001	-0,0002	-0,022	0	-264,8	-0,0001
8	Coke	540,3	0,055	316	0,055	0,195	0	0,002	0,0003	0,077	0	223,9	0,0004
9	Si Carbide	-55,08	-0,002	45,05	0,033	-0,003	0	-0,0001	0	0,017	0	-100,2	0,0001
10	Lining	12,16	-0,003	4,5	0,001	-0,007	0	0	0	0,011	0	7,654	-0,0001
11	Lime	-111,4	-0,015	-36,94	-0,014	-0,049	0	-0,0004	-0,0001	-0,015	0	-74,33	-0,0001
12	E/e MWh	69,67	0,015	22,64	0,011	0,04	0	0,0003	0,0001	0,02	0	46,95	0,0002
13	E/- MWh	-69,67	-0,015	-22,64	-0,011	-0,04	0	-0,0003	-0,0001	-0,02	0	-46,95	-0,0002
14	Метал	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Шлак	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	Газ	1000	0,131	424,6	0,093	0,403	0	0,004	0,0006	0,144	0	574,7	0,001

Властивості | Метал | Шлак | Газ | Склад

Зміна маси фази (кг) та її складу (кг) при додаванні 1т матеріалу

г)



N	Матеріал	Ф/засв	Fe	C	Si	Mn	Al	S	P	Mg	Cr	O	Ca
1	FeMn	0,9	12,87	6,5	0,65	79,25	0	0,03	0,7	0	0	0	0
2	SiMn	0,9	20,94	1,4	17	60	0	0,03	0,63	0	0	0	0
3	FeSi65	0,95	34,07	0,15	65	0,65	0	0,03	0,1	0	0	0	0
4	FeCr100B	0,95	30,95	0,75	1	0,1	0,15	0,025	0,025	0	67	0	0
5	FeCr800B	0,95	24,2	7,5	1	0,1	0,15	0,025	0,025	0	67	0	0
6	FeCrSi33	0,95	22,93	0,55	33,5	0,35	0,15	0,01	0,015	0	42,5	0	0
7	Al-87	0,8	1	0	3,5	0	87	0	0	1	0	0	0
8	Coke	0,8	0	77,5	0	0	0	0,75	0,005	0	0	0	0
9	Si Carbide	1	0	28,61	66,89	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Lining	1	1,943	0	30,38	1,549	2,911	0	0	6,03	0	46,46	10,72
11	Lime	1	0	0	1,402	0	1,164	0,05	0,05	2,774	0	29,85	63,61
12	E/e MWh	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	E/- MWh	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Метал	1	99,17	0,153	0,121	0,466	0,004	0,04	0,02	0	0	0,024	0
15	Шлак	1	2,396	0	15,53	4,503	1,9	0,094	0,022	2,381	0	37,29	35,88
16	Газ	1	0,013	42,46	0,009	0,04	0	0,0004	0,0001	0,014	0	57,47	0,0001

д)

Рисунок 2.4 – *Основні теплофізичні властивості матеріалів (а); дія матеріалів на масу та склад: металу (б), шлаку (в) та газової фази (г); хімічний склад матеріалів (д)*

Величини, які наведені в таблицях, розраховані за допомогою фазових операторів і фазових концентраційних операторів у поточному рівноважному стані системи (див. §**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). Вони озволяють класифікувати та ранжувати матеріали щодо їх дії на маси та хімічний склад фаз. Будь-яка зміна умов розкислення, легування тощо призводить до зміни ***всіх*** величин ефективності матеріалів. Наприклад, видалення сірки відбувається інтенсивніше при глибшому розкисленні металу.

2.5. Форма процесу електродугової плавки

Форма моделювання електродугової плавки відображається шляхом вибору пункту меню **Графіки → Моделювання електродугової плавки** або натисканням кнопки на панелі керування головної форми, або за допомогою функціональної клавіші F4. Типовий вид форми моделювання електродугової плавки наведено на рис. 2.5.

Рисунок 2.5 – *Типовий вид форми моделювання електродугової плавки*

Для моделювання електродугової плавки використовуються спеціальним чином скомпіловані текстові файли протоколів (шаблонів) плавки з розширенням HEA (§2.8.5).

Елементи форми моделювання електродугової плавки на рис. 2.5 позначені цифрами, які відповідають нумерації нижченаведених пунктів з поясненнями.

Виділення мишею прямокутної ділянки дає змогу збільшити відповідний фрагмент графіків.

2.5.1. Графік хімічного складу металу

На графіку 1 (рис. 2.5) показано зміну розрахункових вмістів вуглецю, марганцю, кремнію, сірки та фосфору з часом. Гуртками показані зроблені виміри хімічного складу.

Ординату кремнію та фосфору (мас. %) слід розділити на 10.

Під легендою вміщено поля для відображення середньозважених (за масами елементів у металі) відхилень розрахункових хімічних складів від фактичних на момент взяття проби. У полі **Похиб. %** показано абсолютне відхилення від останнього виміру. У полі **Серед. похиб. %** показано середнє абсолютне відхилення по поточній плавці.

2.5.2. Графік температури, мас металу та шлаку

На графіку 2 (рис. 2.5) показано зміну розрахункової температури металу, маси рідкого металу і шлаку, маси твердого (нерозплавленого) брухту з часом. Гуртками показані зроблені вимірювання температури.

Ординату рідкого металу і твердого брухту (т) слід розділити на 10. Ординату шлаку (т), що утворився, слід розділити на 100. Ординату температури (°С) слід збільшити на 1000.

Під легендою вміщено поля для відображення відхилень розрахункової температури системи від фактичної на момент виміру. У полі **Похиб. Т** показано відхилення від останнього вимірювання температури. У полі **Серед. похиб. Т** показано середньоквадратичне відхилення розрахункової температури від фактичних вимірів поточної плавки.

2.5.3. Графік завдання матеріалів та енергоносіїв

На графіку 3 (рис. 2.5) показаний протокол віддачі електроенергії, витрати газу, витрати кисню, віддачі вапна та брухту, а також теплових втрат по ходу плавки.

Ординату теплових втрат (МДж) та брухту (т) слід розділити на 10. Ординату витрати газу та кисню ($м^3$) слід розділити на 100.

Під легендою вміщено поля: **кВтг** – для відображення сумарної витрати електроенергії від початку плавки; **кВтг/т** – для відображення питомої витрати електроенергії на тонну виплавленого металу (за вирахуванням болота).

2.5.4. Панель поточних параметрів плавки

Панель 4 (рис. 2.5) поточних параметрів плавки розташована над графіком хімічного складу. Вона містить таблицю поточного розрахункового

хімічного складу металу і шлаку за основними елементами, в якій зазначено також парціальний тиск монооксиду вуглецю *CO* у газовій фазі.

Зліва є кілька інформаційних полів наступного змісту:

Метал, т. Поточна маса рідкого металу в печі, т.

Шлак, т. Поточна маса рідкого шлаку в печі + маса скачуваного шлаку, т.

Газ, т. Поточна маса газу, що утворився, т. Якщо в розрахунку прийняті порційні витрати (§2.7.2), то маса газу, що утворився, на поточному кроці незначна.

Темп., °С. Поточна температура системи, °С.

Тв. брухт, т. маса твердого (що нерозплавився) брухту, т.

Е, МДж. Баланс енергії, що надійшла в піч (нетто), МДж.

2.5.5. Панель управління моделюванням електродугової плавки

Панель управління 4, розташована у верхній частині форми (рис. 2.5), містить кнопки, за допомогою яких у цій підпрограмі виконуються основні дії. У наведеній нижче таблиці наведено функціональне призначення цих кнопок.

Таблиця 2.7 – *Кнопки панелі управління моделюванням електродугової плавки*

Кнопка	Функціональне призначення
	Відкрити файл протоколу електродугової плавки (HEA).
	Розпочати процес моделювання електродугової плавки.
	Призупинити процес моделювання електродугової плавки.
	Почати послідовність усіх доступних у поточній директорії плавок. Після завершення цієї послідовності у поточній директорії створюється текстовий файл (RES) із записом основних параметрів та результатів моделювання.
	Зупинити процес моделювання електродугової плавки.

Крім кнопок, на панелі управління є випадаючій список плавок, що дозволяє швидко переходити до будь-якої іншої плавки зі списку.

У нижній частині форми розташований статусний рядок, що містить основні параметри розрахункового алгоритму.

2.6. Крива електронейтральності

Крива електронейтральності (див. §**Ошибка! Источник ссылки не айден.**) доступна через пункт меню **Графіки → Крива електронейтральності**. Типовий вид фрагмента кривої показано на рис. 2.6.

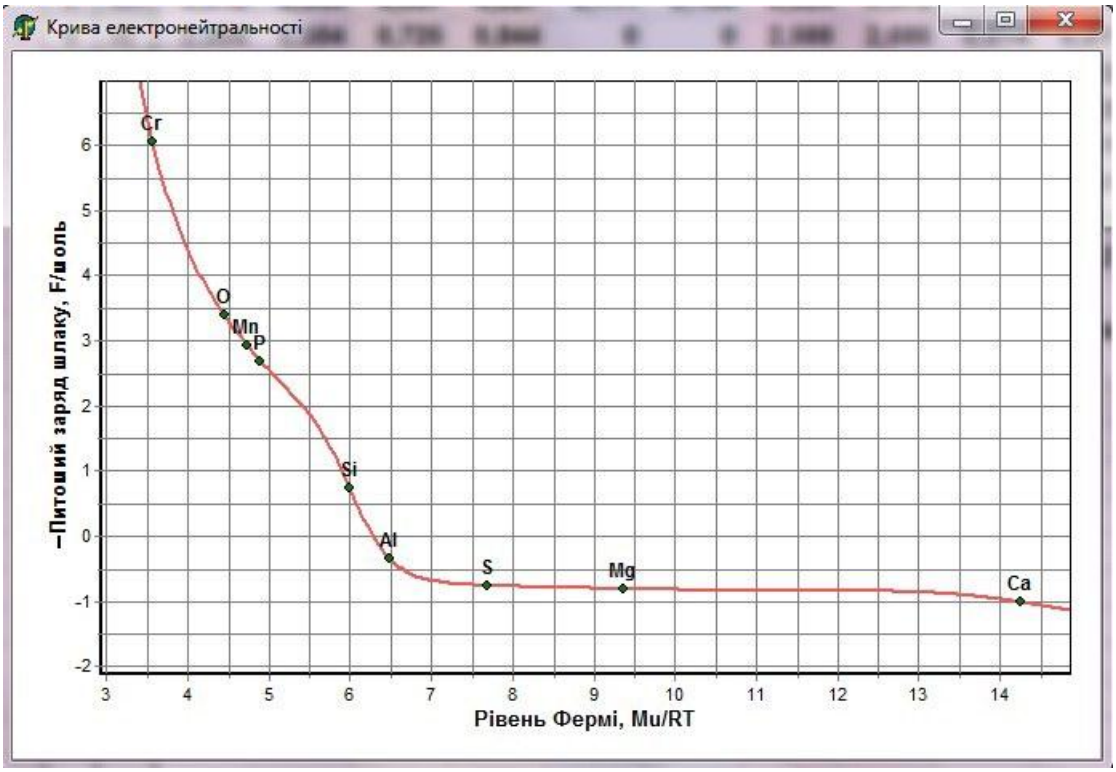
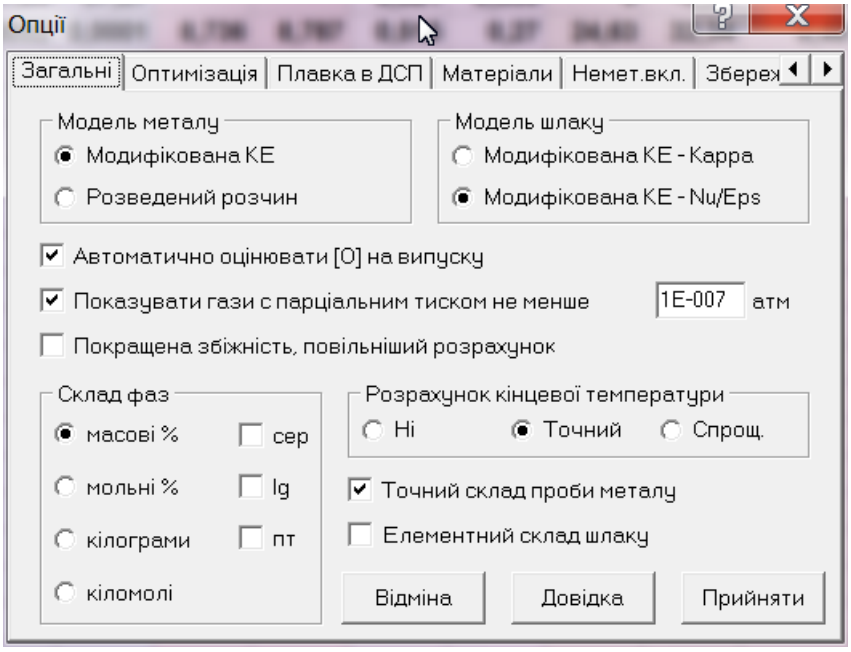


Рисунок 2.6 – *Типовий вид кривої електронейтральності*

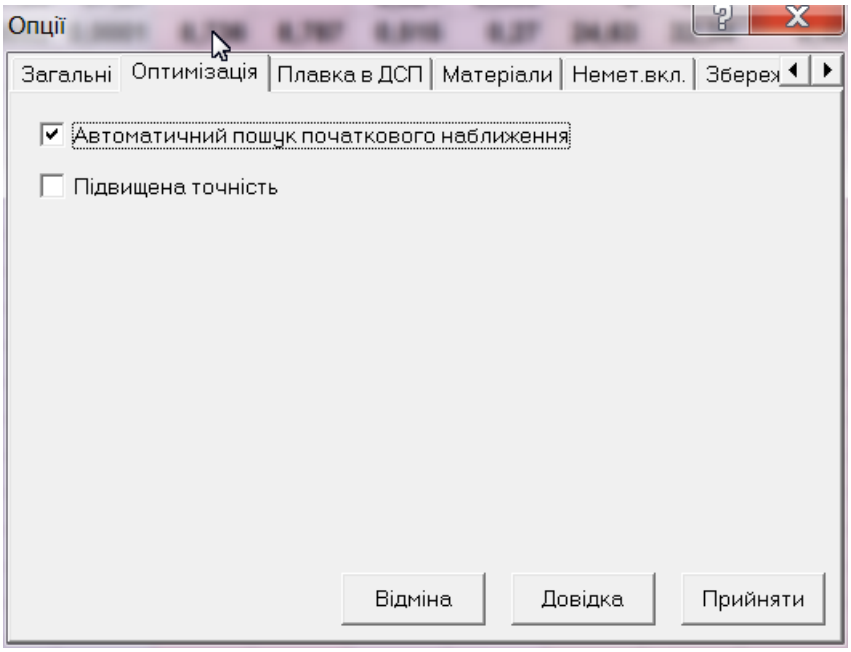
2.7. Опції

Панель опцій викликається вибором головного меню **Опції**.

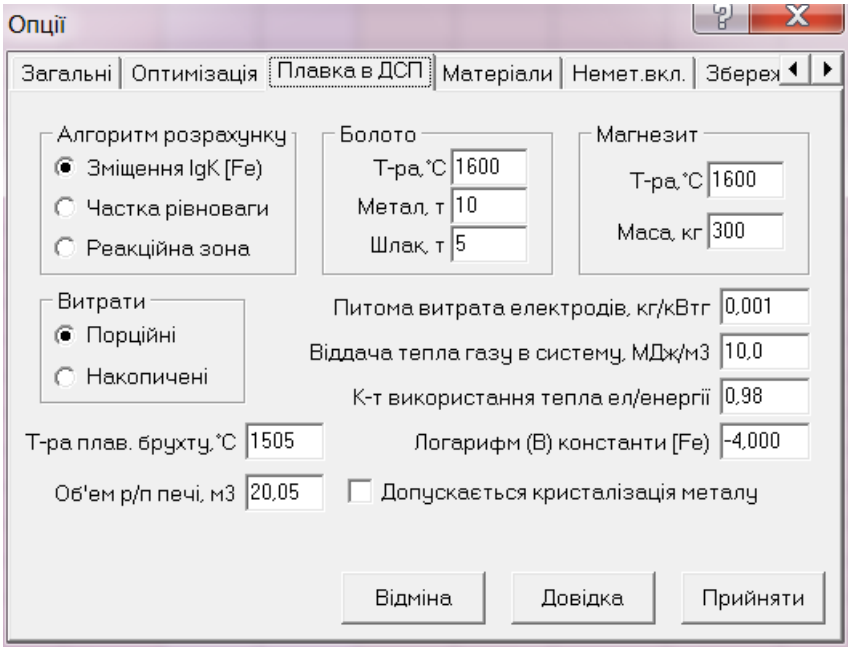
Панель опцій розділена на шість вкладок. На рис. 2.7, *а-е* показані діалогові вікна, що відповідають кожній із вкладок.


Опції
Загальні
Оптимізація
Плавка в ДСП
Матеріали
Немет.вкл.
Зберех
Модель металу
Модифікована КЕ
Розведений розчин
Модель шлаку
Модифікована КЕ - Kappa
Модифікована КЕ - Nu/Eps
Автоматично оцінювати [O] на випуску
Показувати гази с парціальним тиском не менше
1E-007
атм
Покращена збіжність, повільніший розрахунок
Склад фаз
масові %
мольні %
кілограми
кіломолі
сер
lg
пт
Розрахунок кінцевої температури
Ні
Точний
Спрощ.
Точний склад проби металу
Елементний склад шлаку
Відміна
Довідка
Прийняти

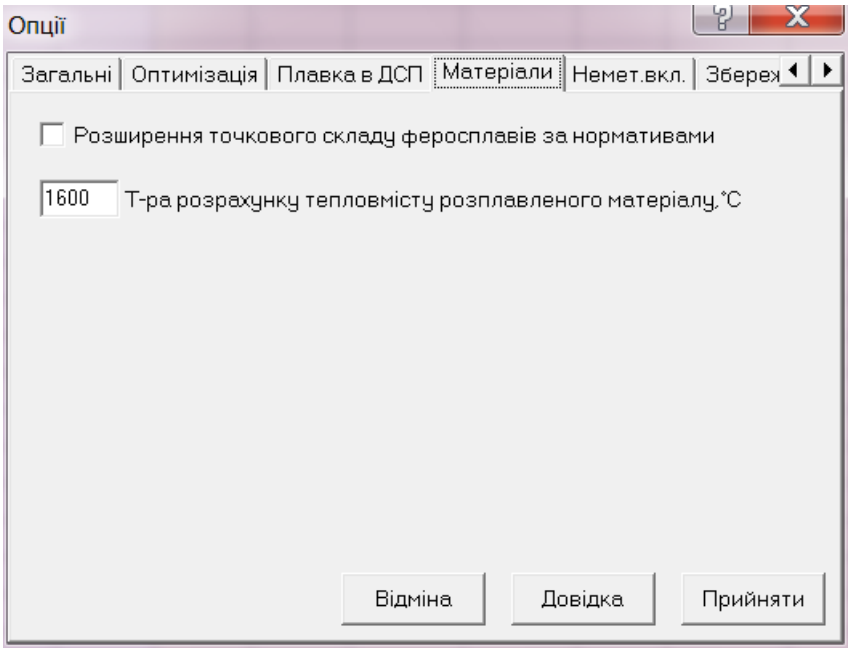
а)


Опції
Загальні
Оптимізація
Плавка в ДСП
Матеріали
Немет.вкл.
Зберех
Автоматичний пошук початкового наближення
Підвищена точність
Відміна
Довідка
Прийняти

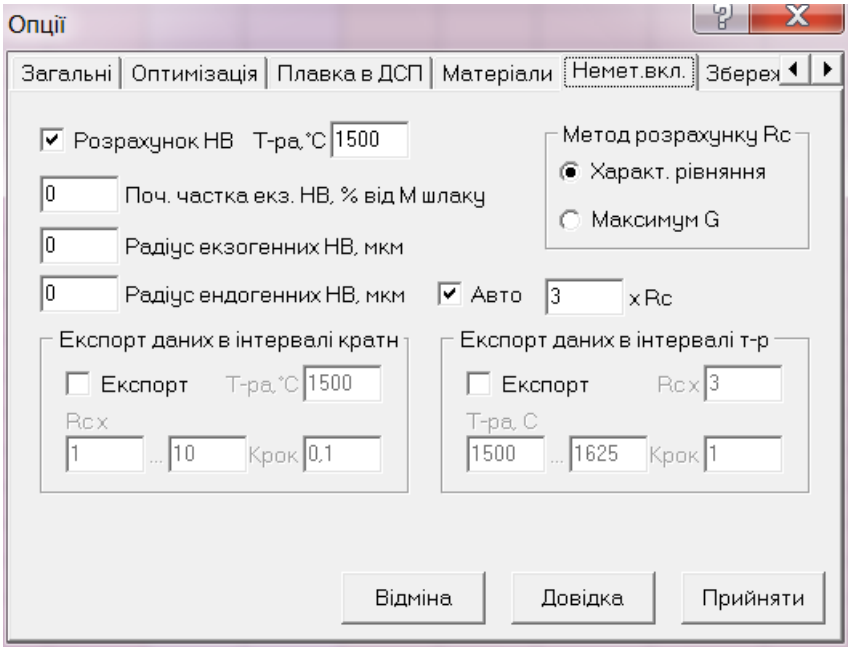
б)


Опції
Загальні
Оптимізація
Плавка в ДСП
Матеріали
Немет.вкл.
Зберех
Алгоритм розрахунку
Зміщення lgK [Fe)
Частка рівноваги
Реакційна зона
Болото
Т-ра,°С 1600
Метал, т 10
Шлак, т 5
Магнезит
Т-ра,°С 1600
Маса, кг 300
Витрати
Порційні
Накопичені
Питома витрата електродів, кг/кВтг 0,001
Віддача тепла газу в систему, МДж/м3 10,0
К-т використання тепла ел/енергії 0,98
Т-ра плав. брухту,°С 1505
Логарифм (В) константи [Fe) -4,000
Об'ем р/п печі, м3 20,05
Допускається кристалізація металу
Відміна
Довідка
Прийняти

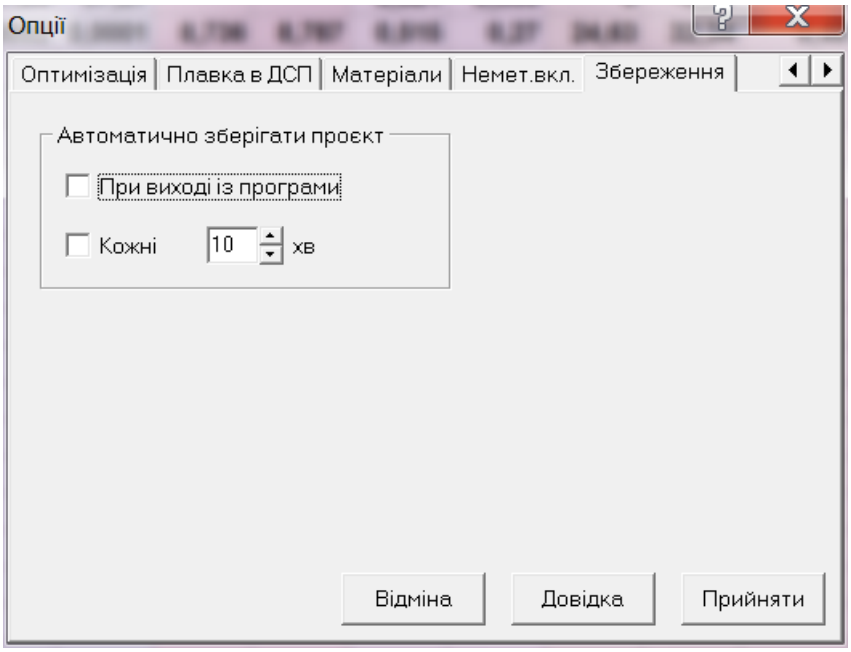
в)


Опції
Загальні
Оптимізація
Плавка в ДСП
Матеріали
Немет.вкл.
Зберех
Розширення точкового складу феросплавів за нормативами
1600 Т-ра розрахунку тепловмісту розплавленого матеріалу,°С
Відміна
Довідка
Прийняти

г)



д)



е)

Рисунок **2.7** – *Діалогові вікна вкладок панелі опцій: а) Загальні; б)Оптимізація; в) Плавка в ДСП; г) Матеріали; д) Немет. вкл.; е) Збереження*

2.7.1. Загальні опції

У таблиці 2.8 наведено функціональне призначення загальних опцій.

Таблиця 2.8 – *Функціональне призначення загальних опцій*

Опція	**Стан**	**Функціональне призначення**

Автоматично оцінювати [O] на випуску	Увімкнено	За відсутності в пробі металу значення [O] розраховується автоматично за рівновагою у підсистемі «метал-газ». Ігнорується, якщо значення [O] явно вказано у пробі металу. За відсутності проби шлаку хімічний склад шлаку розраховується приблизно за рівновагою в підсистемі «метал-шлак».
	Вимкнено	Якщо значення [O] явно не вказано у пробі металу, вміст [O] на випуску з печі приймається на рівні слідів.
Показувати гази з парціальним тиском не менше	Увімкнено	У таблиці газів (§2.2.3) відображаються лише гази з тиском не менше зазначеного в полі редагування (за замовчуванням 10^{-5} атм). Це дозволяє уникнути відображення десятків газів із нікчемним парціальним тиском.
	Вимкнено	У таблиці газів відображаються всі гази.
Точний склад проби металу	Увімкнено	Хімічний склад проби металу вважається точним. При цьому звужуються довірчі інтервали значень кінцевого хімічного складу фаз та інших параметрів.
	Вимкнено	Хімічний склад проби металу у всіх розрахунках поділяється на верхній та нижній відповідно до точності вимірювання вмісту елементів у металі, вказаній у полі **Acc** файла констант (CON) (§2.8.3).
Елементний склад шлаку	Увімкнено	У таблиці елементів на головній формі хімічний склад шлаку на оксиди не перераховується та відображається поелементно.
	Вимкнено	Хімічний склад шлаку перераховується на оксиди для елементів із позитивною валентністю. Для інших елементів склад шлаку відображається поелементно.
Склад фаз	масові %	У таблиці елементів на головній формі склад фаз відображається у вигляді масових відсотків.
	мольні %	Склад фаз відображається у вигляді мольних відсотків.

	кілограми	Склад фаз відображається у вигляді кілограмів.
	кіломолі	Склад фаз відображається у вигляді кіломолей.
сер	Включено	У таблиці елементів на головній формі нижні та верхні межі складів фаз усереднюються.
	Выключено	Нижні та верхні межі складів фаз відображаються окремо.
lg	Включено	У таблиці елементів на головній формі склад фаз відображається у вигляді десяткових логарифмів відповідної величини. Ця опція використовується в дослідницьких цілях.
	Выключено	Склади фаз відображаються у відповідних одиницях виміру.
Розрахунок кінцевої температури	Ні	Розрахунок кінцевої температури не проводиться. Кінцева температура фіксується лише на рівні вихідної. Рекомендується до розрахунку завалки.
	Точний	Проводиться точний розрахунок кінцевої температури відповідно до теплової моделі (див. гл. **Ошибка! Источник ссылки не айден.**). Рекомендується для більшості прямих та зворотних завдань.
	Спрощ.	Проводиться наближений розрахунок кінцевої температури. Тепло хімічних реакцій розраховується за вихідної температури системи. Рекомендується для завдань, у яких відмінність початкової та кінцевої температури невелика, наприклад, при покроковому (порційному) розрахунку електродугової плавки.

Примітка. Стан опцій за замовчуванням позначений підкресленням.

При натисканні кнопки **Прийняти** всі внесені зміни запам'ятовуються та відпрацьовуються програмою. При натисканні кнопки **Скасувати** або функціональної клавіші Esc внесені зміни ігноруються.

2.7.2. Опції плавки в ДСП

У табл. 2.9 та 2.10 наведено функціональне призначення дискретних та безперервних опцій електродугової плавки.

Таблиця 2.9 – *Функціональне призначення дискретних опцій електродугової плавки*

Опція	Стан	Функціональне призначення
Алгоритм розрахунку	Зміщення lgK[Fe)	Облік нерівноважності системи шляхом зміщення константи рівноваги «метал-шлак» по залізу, тобто шляхом посилення взаємодії між залізом та киснем.
	Частка рівноваги	Врахування нерівноважності шляхом запозичення системою частки рівноважного стану.
	Реакційна зона	Врахування нерівноважності системи шляхом призначення реакційної зони.
Витрати	Порційні	Покрокове введення в систему порцій матеріалів та енергії.
	Накопичені	Введення в систему накопичених з початку плавки матеріалів та енергії.
Допускається кристалізація металу	Увімкнено	У разі припинення подачі енергії зменшується маса рідкої сталі за рахунок кристалізації при незмінній температурі металу.
	Вимкнено	При припиненні подачі енергії зменшується температура ванни при постійній масі рідкої сталі.

Примітка. Стан опцій за замовчуванням позначений підкресленням.

Таблиця 2.10 – *Функціональне призначення безперервних опцій електродугової плавки*

Опція	Параметр	Значення за замовчуванням	Функціональне призначення
Болото	Т-ра, С	1700 °С	Температура болота, °С
	Метал, т	10 т	Маса металу в болоті, т
	Шлак, т	5 т	Маса шлаку в болоті, т

Магнезит	Т-ра, С	1600 °С	Температура °С та маса магнезиту на заправку.
	Маса, кг	300 кг	
Питома витрата електродів		0,001 кг/кВтг	Витрата електродів, що навуглерожують сталеплавильну ванну.
Віддача тепла газу до системи		10 МДж/м^3	Віддача тепла згоряння газу в сталеплавильну ванну.
К-т використання тепла електроенергії		0,985	Частка електроенергії, що засвоюється сталеплавильною ванною.
Логарифм (B) константи [Fe)		– 0,8	Десятковий логарифм ентальпійної частини константи рівноваги [Fe). Має значення під час вибору алгоритму розрахунку зі зміщенням константи рівноваги.
Т-ра плавлення брухту		1505 °С	Температура плавлення (ліквідус) усередненого брухту.
Об'єм р/п печі		20,05 м^3	Об'єм робочого простору печі.

2.7.3. Опції збереження

Опції збереження на вкладці **Збереження** дозволяють користувачеві встановити автозбереження через певні проміжки часу (за замовчуванням 10 хв) або при виході з програми. При цьому на диску зберігаються файл проекту (FWP) та відповідний файл завдань (TSK).

2.8. Службові файли

Усі службові файли «Excalibur» мають текстовий формат (розділювач – пробіл) для зручності їх перегляду та редагування.

2.8.1. Файл проєкту «Excalibur» (FWP)

Файл проєкту має розширення FWP.

Файл містить рядки, які вказують програмі, які саме файли слід використовувати для зчитування констант (ConFile), параметрів Вагнера (EpsFile), газових термодинамічних даних (GasFile), матеріалів (MatFile), завдань на плавку (TskFile) та протоколів (шаблонів) електродугової плавки (HeaFile) (необов'язковий рядок), а також рядок із порядковим номером поточного завдання на плавку (CurTask):

```
ConFile=EXCALIBUR.CON
EpsFile=EXCALIBUR.EPS
GasFile=EXCALIBUR.GAS
MatFile=EXCALIBUR.MAT
TskFile=EXCALIBUR.TSK
HeaFile=8644.HEA
CurTask=0
```

Якщо до складу проєкту входить кілька файлів завдань на плавку, то наприкінці файлу проєкту міститься кілька додаткових рядків – за кількістю файлів завдань, що належать до цього проєкту:

```
Tsk0=Plus.TSK #14 *Plus.MAT
Tsk1=Z0.TSK #0 *ZAV.MAT
Tsk2=Z1.TSK #12 *ZAV.MAT
```

У кожному такому рядку міститься покажчик на файл завдань (Tsk0...), ім'я файлу завдань (Plus.TSK...), порядковий номер завдання на плавку (після символу #) та ім'я відповідного файлу матеріалів (після символу *).

Файл проєкту формується програмою автоматично і зазвичай не вимагає ручного редагування.

Під час запуску програми автоматично завантажується файл проєкту, який був відкритий останнім у попередньому сеансі. Крім того, файли проєктів можна завантажувати за допомогою кнопки на панелі інструментів (§2.2.6) та пунктів головного меню (§2.2.7).

2.8.2. Файл матеріалів (MAT)

Файл матеріалів має розширення MAT.

Файл матеріалів є ключовим файлом програми, за яким формується список активних елементів, і який містить усю доступну інформацію про матеріали, що використовуються.

Файл складається з одного або декількох однорідних блоків за складом матеріалів. Кожен блок складається із заголовка та змістовної частини.

Заголовок блоку передує символом @. Безпосередньо за ним може бути символ хімічного елемента або сполуки, які є основою даного матеріалу. Далі в заголовку слідує список компонентів (елементів та/або сполук), що становлять матеріал. Список може бути порожнім, якщо матеріал складається лише із основи. Наприклад, заголовок @O без списку характерний для чистого кисню, а @FeO – для закису заліза. Якщо в змістовній частині сума вмісту компонентів менше 100%, і в заголовку вказано основу матеріалу, зміст основи рахується як доповнення до 100%.

Змістовна частина блоку складається з одного або кількох рядків – по одному для кожного матеріалу. Рядок матеріалу складається з наступних елементів:

- Найменування матеріалу довжиною до 15 символів;
- Розділювач « | »;
- Список вмісту компонентів матеріалу в масових відсотках – відповідно до списку компонентів заголовка. Якщо вміст даного компонента має нижню і верхню межі, вони поділяються символом « / ». Список може бути порожнім, якщо матеріал складається лише з основи, вказаної в заголовку;
- Ціна матеріалу за 1 тонну в будь-яких одиницях із префіксом « $ »;
- Коефіцієнт фізичного засвоєння матеріалу із префіксом « # » (не обов'язково). Ця величина може мати нижню і верхню межі, що розділяються символом « / ». При зазначенні коефіцієнта фізичного засвоєння сума масових часток всіх елементів нормується на цю величину. Тобто масова частка кожного елемента пропорційно знижується таким чином, щоб їхня сума дорівнювала цьому коефіцієнту;

- Температура матеріалу (°C) із префіксом @ (не обов'язково). Якщо температура матеріалу явно не прописана, вона приймається рівної температурі навколишнього середовища, вказаної у завданні на плавку (§2.3.4);
- Ознака рідкого « * » або газоподібного « ~ » агрегатного стану матеріалу (не обов'язково). За замовчуванням усі матеріали вважаються твердими.

Нижче наведено лістинг типового файлу матеріалів, що складається з 7 блоків:

```
    @Fe          C       Si      Mn       Al       S      P     Mg
FeMn        |    6/7    0.3/1   77.5/81  0      .03     .70     0   $ 2375 #0.95
SiMn        |    1.4    17.0      60     0      .03     .63     0   $ 2550 #0.95
FeSi45      |    0.15    45     0.3/1     0      .03      .1     0   $ 1955 #0.95
FeSi65      |    0.15    65     0.3/1     0      .03      .1     0   $ 2300 #0.95
AB-87       |     0      0/4      0     86/88      0       0    0.5 $ 6085 #0.8

@                C        S        P
Коксик      |   75/80     0/1.5   0/.01     $ 140 #0.75/0.85

@               SiC
Карбід Si   |   94/97 $ 1200

@             S        FeO   Al2O3   SiO2 MnO CaO    MgO
Футерівка   | 0        2.5   5.5     65     2  15      10       $ 0
Вапно       | 0/0.075  0      0      0      0 90/91  .6/1.1     $ 137 #0.75

@Fe             C     Mn     Si     S      P
Брухт чавунный| 3/4  .3/.5  .9/1    0.04 0.08 $ 100 #0.9/0.95
Чавун перероб.| 4.2  .2/.5  .6/.9   0.04 0.02 $ 130 @1350 *

@FeO
Окаліна    | $ 50

@           O
Кисень   | 100 $ 100 ~
```

Редагування файлу матеріалів здійснюється за допомогою будь-якого текстового редактора, який підтримує кодування Windows.

Файл матеріалів автоматично зчитується програмою щоразу під час читання файлу проєкту. Крім того, будь-який файл матеріалів може бути завантажений у програму за допомогою головного меню (§2.2.7).

2.8.3. Файл констант та теплофізичних даних (CON)

Файл констант та теплофізичних даних має розширення CON.

Файл містить набір однорідних рядків із константами хімічних елементів, параметрами термодинамічної моделі системи «метал-шлак-газ» та теплофізичними даними. Структура файлу наведена в таблиці нижче.

Таблиця 2.11 – *Структура файлу констант та теплофізичних даних*

Поле	**Размірність**	**Значення поля**
El	–	Символ хімічного елементу
Comp	–	Типова сполука елемента в шлаку
AtN	–	Атомний номер
At	–	Атомна вага
Nu	–	Валентність у шлаку
Lms1	–	Частина *A* виразу для константи рівноваги «метал-шлак» $\lg K_{[i)} = A/T+B$
Lms2	–	Частина *B* виразу для константи рівноваги «метал-шлак» $\lg K_{[i)} = A/T+B$
LG1	–	Частина *A* виразу для коефіцієнта активності в нескінченно розбавленому металевому розчині $\lg \gamma^0_{[i]} = A/T+B$
LG2	–	Частина *B* виразу для коефіцієнта активності в нескінченно розбавленому металевому розчині $\lg \gamma^0_{[i]} = A/T+B$
Kappa	кДж/моль	Атомний енергетичний параметр МКЕ
Lmg1	–	Частина *A* константи рівноваги «метал-газ» $\lg K_{[i\}} = A+B*T$
Lmg2	–	Частина *B* константи рівноваги «метал-газ» $\lg K_{[i\}} = A+B*T$
Acc	мас. %	Точність визначення хімічного складу металу у пробі (похибка виміру)
M	–	Ознака металу (0), вуглецю (1) та неметалу (2)
f1…f7	–	Параметри інтерполяційного багаточлена для обчислення ΔG чистого елемента

dH0	Дж/моль	Энтальпія утворення чистого елемента

Редагування файлу констант виконується за допомогою будь-якого текстового редактора.

Файл констант автоматично зчитується програмою щоразу під час читання файлу проекту. Крім того, будь-який файл констант може бути завантажений у програму за допомогою головного меню (§2.2.7).

2.8.4. Файл завдань на плавку (TSK)

Файл завдань на плавку має розширення TSK.

Файл містить набір однорідних блоків завдань на плавку з комплексом вихідних даних для прямої задачі та обмежень для зворотної задачі. Кожен блок даних однозначно відповідає таблицям та редагованим полям редактора завдання на плавку (§2.3).

Структура блоку даних файлу завдань на плавку наведена у таблиці нижче.

Таблиця 2.12 – *Структура блоку даних файлу завдань на плавку*

№ ряд-ка	**Іденти-фікатор рядка**	**№ / ід. поля**	**Значення поля**	**Відпов. поле редактора завдання**
1	*	1	Найменування завдання на плавку	Вкладка
2	ні	1…N	Список N контрольованих хімічних елементів	Эл (таблиця елементів)
3	ні	1…N	Обмеження за хімічним складом металу, мас. %	Мет>= Мет<= (таблиця обм. за х/с мет.)
4	ні	1…N	Обмеження за хімічним складом шлаку, мас. %	Шлк>= Шлк<= (таблиця обм. за х/с шлаку)

5	ні	1…N	Проба металу / проба шлаку, мас. %	Проба (табл. обм. за х/с мет. і шлаку)
6	MASSMET	1	Мінімально та максимально допустима маса металу, тонн	Мін / макс М мет.
		2	Відома початкова маса металу – нижня та верхня межі, тонн	Від. поч. М мет.
7	MASSSLG	1	Мінімально та максимально допустима маса шлаку, тонн	Мін / макс М шл.
		2	Відома початкова маса шлаку - нижня і верхня межі, тонн	Від. поч. М шл.
8	OSNSLG	1	Мінімально та максимально допустима основність шлаку	Мін / макс осн-ть
9	MASSGAS	1	Мінімально та максимально допустима маса газу, тонн	Мін / макс М газу
10	TEMP	1	Мінімально та максимально допустима температура, °С	Мін / макс т-ра
		2	Відома початкова температура металу та шлаку, °С	Від. поч. т-ра
		3	Прихід енергії до системи з енергоносіями / теплові втрати, МДж	Qэ, МДж Qпот, МДж
		4	Температура навколишнього середовища, °С	Т-ра н. серед.
11	ні		Порожній рядок	
12... 11+M	Найменування М контрольованих матеріалів	~	Рекомендована маса матеріалу, тонн	Реком (табл. матеріалів)
		!	Фіксована маса матеріалу, тонн	Фікс (табл. матеріалів)
		&	Мінімальна / максимальна маса матеріалу, тонн	Мін т / Макс т (табл. матеріалів)

		%	Мінімально / максимально допустимий відсоток даного матеріалу в загальній масі матеріалів, що завантажуються, мас. %	Мін % / Макс % (табл. матеріалів)

Примітки.

1. Символ « - » означає відсутність обмежень або даних вимірів.
2. Величини з нижньою та верхньою межами поділяються символом « / ».
3. За ідентифікаторами рядків (крім *) слідує символ роздільника « | ».

Нижче наведено лістинг типового блоку даних завдання на плавку.

```
*Плавка № 100000
Fe   C   Si   Mn   S   P   O   Ca   Mg   Al
-/- .05/.11 -/.03 .295/.5 -/.04 -/.035 .06/.07 -/- -/- -/-
-/- -/- -/- -/- -/- -/- -/- -/- -/- -/-
-/28 .05/- -/15 .05/3.3 .038/.11 .008/.7 -/- -/44.2 -/6.5 -/1.6
MASSMET | -/- 230/255
MASSSLG | -/- 3.5/4.5
OSNSLG  | -/-
MASSGAS | -/.3
TEMP    | -/- 1625 -/- 20

FeMn      | ~1.4
АВ-87     |
Вапно     | !0
Футерівка | !.125
Окаліна   |
SiMn      | !0
Карбід Si | !0
Коксик    | &.1
```

Далі йдуть подібні блоки даних – до 60 блоків в одному файлі.

Файл завдань формується програмою автоматично і зазвичай не вимагає ручного редагування.

Файл завдань на плавку автоматично зчитується програмою щоразу під час читання файлу проєкту. Крім того, будь-який файл завдань може бути завантажений із редактора завдань (§2.3) та за допомогою головного меню (§2.2.7).

2.8.5. Файл протоколу електродугової плавки (HEA)

Файл протоколу електродугової плавки має розширення HEA. Він використовується підпрограмою моделювання електродугової плавки (§2.5).

Для нормального функціонування прямої та зворотної задач наявність цих файлів не обов'язкова.

Файл містить набір рядків із витратами матеріалів, електроенергії, тепловими втратами, а також вимірювання температури та хімічного складу металу на поточному кроці. Структура файлу протоколу електродугової плавки наведена в таблиці нижче.

Таблиця 2.13 – *Структура файлу протоколу електродугової плавки*

Поле	**Розмірність**	**Значение**
Час	с	Час від початку плавки.
ЕЕ	кВтг	Порція електроенергії.
Втрати	кВтг	Втрати тепла.
Газ	$м^3$	Витрата природного газу.
O2	$м^3$	Витрата кисневого дуття.
T_факт	°C	Вимірювання температури. Значення 0 ігнорується.
|		Індикатор наведених далі матеріалів.
Вапно	кг	Витрата вапна.
Вапняк	кг	Витрата вапняка.
Кокс	кг	Витрата коксу.
Бр_25, ...	кг	Витрата брухту сорту 25, …
/Mn=.1499 /P=.0078…	мас. %	Хімічний склад проби металу.

Лістинг фрагментів типового файлу протоколу електродугової плавки наведений нижче:

```
Час   ЕЕ Втрати   Газ   O2 T_факт|Вапно Вапняк Кокс Бр_25 Бр_26 Бр_608
0     0     0     0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
1     0     0     0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
13    0     17    0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
25    0     17    0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
...
470   0     8     0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
482   0     8     0.00  0.00  0     0     0     0     45100 9900  0
```

```
...
638   66    6     0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
650   67    6     0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
662   133   6     0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
674   200   5     0.00  0.00  0     0     0     0     0     0     0
...
```

Параметри електродугової плавки, які не вказані у файлі протоколу, зчитуються програмою із вкладки опцій «**Плавка в ДСП»** (§2.7.2).

Під час запуску програма автоматично зчитує файл протоколу електродугової плавки, вказаний у файлі проєкту (FWP).

Працюючи з формою моделювання електродугової плавки (рис. 2.5), користувач має можливість завантажити будь-який файл протоколу електродугової плавки за допомогою розташованих на панелі управління (§2.5.5) кнопки відкриття файлу або випадаючого списку плавок.

2.8.6. Файл газових констант (GAS)

Файл газовых констант має розширення GAS.

Файл містить набір однорідних рядків з термодинамічними даними про молекулярні та атомарні гази, які можуть бути утворені з усіх доступних елементів.

Структура файлу газових констант наведена в таблиці нижче.

Таблиця 2.14 – *Структура файлу газових констант*

Поле	**Розмірність**	**Значення**
f1…f7	–	Параметри інтерполяційного багаточлена для обчислення Δ*G* газу
dfH(0)	кДж/моль	Ентальпія утворення газу
Tmin	K	Температурний інтервал, для якого справедливий інтерполяційний багаточлен
Tmax		
EN	–	Кількість сортів атомів у молекулі газу
E1…E4	–	Символ хімічного елемента у позиціях 1…4 формули газу
C1…C4	–	Кількість атомів сорту E1...E4 у складі молекули

		газу
Gas	–	Хімічна формула молекули газу

За кожним активним елементом у файлі газових констант повинна бути інформація принаймні для одноатомного газу.

Під час запуску програма автоматично зчитує файл газових констант, зазначений у файлі проєкту (FWP).

2.8.7. Файл параметрів Вагнера (EPS)

Файл параметров Вагнера має розширення EPS.

Нижче наведено лістинг кількох рядків файлу параметрів Вагнера.

```
            O      Al      Si      Mn      Ca     Mg      C  ...
O       -12.0
Al       -212    5.92
Si      -13.4    6.97    13.0
Mn      -5.70    -2.9    11.8   0.626
Ca     -10202   -6.50   -10.7    -1.5   -5.17
Mg       -198   -1.39   -0.03    0.04   -10.3  -9.2
C       -16.9    5.04    10.4   -1.80   -15.9  7.29  9.40
...
```

Під час запуску програма автоматично зчитує файл параметрів Вагнера, зазначений у файлі проєкту (FWP).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. **Харченко, А. В.** Экспериментальные основания термодинамической модели коллективизированных электронов [Текст] / А.В. Харченко, А.Г. Пономаренко // *Сб. научных трудов ДонНТУ. Серия: Металлургия*. – 2003. – Вып. 66. – С. 17-24.

2. **Харченко, А. В.** Дифференциальные коэффициенты усвоения в компьютерных системах управления плавкой и внепечной обработкой стали [Текст] / А.В. Харченко, А.Г. Пономаренко, С.В. Довгонюк // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – № 10. – С. 131-137.

3. **Харченко, О. В.** Диференціальні коефіцієнти засвоєння в системах контролю сталеплавильного виробництва [Текст] / О.В. Харченко, Н.В. Лічконенко // *Збірник наукових праць "Металургія"*. – 2021. – Вип. 1. – С. 20-30.

4. **Харченко, О. В.** Диференціальні коефіцієнти засвоєння в комп'ютерних системах проєктування і управління плавкою сталі [Текст] / О.В. Харченко // *Метал та лиття України*. – 2021. – Том 29. – № 2. – С. 23-30.

5. **Kharchenko, O. V.** Differential assimilation coefficients (DAC) in computer steelmaking control systems / O.V. Kharchenko, O.M. Smirnov // *Proc. The 5th European Steel Technology and Application Days (ESTAD-2021), August 30 – September 2, 2021, Stockholm, Sweden (ID 32258)*. https://www.estad2021.com/wp-content/uploads/sites/62/2021/08/Programbook-2-FINAL.pdf.

6. **Kharchenko, O. V.** Differential assimilation coefficients (DAC) in computer steelmaking control systems / O.V. Kharchenko, O.M. Smirnov // *Proc. The 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference, 6th CTSI Clean Technologies in the Steel Industry, October 17 –21, 2022, Aachen, Germany*. https://register.eosc-ctsi.com//papers2021/ppdf_eosc_3_Kharchenko-DAC.pdf.

7. **Харченко, А. В.** Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом тепла химических реакций [Текст] / А.В. Харченко, А.Г. Пономаренко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 8. – С. 40-43.

8. **Харченко, А. В.** Термодинамическое моделирование системы «металл-шлак-газ» с учетом энтальпийного теплового баланса [Текст] / А.В. Харченко // *Металл и литье Украины*. – 2005. – № 6. – С. 13-17.

9. **Харченко, А. В.** Программа «EXCALIBUR» – возможности и перспективы использования в металлургическом производстве [Текст] / А.В. Харченко, Р.В. Синяков // *Сб. научных трудов ДонНТУ. Серия: Металлургия*. – 2005. – Вып 102. – С. 82-91.

10. **Харченко, А. В.** Возможности и перспективы использования программы «Excalibur» в учебном процессе / А.В. Харченко, Н.В. Личконенко, Ю.В. Мосейко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2013. – Вип. 1 (29). – С. 169-175.

11. **Харченко, О. В.** Комп'ютерна програма «Excalibur» / О.В. Харченко, Н.В. Лічконенко // Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022р.

12. **Харченко, А. В.** Оптимизация процесса раскисления стали с применением аппаратно-программного комплекса «Мастер» [Текст] / А.В. Харченко, А.В. Борщев, В.Л. Ковалев и др. // *Металл и литье Украины*. – 2008. – №10. – С. 12-16.

13. **Харченко, А. В.** Оптимизация процесса раскисления стали с применением аппаратно-программного комплекса «Мастер» [Текст] / А.В. Харченко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2015. – Вип. 1 (33). – С. 19-22.

14. **Харченко, А. В.** Усовершенствование системы контроля сталеплавильного производства «Мастер» [Текст] / А. В. Харченко, В. Л. Ковалев, Н. В. Личконенко, Р.П. Ляшенко // *Збірник наукових праць «Металургія»*. – 2019. – Вип. 2 (42). – С. 11-15.

15. **Харченко, А. В.** Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы [Текст] / А.В. Харченко, А.Г. Пономаренко, Е.Л. Корзун // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 8. – С. 135-139.

16. **Харченко, А. В.** Теплоемкость и другие термодинамические функции смешения многокомпонентной конденсированной фазы [Текст] / А.В. Харченко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія.* – 2012. – Вип. 2 (27). – С. 20-28.

17. **Харченко, А. В.** Термодинамическая модель многокомпонентной жидкой шлаковой фазы [Текст] / А.В. Харченко, Р.В. Синяков // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2016. – Вип. 2 (36). – С.16-22.

18. **Харченко, А. В.** Термодинамика неметаллических включений в стали [Текст] / А. В. Харченко, Р. В. Синяков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 3. – С. 15-21.

19. **Харченко, А. В.** Физико-химические закономерности формирования неметаллических включений в стали / А. В. Харченко, Р. В. Синяков // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2017. – Вип. 1(37). – С. 17-23.

20. **Харченко, А. В.** Вторичное легирование и рафинирование стали в установках печь-ковш [Текст] / А.В. Харченко, Н.В. Личконенко, Ю.В. Мосейко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2012. – Вип. 1 (26). – С. 17-21.

21. **Харченко, А. В.** Экспериментальные исследования технологии вторичного электротермического легирования и рафинирования [Текст] / А.В. Харченко, Д.А. Лаптев, С.В. Башлий // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2014. – Вип. 1 (31). – С. 30-35.

22. **Харченко, А. В.** Вторичное электротермическое легирование и рафинирование металла с участием газовой фазы [Текст] / А. В. Харченко, Н. В. Личконенко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2016. – Вип. 1 (35). – С. 9-13.

23. **Харченко, А. В.** О кинетике межфазного массопереноса в металлургических агрегатах [Текст] / А.В. Харченко, А.Г. Пономаренко // *Металл и литье Украины*. – 2002. – № 12. – С. 41-42.

24. **Харченко, А. В.** Термодинамика и кинетика процесса вторичного электротермического легирования и рафинирования металла [Текст] / А.В. Харченко, А.Г. Кириченко, Ю.А. Белоконь // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2015. – Вип. 1 (33). – С. 8-12.

25. **Kharchenko, A. V.** The Efficient Control of the BOF Process Under Conditions of Permanent Changing of Technological Parameters / A.V. Kharchenko, R.V. Sinyakov // *Proc. The 4th European Steel Technology and Application Days (ESTAD-2019), 24-28 June 2019 – Congress Centre Düsseldorf, Germany*. – P. 709.

26. **Харченко, А. В.** Применение метода химических потенциалов Гиббса в черной металлургии [Текст] / А.В. Харченко, Р.В. Синяков, Н.В. Личконенко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2017. – Вип. 2 (38). – С. 20-25.

27. **Харченко, А. В.** Оптимизация внепечной обработки и легирования стали на основе решения обратной задачи термодинамического анализа [Текст] / А.В. Харченко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2004. – № 8. – С. 115-120.

28. **Харченко, А. В.** Разработка информационно–технологической системы «Форвард» для управления металлургическими процессами в реальном масштабе времени [Текст] / А.В. Харченко, А.Г. Пономаренко, С.А. Храпко и др. // *Известия ВУЗов, Черная металлургия*. – 1991. – № 12. – С. 89-91.

29. **Харченко, О. В.** Теплові ефекти вторинного електротермічного легування і рафінування сталі [Текст] / О.В. Харченко, Н.В. Лічконенко // *Збірник наукових праць "Металургія"*. – 2020. – Вип. 1. – С. 11-18.

30. **Харченко, А. В.** Исследование термодинамических функций металлического расплава методом молекулярной динамики [Текст] / А.В. Харченко, Н.В. Личконенко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2012. – Вип. 3 (28). – С. 5-9.

31. **Харченко, А. В.** Физико-химические процессы в высокотемпературной реакционной зоне жидкой сталеплавильной ванны [Текст] / А.В. Харченко, Р.В. Синяков, Н.В. Личконенко // *Збірник наукових праць ЗДІА. Металургія*. – 2018. – Вип. 1 (39). – С. 41-47.

32. **Харченко, О. В.** Термодинамічний аналіз фізико-хімічних процесів в високотемпературній реакційній зоні рідкої сталеплавильної ванни. Частина 1. Системи залізо-кисень, залізо-кисень-вуглець процесса [Текст] / О.В. Харченко,

Н.В. Лічконенко // *Метал та лиття України*. – 2022. – Том 30. – № 1. – С. 28-34.

33. **Kharchenko O. V.** Thermodynamic analysis of physical and chemical processes in the high-temperature reaction zone of a liquid steelmaking bath. Part 2. Removal of impurities / O.V. Kharchenko // *Метал та лиття України*. – 2022. – Том 30. – № 4. – С. 30-35.

34. **Харченко, О. В.** Спосіб позапічної обробки сталі / О.В. Харченко, Р.В. Синяков, С.А. Воденніков, Н.В. Лічконенко // Патент України №132087, зареєстрований в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 11.02.2019.