



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ
ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО
КАТЕДРА „ИНЖЕНЕРНА ЕКОЛОГИЯ”

инж. Димитър Борисов Борисов

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ВЪЗМОЖНОСТИ
ЗА МИНИМИЗИРАНЕ, ОПОЛЗОТВОРЯВАНЕ И
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНО ОБЕЗВРЕЖДАНЕ НА
ПРОМИШЛЕНИ ОТПАДЪЦИ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”

по научна специалност 5.13. Общо инженерство

(Технология за оползотворяване и третиране на отпадъците)

Научни ръководители: проф. д-тн инж. Стоян Стоянов
доц. д-р инж. Борис Стефанов

Научно жури:

1. доц. д-р инж. Николай Козарев – председател, рецензент
2. проф. д-р Д-рХК (ХТМУ) Джон Робинсън – рецензент
3. проф. д-тн Стоян Стоянов
4. проф. д-р инж. Иван Домбалов
5. проф. д-р Минчо Минчев

София, 2015

Дисертационният труд е написан на 169 страници, съдържа 45 фигури и 24 таблици. Цитирани са 246 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен катедрен съвет на научното звено на катедра „Инженерна екология”, състояло се на 18.12.2014 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 16.03.2015 г. от 14 часа в зала 424, сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересуващите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

1. Увод

Рационалното използване на природните ресурси и опазването на околната среда от замърсяване при експлоатацията на производствени инсталации е една от най-важните задачи за постигане на устойчиво развитие. Успешното решаване на тези задачи е свързано със създаване и усъвършенстване на иновативни технологии с оптимален разход на природни ресурси, генериращи минимални количества отпадъчни материални потоци.

Специфичните особености на производствените процеси в металургията и химическата промишленост, където входящите и изходящите материални потоци са съществени в количествено отношение, определят следните по-важни възможности за ограничаване на въздействието им върху компонентите на околната среда:

- Разработване и внедряване на принципно нови производствени технологии и инсталации превъзхождащи най-добрите налични техники, с висока производителност, оптимален разход на материални и енергийни ресурси, минимални количества на отпадъчните потоци и минимални концентрации на токсични компоненти в продуктите и отпадъците;
- Използване на технологичните възможности за максимално оползотворяване на полезните компоненти на отпадъците и неутрализиране на токсичните и вредните вещества в тях;
- Внедряване на ефективни системи за почистване, преработване и обезвреждане на неоползотворяемите по технически или икономически причини отпадъчни потоци.

Използването на производствените отпадъци като суровинен източник за получаването на търсени на световния пазар продукти и нови материали намира все по-голямо практическо приложение. Приоритетно значение за ограничаване и предотвратяване на екологичните проблеми, свързани с определен производствен процес, има установяването на конкретните технологични възможности за редуциране на обемите, масовите количества и

интензивността на отпадъчните потоци. За успешното решаване на проблемите, създавани от промишлените отпадъци, се изисква свързаните с тях технологии да се оценяват и анализират комплексно. Най-важните критерии за оценка на екологичното ниво на производствените инсталации са свързани със следните процеси:

- Максимално оползотворяване на суровини и спомагателни материали в производствения процес;
- Оптимално управление на технологичния режим, осигуряващо минимален разход на енергийни ресурси, вода и други консумативи;
- Рационално управление на производствените отпадъци, осигуряващо минимален риск от неблагоприятни въздействия върху околната среда;
- Комплексно оценяване на цялостната верига на жизнения цикъл на крайните продукти – от подготвителните и транспортните процеси до изчерпването на потребителските качества на продукта и превръщането му в отпадък или обратна суровина.

Необходимият ефект от осъществяването на представените по-горе основни процеси може да се постигне с помощта на системи за управление на качеството на производството и за осигуряване на качеството на околната среда, които обхващат всички дейности свързани с икономически ефективната експлоатация на една производствена инсталация.

Усъвършенстването на технологичните процеси влияе непосредствено върху ефективността на системата за управление на качеството на околната среда. Оптималното управление и повишаването на качеството на производствените процеси се отразява положително върху ограничаването на неблагоприятното им въздействие върху околната и работната среда.

Решаваща роля за целесъобразното и съгласувано функциониране на системите за управление на производствени системи има тяхното изграждане в съответствие със стандартните изисквания:

- Стандарт за система за управление на качеството (QMS) – ISO 9001;

- Стандарт за система за управление на околната среда (EMS) – ISO 14001;
- Стратегия на Европейския съюз (EMAS) за управление на околната среда и одитиране.

Основно стратегическо изискване на стандарта за Система за управление на околната среда ISO 14001 е установяването на крайните цели и необходимите дейности, които ще доведат до намаляване или елиминиране на технологичните отпадъци на всеки производствен етап на една промишлена инсталация. От технико - икономическа гледна точка отпадъците представляват загуби на материални и енергийни ресурси, които водят до понижаване на икономическата ефективност и до съответно повишаване на производствените разходи за единица краен продукт. Образуването на конкретен вид отпадък е признак за неефективност на: производствена операция или процес; използвана технология или техническо оборудване; прилагана система за управление или ограничена трайност на стоки и неустойчивост на модели за потребление.

В металургичната и химическата промишленост количествените и качествените характеристики на генерираните производствени отпадъци представляват идентификатори за ефективността на използване на суровините и степента на извличане на полезните компоненти в конкретен технологичен процес. Успешното управление на производствените отпадъци предвижда използването на методи и техники за тяхното минимизиране или предотвратяване. Европейското екологично законодателство и в частност Директива 91/156/ЕЕС изисква прилагането на следните приоритетни мерки при осъществяване на съобразено с околната среда управление на отпадъците от човешките дейности:

- Установяване на възможностите за предотвратяване или минимизиране на образувалите се отпадъци;
- Реализиране на технически възможности на производствените инсталации за директно оползотворяване на образувалите се отпадъци;

- Осъществяване на мерки за оползотворяване на енергийния потенциал на отпадъци като цяло или на компоненти от тях;
- Третиране на отпадъци с цел отстраняване, редуциране или неутрализиране на токсични и вредни компоненти в тях;
- Депониране на отпадъци при отсъствие на технико-икономически възможности за оползотворяване или допълнително третиране.

Цел и задачи на дисертационния труд

Направените по-горе обобщения относно ролята на ефективното управление на производствените отпадъци, за опазването на околната среда и за устойчивото развитие, позволяват да се формулира основната цел на дисертационната работа:

Създаване на методология за определяне на технологичните възможности за минимизиране, оползотворяване и/или високотемпературно обезвреждане на твърди промишлени отпадъци, генерирани при технологични операции в металургичната и химическата промишленост.

За постигането на поставената цел е необходимо да бъдат решени следните основни задачи:

- Избор на метод за минимизиране на отпадъците в химическата и металургичната промишленост;
- Съставяне на математичен модел за минимизиране на количествата на твърдите отпадъци, образуващи се при топилни металургични процеси;
- Съставяне на алгоритъм за решаване на математичния модел;
- Програмно реализиране на математичния модел;
- Верифициране на модела и установяване на възможностите за неговата адаптация към конкретни технологични операции и процеси.

2. Математичен модел за минимизиране на количествата на твърдите отпадъци и определяне на възможностите за тяхното оползотворяване и/или високотемпературно обезвреждане

Характерните особености на високотемпературните факелни процеси, които усложняват създаването на математичен модел за оптимизация и управление на технологичния процес, са следните:

- Процесите, протичащи в летящо състояние са много сложни и със силно взаимосвързани входни и изходни параметри;
- Някои от топлофизичните и физикохимичните процеси във факелните дисперсни системи не са изяснени теоретично, поради което се налага косвена оценка на действителното състояние;
- Повечето от управляващите и управляемите параметри на технологично реализираните процеси не подлежат на непрекъснат и пряк контрол;
- Нестационарност на процесите и следствие на това вариране в широки граници и неточност на измеримите величини.

Общата структура на математичния модел е представена на фиг.2.1. Главните етапи са следните: изчисляване на фазовия състав на шихтата; изчисляване на количеството и състава на получаващите се метална, шлакова и газова фаза; топлинен баланс и изчисляване на количеството допълнително гориво, необходимо за допълване на топлинния дефицит; изчисляване процеса на пълно горене на допълнителното гориво и коригиране на количеството и състава на газовата фаза.

Уравнението на баланса на масовия поток се базира на данни, използвани за определяне на степента на използване на суровините и добавяните спомагателни материали при съответната производствена технология.

Съставен е алгоритъм за изчисляване на фазовото разпределение на базата на въведени процентни съотношение на основните компоненти в системата (мед, желязо и сяра).

За опростяване на изчисленията се приема, че в шихтите за топилния процес се съдържат следните съединения на медта, желязото и сярата: Cu_2S , CuS , FeS , FeS_2 , CuFeS_2 .

При добавяне към шихтата на отпадъчни материали за оползотворяване или обезвреждане е възможно да се съдържат в свободно състояние някои от разглежданите елементи.

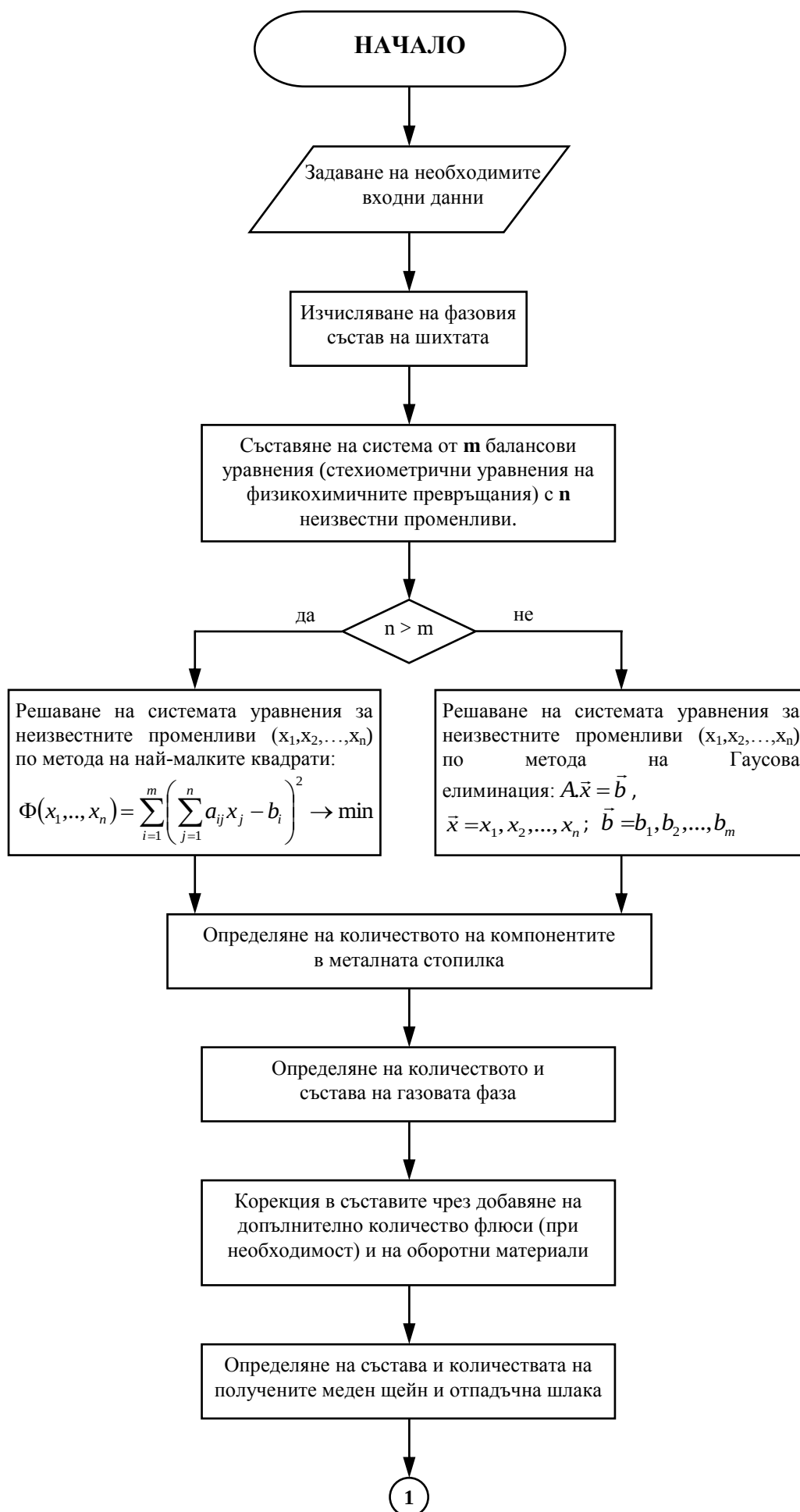
На базата на разработения математичен модел за изчисляване на фазовия състав на сулфидни шихти е съставен материален баланс на процеса на топене в технологичен факел (фиг. 2.2).

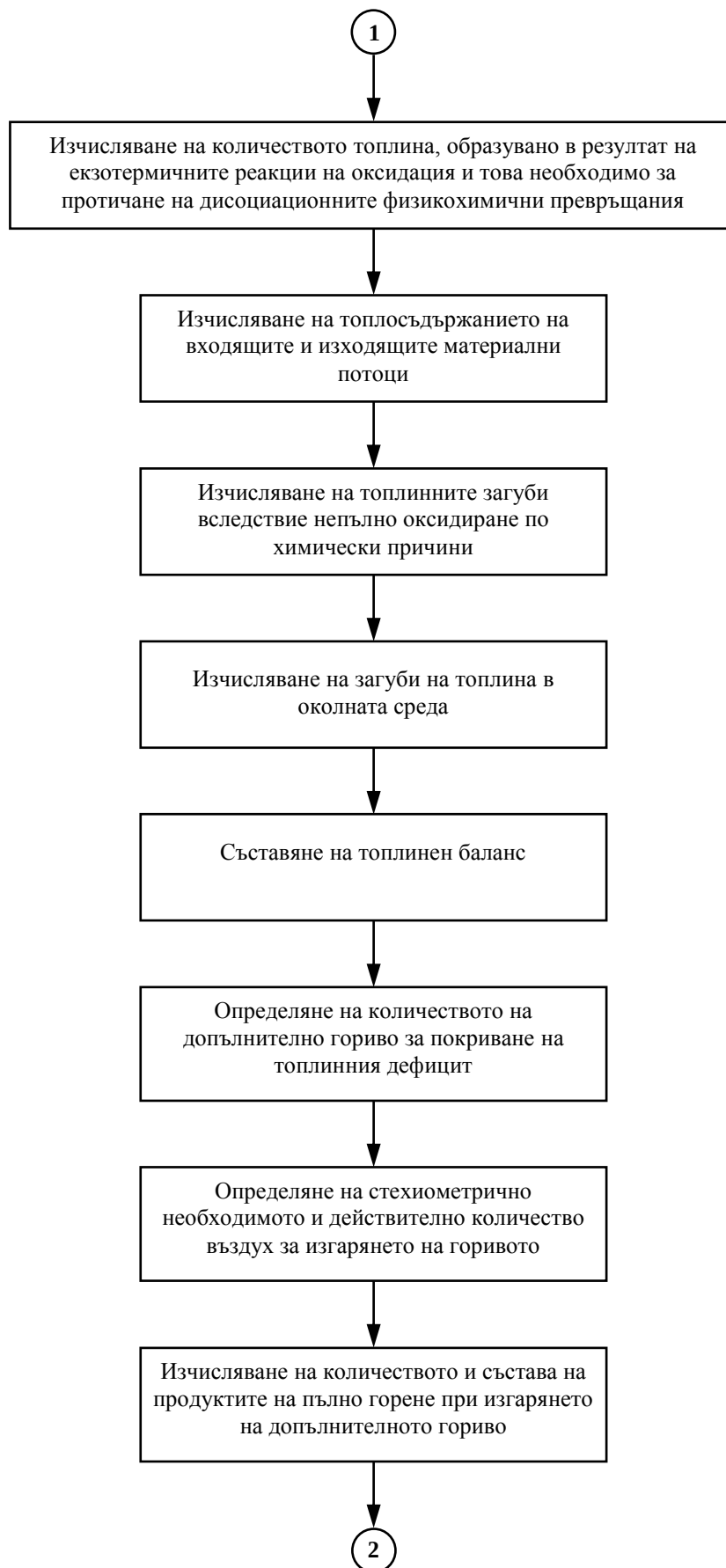
Основните физикохимични процеси при факелното топене на сулфидни медни концентрати са следните:

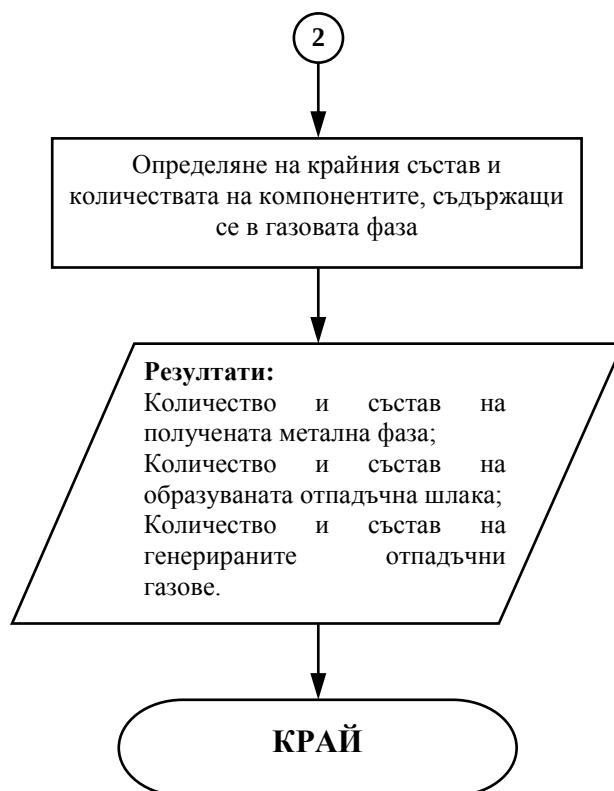
- Дисоциация на висшите сулфиди на медта и желязото;
- Окисляване на елементарната сяра;
- Оксидиране на металните сулфиди;
- Шлакообразуване.

След подаване на шихтата и окислителя в реакционната шахта на пещта за факелно топене на сулфидни медни концентрати, сулфидните частици започват да дисоциират, окисляват се и се стапят.

Процесите на нагряване на сулфидните частици, дисоциацията на висшите сулфиди и взаимодействието на сулфидите с кислорода в пещния обем по време на процеса на топене в летящо състояние са хетерогенни процеси, скоростите на които при равни условия линейно зависят от величината на разделителната повърхност на границата газ-твърда фаза.





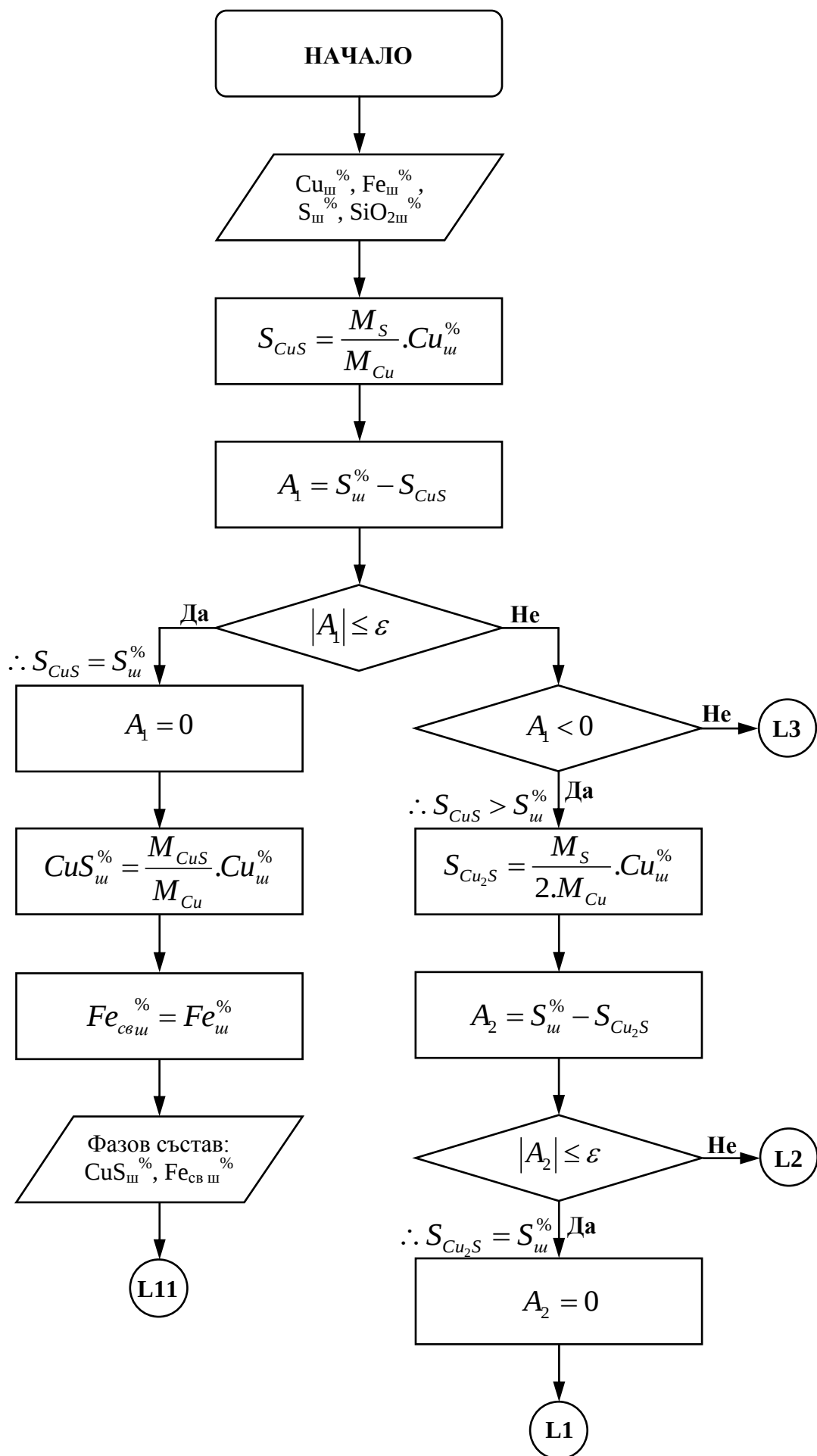


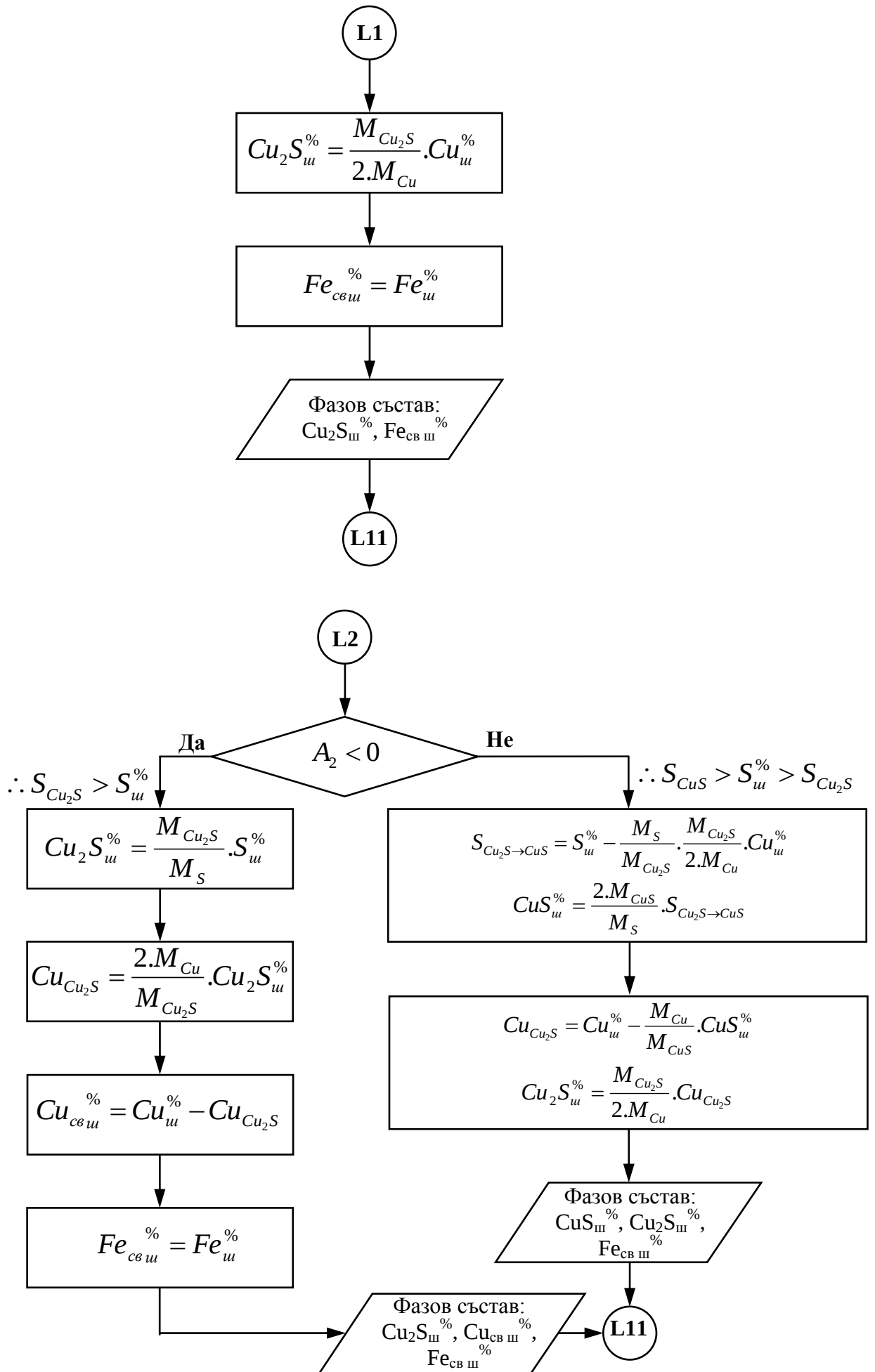
Фиг. 2.1. Общата структура на математичния модел

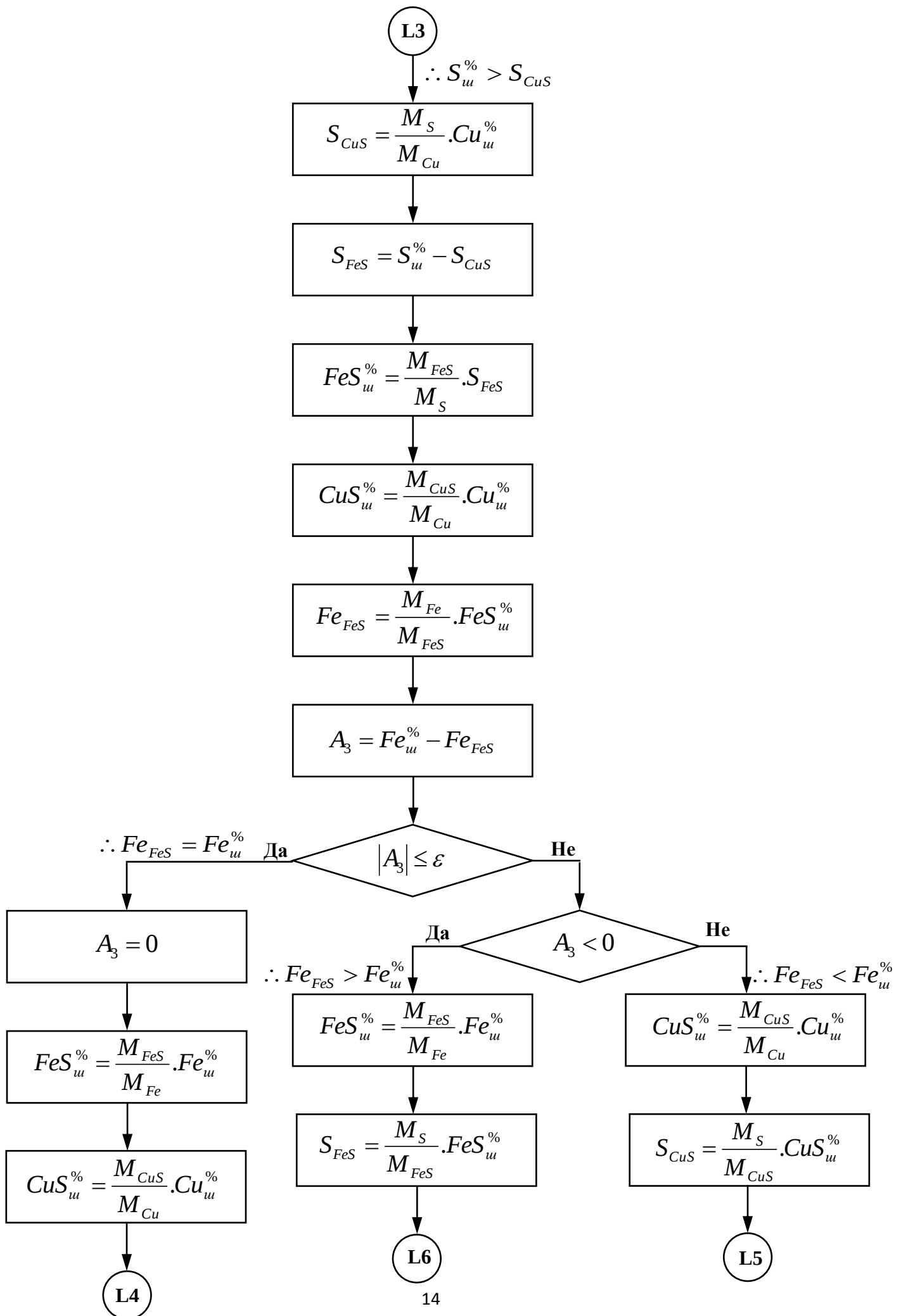
За изчисляване на физикохимичните превръщания се съставя материален баланс поотделно на реакционната шахта и отстойната зона. Газовата фаза и стопилката са свързани чрез протичащите физикохимични превръщания. В материалния баланс се взимат предвид окислително-десулфуризационните процеси, горивните процеси, когато е необходимо да се изгаря допълнително гориво за компенсиране на топлинните загуби и засмукването на студен въздух в отстойната зона.

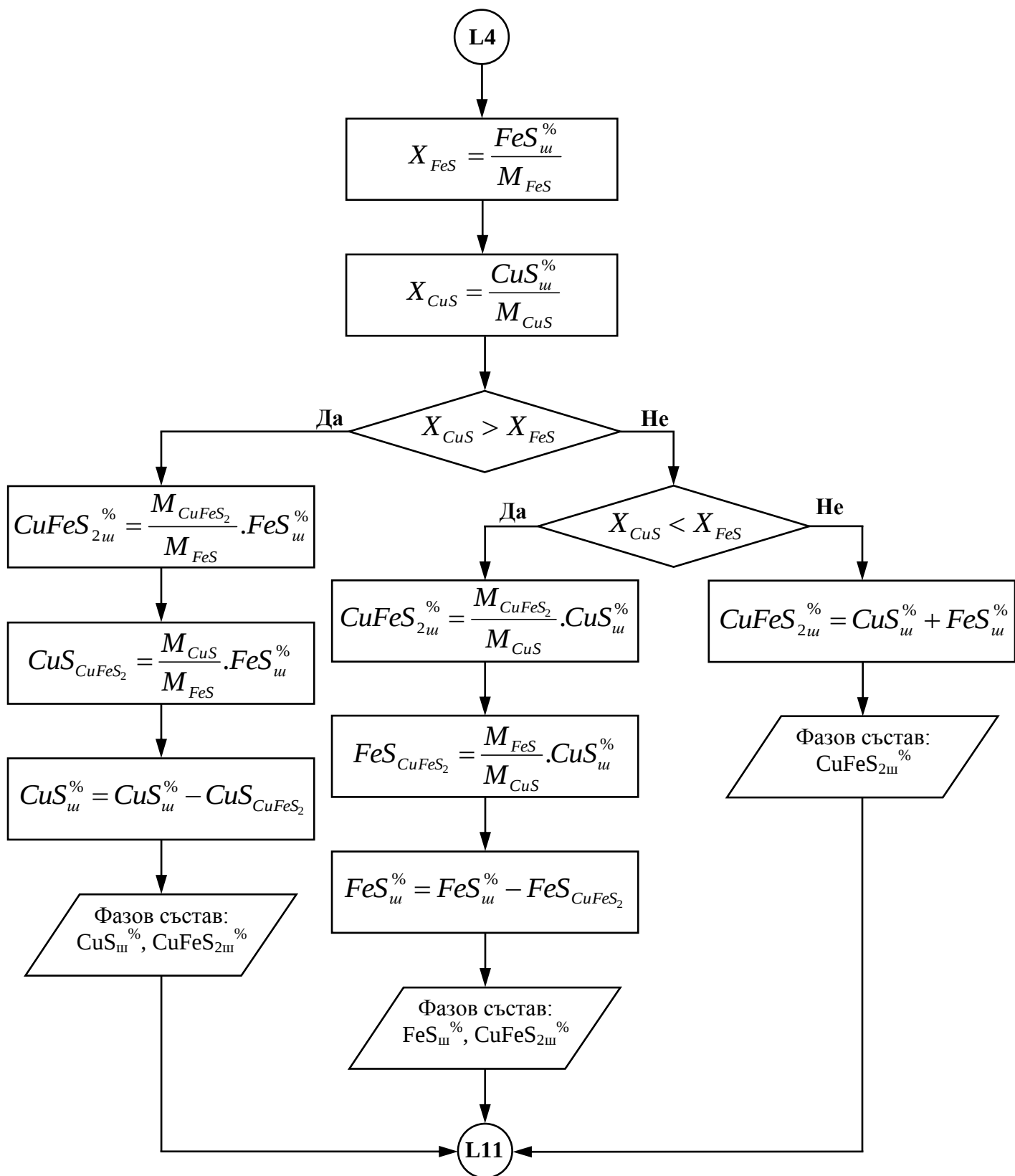
В пещта за факелно топене за сулфидни медни концентрати протича правотоков процес. Това позволява реакционната шахта и отстойната зона да се разглеждат последователно, както по отношение на материалния баланс, така и по отношение на топлинния баланс.

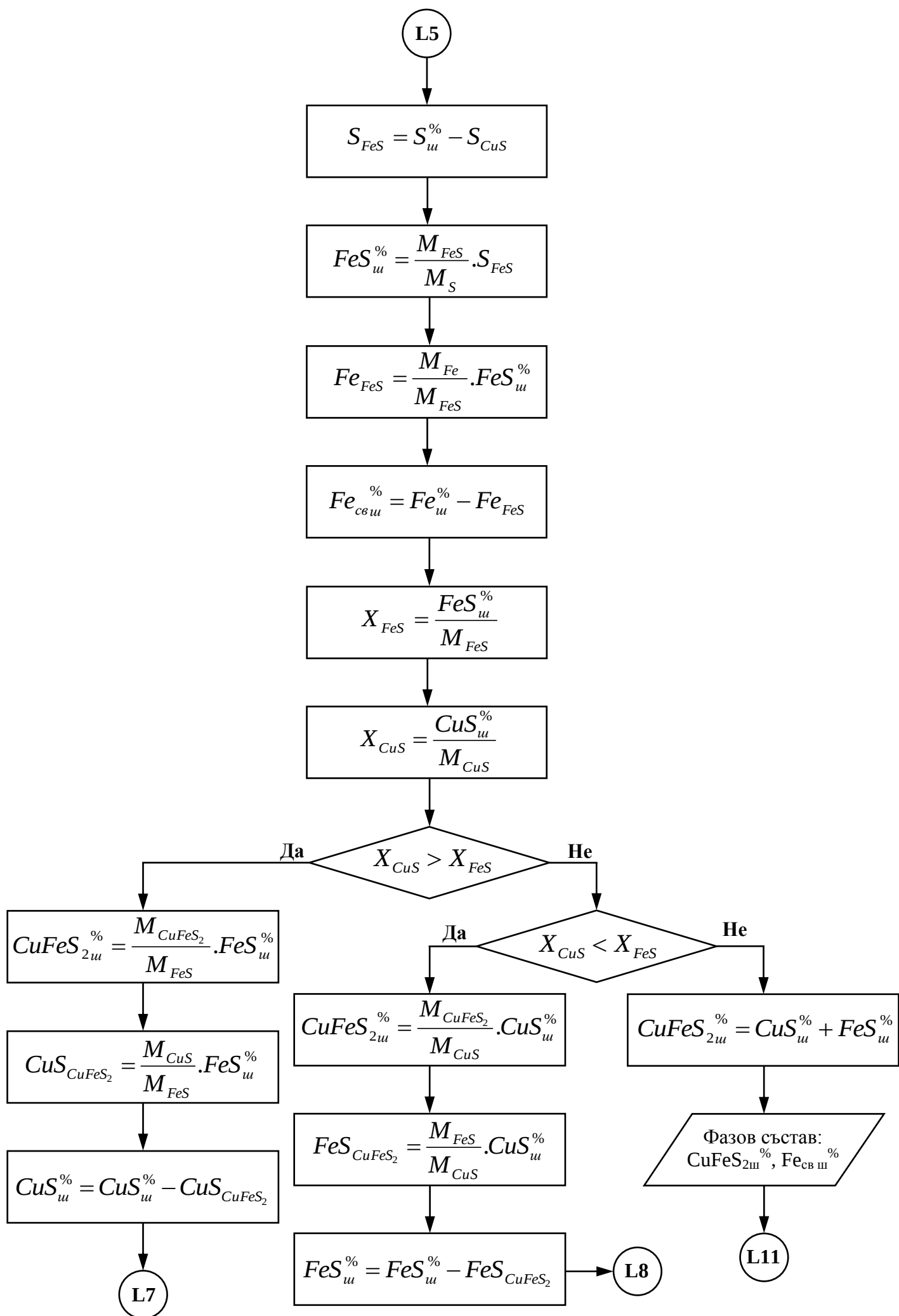
В реакционната шахта протичат основните физикохимични и топлофизични процеси, които имат определена технологична роля.

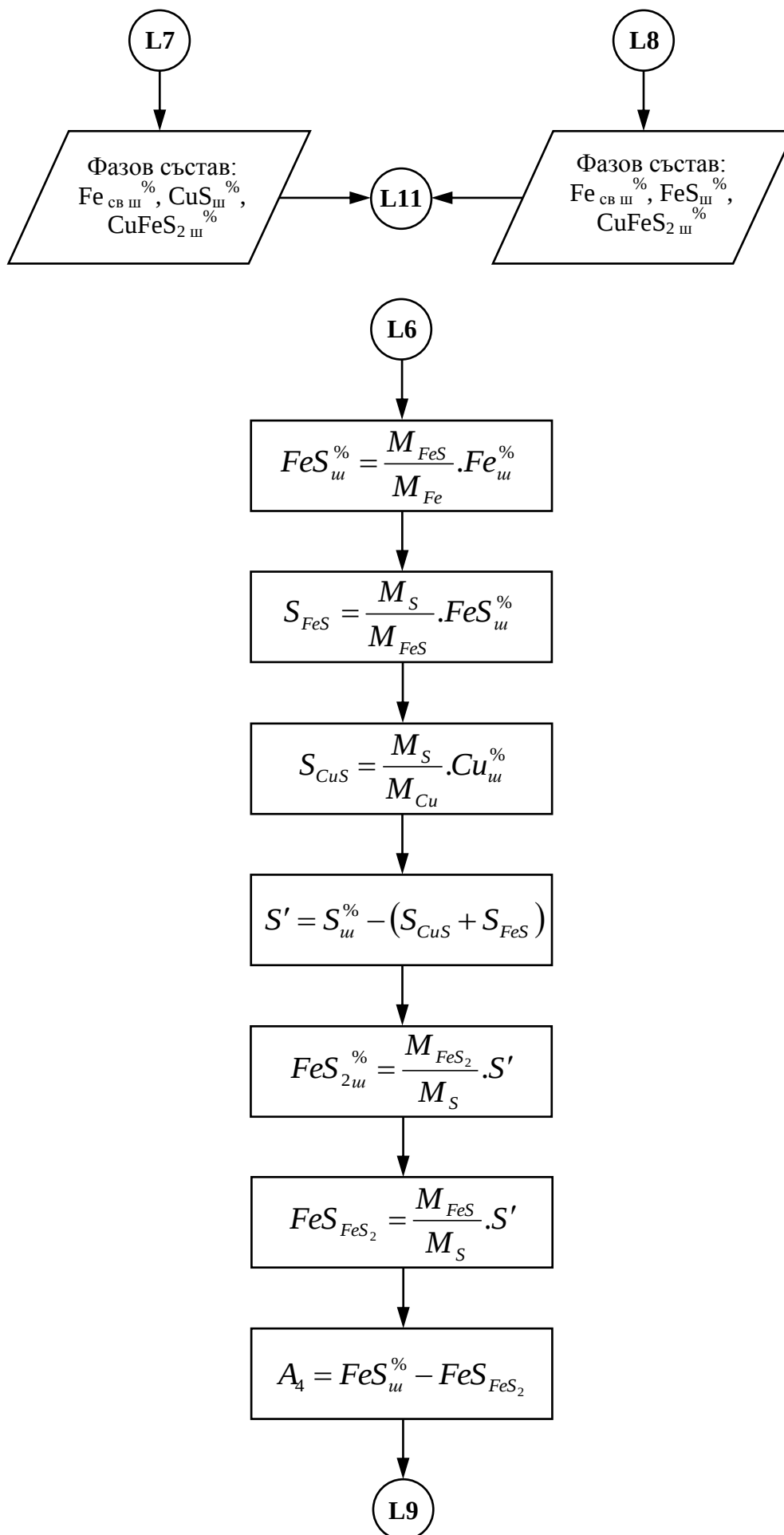


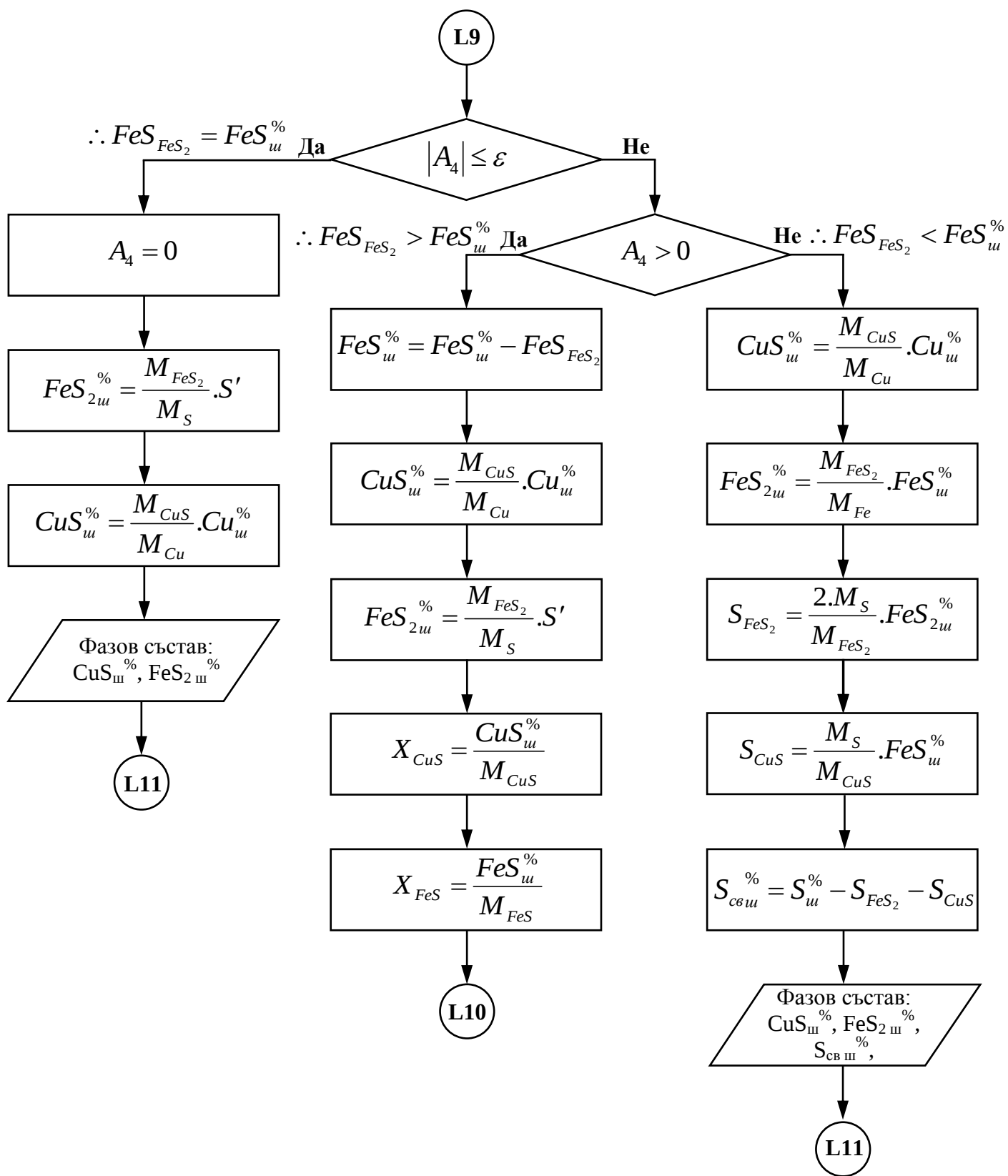


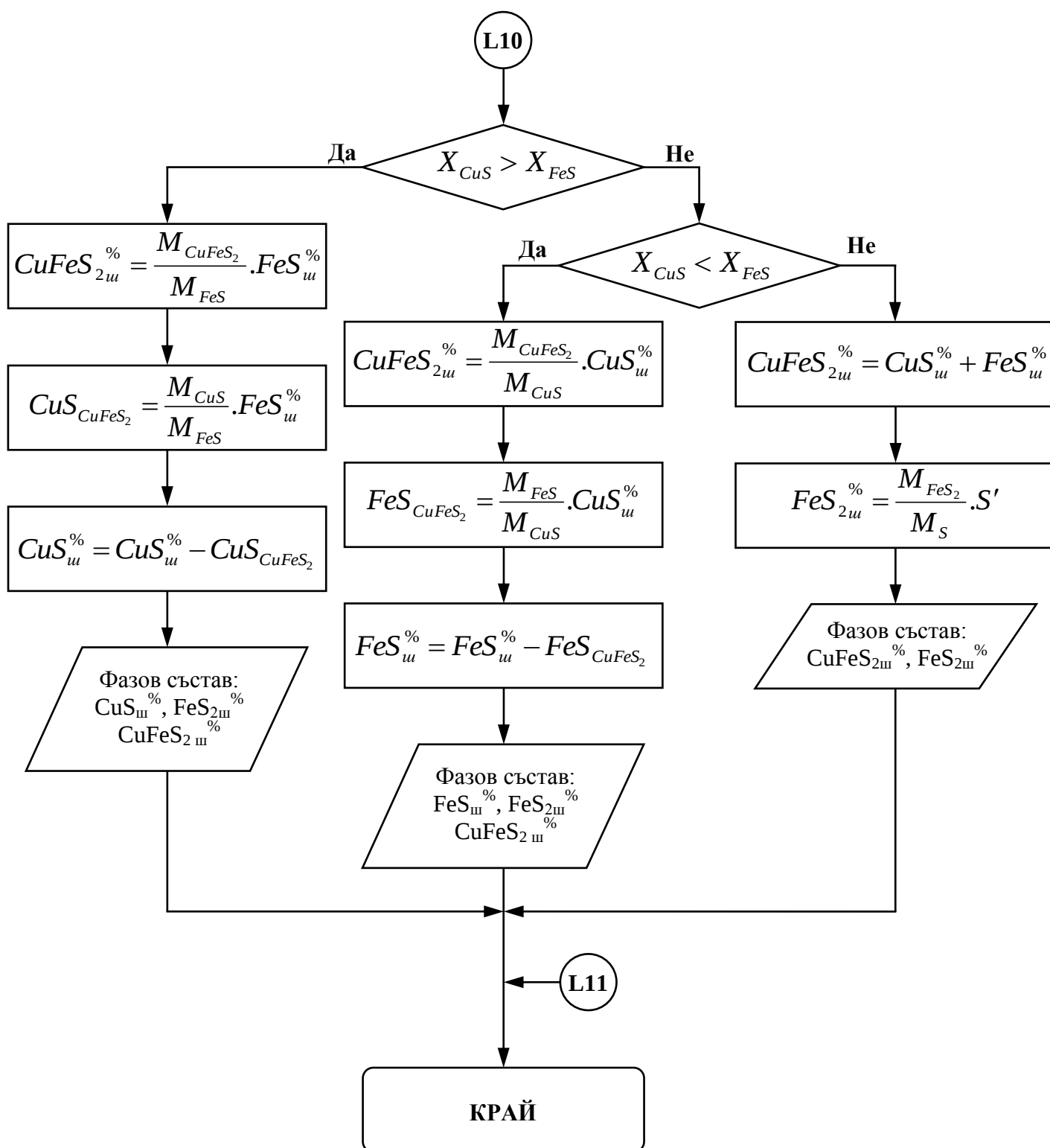












Фиг. 2.2. Блок-схема на математичен модел за определяне на фазовия състав на сулфидни концентрати и шихти, преработвани в технологичен факел

В остойната зона основната част от кондензираните фази, напускащи реакционната шахта попадат в течна вана, където протичат процеси на формиране и разделяне на медния шейн от шлаковата фаза. Медният шейн се състои от Cu_2S , FeS и Fe_3O_4 . Шлаките съдържат следните основни компоненти $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, Fe_3O_4 , Cu_2S и други оксиди. Газовата фаза и стопилката са свързани чрез протичащите химични реакции и топлофизични процеси. До напускането на технологичните газове, протичат процесите на отделяне на твърди и течни частици от тях. Напускащите пещния агрегат оборотни прахове съдържат Cu_2O , Cu_2S , FeO , Fe_3O_4 , As_2O_3 , SiO_2 и други.

След изчисляване количеството на металната стопилка, отделената сяра в резултат на реакциите на дисоциация на висшите сулфиди е необходимо да се изчисли количеството кислород необходимо за окислителните реакции.

Балансът на газовата фаза се основава на изчисляване на необходимото количество кислород за протичане на окислителните реакции в реакционната шахта на пещта за факелно топене на сулфидни медни концентрати. За съставяне на баланса на газовата фаза е необходимо да се определи и количеството на SO_2 в изходящите технологични газове в съответствие с окислителните реакции.

Общия материален баланс включва всички входящи и изходящи компоненти изразени като тона от даденото вещество за единица време, t/h.

Приходната част на материалния баланс:

- Процентни съдържания на съответните компоненти в шихтата:

$$\text{CuS}_{\text{ш}}^{\%}, \text{Cu}_2\text{S}_{\text{ш}}^{\%}, \text{CuFeS}_{2\text{ш}}^{\%}, \text{FeS}_{\text{ш}}^{\%}, \text{FeS}_{2\text{ш}}^{\%}, \text{Cu}_{\text{сб}}^{\%}, \text{Fe}_{\text{сб}}^{\%}, \text{S}_{\text{сб}}^{\%};$$

- Количества на съответните материални потоци:

$$G, \text{SiO}_{2\text{add}}, G_{\text{O}_2}^{\text{in}}, G_{\text{N}_2}^{\text{in}} \text{ и } G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{in}}, \text{ t/h};$$

Разходната част на материалния баланс:

- Количества на съответните материални потоци:

$$M_{\text{ш}}, M_{\text{шл}}, G_{\text{SO}_2}^{\text{out}}, G_{\text{N}_2}^{\text{out}}, G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{out}}, \text{ t/h}.$$

За правилното съставяне на топлинния баланс е необходимо да се познава конструкцията на съответния агрегат и протичащия в него технологичен процес.

За процесите, протичащи при топенето в „технологичен факел” главен източник на топлина са преработваните шихти. Отделяната при окислителните реакции топлина се изразходва за нагриване и топене на шихтата, нагриване на течните и газообразните продукти на топенето и за компенсиране на топлинните загуби на пещта.

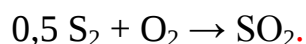
Топлинният баланс на пещта за факелно топене характеризира не само топлинната работа на агрегата, но позволява да се определят условията за автогенност на процеса и изходните параметри на газоохладящите съоръжения.

Топлинният режим се регулира чрез обогатяването на технологичният въздух с кислород и подаване на допълнително количество въздух при необходимост, така че температурата на напускащите продукти да бъде 1300°C.

Баланса се съставя на базата на равенство между приходната и разходната част, което е задължително условие за устойчивото протичане на процеса. Енергийният баланс се изготвя въз основа на материалния баланс. Топлинните ефекти на образуване на участващите в процеса съединения и топлосъдържанията им са взети от литературни данни.

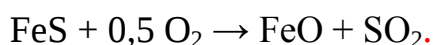
Окисляване на елементарната сяра, отделяща се при дисоциацията на висшите сулфиди:

Количеството топлина от изгарянето на елементарната сяра при средна температура на процеса 1300 °C е 324,90 kJ/mol за реакцията:

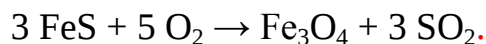


Окисляване на железния сулфид:

Количеството топлина за реакцията е 73,0 kJ/mol O₂



Реакцията на оксидиране на железния сулфид до магнетит е съпроводена с по-голям топлинен ефект: 81,0 kJ/mol O₂



При високи температури (1500 – 1600 °C) оксидирането на железния сулфид до железен оксид е по-възможно от колкото до магнетит, в изчислението на материалния баланс се приема, че 1/3 от железния сулфид се окислява до магнетит, а останалата до железен оксид.

Топлинния баланс може да бъде разделен на две части, топлинен баланс на реакционната шахта и топлинен баланс на остойната зона.

В реакционната шахта уравнението на топлинния баланс има следния вид:

$$Q_I + Q_{ш} + Q_{O_2} + Q'_{прах} + Q'_{гор} = Q'_{изх.газ} + Q'_{стоп} + Q''_{прах} + Q'_{заг}, \quad \text{MJ/h} \quad (2.1)$$

В остойната зона уравнението на топлинния баланс има следния вид:

$$Q'_{изх.газ} + Q'_{стоп} + Q''_{прах} + Q'_{изл} + Q'_{гор} + Q_{FeO.SiO_2} + Q''_{гор} = Q''_{изх.газ} + Q''_{стоп} + Q'''_{прах} + Q''_{заг}, \quad \text{MJ/h} \quad (2.2)$$

3. Анализ на резултатите от изследването на математичния модел чрез виртуални експерименти

3.1. Планиране на виртуалните (числените) експерименти

В много случаи от инженерната практика аналитичните и технико-икономическите математични модели се получават сложни, изискват много изчисления и отнемат много време за решаването им. Голямото предимство на такива модели е, че те са „точни” модели, защото са създадени на основата на физико-химични зависимости, които са универсални. Използването на такива модели за оперативно управление в реално време силно се затруднява от тежката изчислителна процедура и времето за намиране на решение, което е по-голямо от необходимото време за вземане на бързо решение за конкретната производствена ситуация. Особено за автоматизираните системи за управление, това е много важно, тъй като се налага бърза промяна на заданията на управляващите параметри, които могат да се намерят при

решаване на математичния модел за новата ситуация. Това важи и за предложения от нас математичен модел в Глава III на дисертацията. При такива ситуации се препоръчват така наречените апроксимационни модели ("short cut" models, "tailored" models). Такива модели могат да се получат като експериментално – статистически (регресионни) модели на базата на числени данни получени от аналитичния модел и апроксимирани до желаната точност с регресионен модел. Областта на изменение на входящите (управляващите) параметри за „числените експерименти“ се избира в практически значимата област на конкретния процес.

Представени са апроксимационни математични модели, числени данни и графични резултати от проведените виртуални планирани експерименти по предложения в Глава III аналитичен математичен модел. Апроксимационните модели са от регресионен тип и тяхната адекватност е оценена по известните статистически критерии. Предложените в настоящата дисертация експериментални планове за изследване на ограничена практическа област са плановите на Мак-Лийн и Андерсен.

На базата на експертен опит и по литературни данни са определени три възможни гранични изменения на основните компоненти в шихтата - Cu, Fe и S. Основните показатели, които са изследвани са количество получен щейн (Y_1 , t/h) и количество на образуваната шлака (Y_2 , t/h). При провеждането на виртуалните експерименти са въведени някои опростявания, които не се отразяват върху резултатите от изследванията и коректността на проведените експерименти. Те се свеждат до следното:

Процентното съдържание на SiO_2 по време на експериментите се запазва постоянно ($\text{SiO}_{2\text{ш}}\% = 6,00 \text{ mas. \%}$).

Във фазовия състав (X_i) - Cu, Fe и S съставляват 90 mas. %, всички останали компоненти на шихтата, с изключение на горе-споменатия се групират под формата на „Други“ = 4 mas. %.

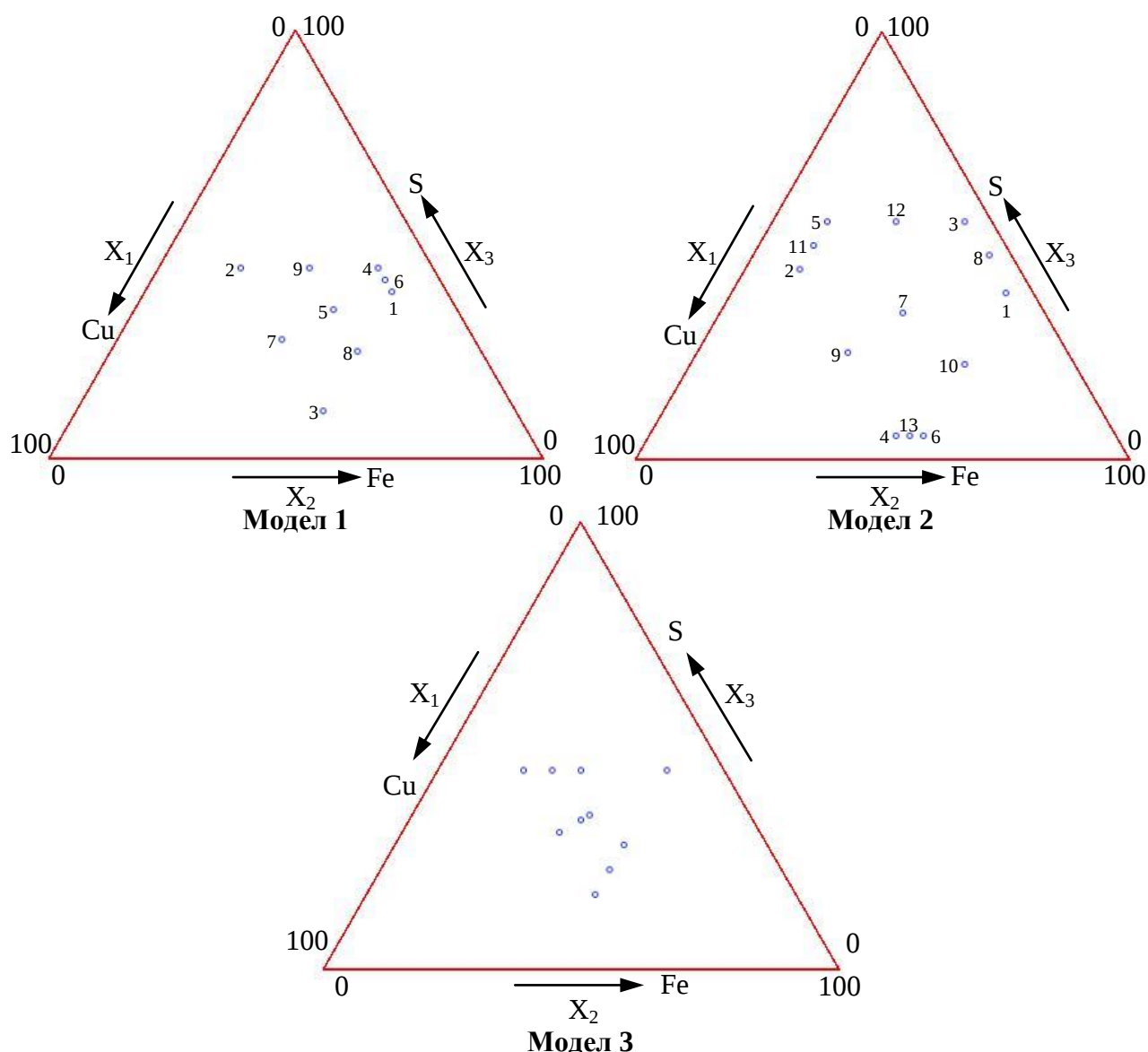
По долу са описани трите възможни плана за провеждане на виртуалните експерименти.

(а) $10 \leq \text{Cu} \leq 35 \text{ mas.}\%$
 $15 \leq \text{Fe} \leq 45 \text{ mas.}\%$
 $10 \leq \text{S} \leq 40 \text{ mas.}\%$
(Модел 1)

(б) $5 \leq \text{Cu} \leq 40 \text{ mas.}\%$
 $10 \leq \text{Fe} \leq 50 \text{ mas.}\%$
 $5 \leq \text{S} \leq 50 \text{ mas.}\%$
(Модел 2)

(в) $10 \leq \text{Cu} \leq 35 \text{ mas.}\%$
 $15 \leq \text{Fe} \leq 40 \text{ mas.}\%$
 $15 \leq \text{S} \leq 40 \text{ mas.}\%$
(Модел 3)

Съставени са три плана на Мак-Лийн и Андерсен за трите комбинации от различни гранични стойности на компонентите, описани по-горе (фиг. 3.1.). За Модел 3 планът на Мак-Лийн и Андерсен е модифициран с допълнителни точки в практически интересната област на съставите. След провеждане на числени експерименти по плановете, данните са обработени по метода на регресионния анализ.



Фиг. 3.1. Графично разположение на точките за Модел 1, Модел 2 и Модел 3

За получаване на апроксимационни модели, един от най-използваните полиноми за описване на изследваните зависимости е следният:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (3.1)$$

В дисертационната работа са изследвани различни възможни описания на „експерименталните“ данни. От изследваните различни видове регресионни модели е установено, че най добро описание се получава с регресионно уравнение от вида:

$$Y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (3.2)$$

3.2. Извеждане на апроксимационни регресионни модели

За извеждане и статистическия анализ на регресионните модели, които апроксимират данните от виртуалните експерименти е използван програмния продукт QstatLab. v.5.

3.2.1. Регресионни модели за План № 1

(а) Регресионно уравнение за получения щейн (Y_1)

$$Y_1 = 1.2083156x_1 - 0.278361x_2 - 0.907446x_3 + 0.00102x_1x_2 + 0.0232562x_2x_3 + 0.0277845x_1x_3$$

Табл. 3.1. Изчислени и предсказани по модела стойности за Y_1 (щейн, t/h)

№	Y_1 експ.	Y_1 изч.	Y_1 експ. - Y_1 изч.
1.	13.9378	14.6083	-0.6706
2.	55.1218	55.2053	-0.0835
3.	42.1632	42.4864	-0.3231
4.	14.1500	13.3825	0.7675
5.	34.2645	35.4515	-1.1870
6.	14.0439	14.1408	-0.0969
7.	54.4851	54.0785	0.4066
8.	33.8931	32.8887	1.0044
9.	34.6359	34.4532	0.1827
Средна абсолютна грешка за щейн = 0.5247 t/h			

Статистическите характеристики на апроксимационния модел за Y_1 (щейн) при $\alpha = 0.05$ са: $F_{\text{tabl}}(0.05, 5, 3) = 9.01346 < F_{\text{изч}} = 335.95635$.

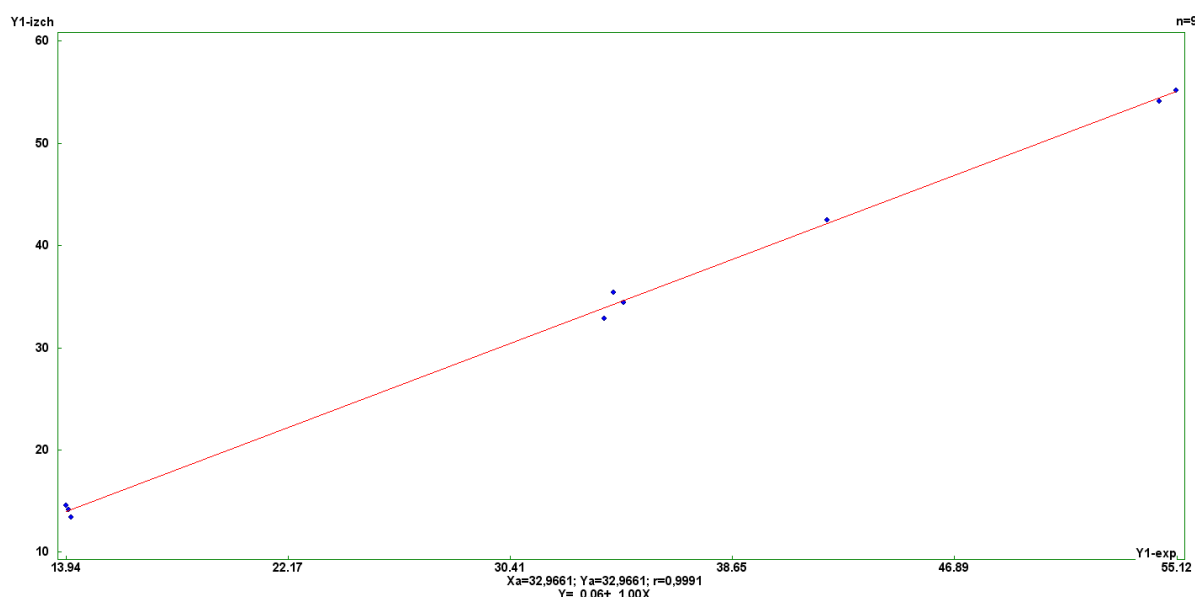
Изчислената стойност на критерия на Фишер $F_{\text{изч}} = 335.95635$ е по-голяма от табличната стойност, което показва добра апроксимация.

Коефициентът на множествена корелация е висок и значим $R^2 = 0.99822$, което също показва много добра апроксимация.

Средната абсолютна грешка на **Модел 1** за щейн (Y_1) е **0.5247 t/h**.

Съответствието между изчислените стойности на Y_1 (щейн) по аналитичния модел ($Y_{1\text{експ.}}$) и по апроксимационния ($Y_{1\text{изч.}}$) са дадени на

фиг.3.2. На фигурата са дадени и статистическите характеристики, които потвърждават добрата апроксимация между „опитно” и „изчислено” за Y_1 (шейн).



Фиг. 3.2. Съответствие между „опитно” и „изчислено” за Y_1 (шейн) по План №1 ($Y_{1\text{експ. ср.}} = 32.9661$; $Y_{1\text{изч. ср.}} = 32.9661$; $R = 0.9991$; $Y_{1\text{изч.}} = 0.0567 + 0.9982Y_{1\text{експ.}}$.)

(б) Регресионно уравнение за Y_2 (шлака)

$$Y_2 = 0.3202852x_1 + 2.310249x_2 + 1.432696x_3 - 0.0062668x_1x_2 - 0.037963x_2x_3 - 0.0407528x_1x_3$$

Табл. 3.2. Изчислени и предсказани по модела стойности за Y_2 (шлака, t/h)

№	Y_2 експ.	Y_2 изч.	Y_2 експ. – Y_2 изч.
1.	81.2805	80.4332	0.8473
2.	20.2272	20.0498	0.1775
3.	88.7674	88.2811	0.4863
4.	72.3665	73.3720	-1.0055
5.	60.8918	58.9541	1.9377
6.	76.8235	76.6653	0.1582
7.	44.9600	45.6237	-0.6637
8.	76.4913	77.9895	-1.4982
9.	45.2922	45.7317	-0.4395
Средна абсолютна грешка за шлака = 0.8015 t/h			

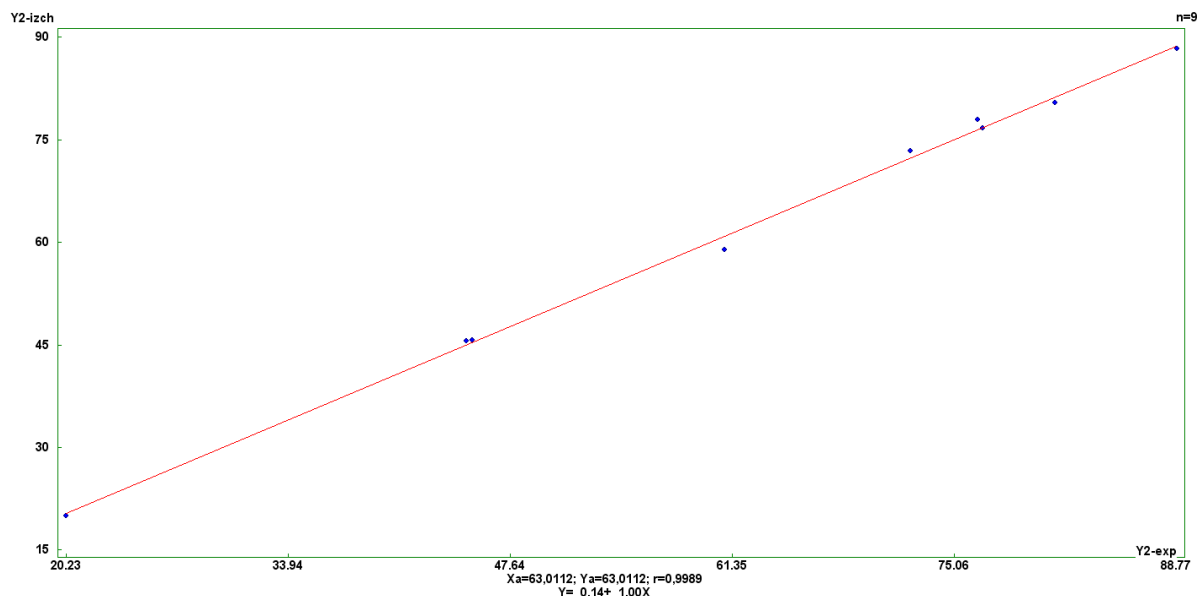
Статистическите характеристики на апроксимационния модел за Y_2 (шлака) при $\alpha = 0.05$ са: $F_{\text{табл}}(0.05, 5, 3) = 9.01346 < F_{\text{изч}} = 271.97395$.

Изчислената стойност на критерия на Фишер $F_{\text{изч}} = 271.97395$ е по-голям от табличната стойност, което показва добра апроксимация.

Коефициентът на множествена корелация е висок и значим $R^2 = 0.99780$, което също показва много добра апроксимация.

Средната абсолютна грешка на **Модел 1** за шлаката (Y_2) е **0.8015 t/h**.

Съответствието между изчислените стойности на Y_2 (шлака) по аналитичния модел ($Y_{2\text{експ.}}$) и по апроксимационния ($Y_{2\text{изч.}}$) са дадени на фиг. 3.3.



Фиг. 3.3. Съответствие между „опитно” и „изчислено” за Y_2 (шлака) по План № 1 ($Y_{2\text{експ. ср.}} = 63.0112$; $Y_{2\text{изч. ср.}} = 63.0112$; $R = 0.9989$; $Y_{2\text{изч.}} = 0.1387 + 0.9978Y_{2\text{експ.}}$)

3.2.2. Регресионни модели за План № 2

(а) Регресионно уравнение за Y_1 (щейн)

$$Y_1 = 1.02899x_1 - 0.34697915x_2 - 0.5456387x_3 + 0.00754044x_1x_2 + 0.01828791x_2x_3 + 0.02349546x_1x_3$$

Табл. 3.3. Изчислени и предсказани по модела стойности за Y_1 (щейн, t/h)

№	Y_1 експ.	Y_1 изч.	Y_1 експ. - Y_1 изч.
1.	5.7434	6.7019	-0.9585
2.	63.3162	63.7913	-0.4752
3.	6.3801	4.9198	1.4603
4.	43.6736	45.2044	-1.5308
5.	47.3519	46.7710	0.5809
6.	38.5347	37.8173	0.7174
7.	6.0618	6.8395	-0.7778
8.	62.5733	60.0985	2.4748
9.	29.6898	27.5461	2.1437
10.	55.3340	55.8686	-0.5345
11.	26.8660	27.0236	-0.1576
12.	41.1041	41.5580	-0.4538
13.	39.7097	42.1986	-2.4889
Средна абсолютна грешка за щейн = 1.1349 t/h			

Статистическите характеристики на апроксимационния модел за щейна

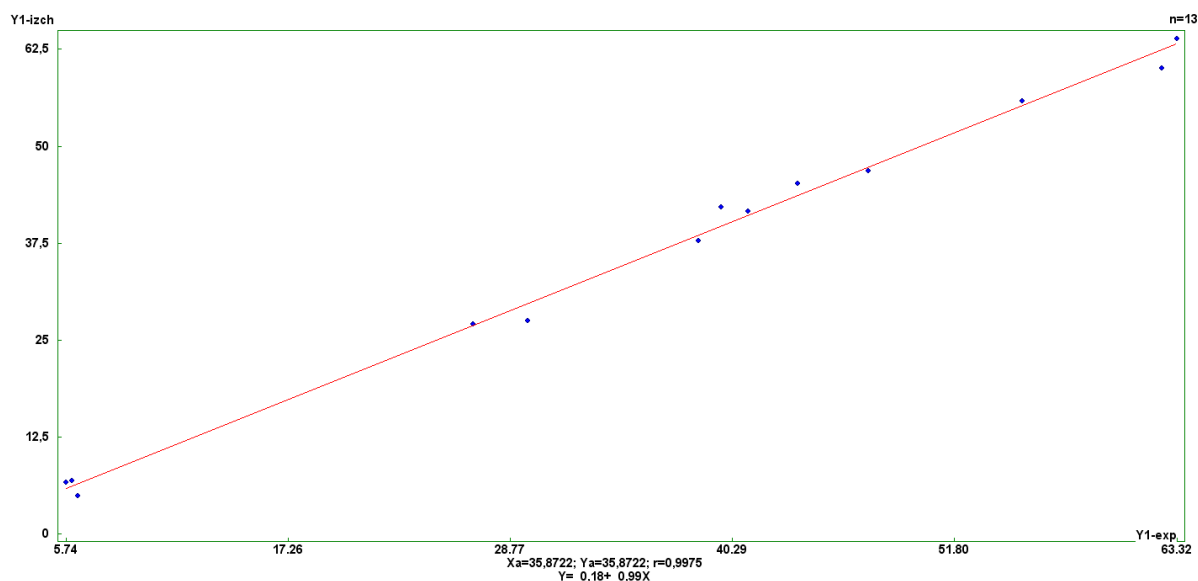
Y_1 при $\alpha = 0.05$ са: $F_{\text{табл}}(0.05, 5, 4) = 3.97152 < F_{\text{изч}} = 276.9195$.

Изчислената стойност на критерия на Фишер $F_{\text{изч}} = 276.9195$ е по-голям от табличната стойност, което показва добра апроксимация.

Коефициентът на множествена корелация е висок и значим $R^2 = 0.99497$.

Средната абсолютна грешка на **Модел 2** за Y_1 (щейн) е **1.1349 t/h**.

Съответствието между изчислените стойности на Y_1 (щейн) по аналитичния модел ($Y_{1\text{експ.}}$) и по апроксимационния ($Y_{1\text{изч.}}$) и статистическите характеристики са дадени на фиг. 3.4.



Фиг. 3.4. Съответствие между „опитно” и „изчислено” за Y_1 (щейн) по План № 2 ($Y_{1\text{експ.ср.}} = 52.8722$; $Y_{1\text{изч. ср.}} = 52.8722$; $R = 0.9975$; $Y_{1\text{изч.}} = 0.180 + 0.995Y_{1\text{експ.}}$)

(б) Регресионно уравнение за Y_2 (шлака)

$$Y_2 = 0.42038079x_1 + 2.3380658x_2 + 0.71694356x_3 - 0.01519034236x_1x_2 - 0.025236x_2x_3 - 0.0259377x_1x_3$$

Табл. 3.4. Изчислени и предсказани по модела стойности за Y_2 (шлака, t/h)

№	Y_2 експ.	Y_2 изч.	Y_2 експ. – Y_2 изч.
1.	92.1102	91.5985	0.5117
2.	12.0518	11.2028	0.8490
3.	65.3682	66.4756	-1.1074
4.	88.4263	87.4047	1.0216
5.	14.9441	15.7576	-0.8135
6.	97.6874	97.7701	-0.0827
7.	78.7392	77.6176	1.1217
8.	38.5873	41.5752	-2.9879
9.	86.3631	88.8484	-2.4852
10.	13.4980	12.8317	0.6662
11.	38.2939	38.7431	-0.4492
12.	93.0569	92.4925	0.5644
13.	54.4148	51.2234	3.1913
Средна абсолютна грешка = 1.2194 t/h			

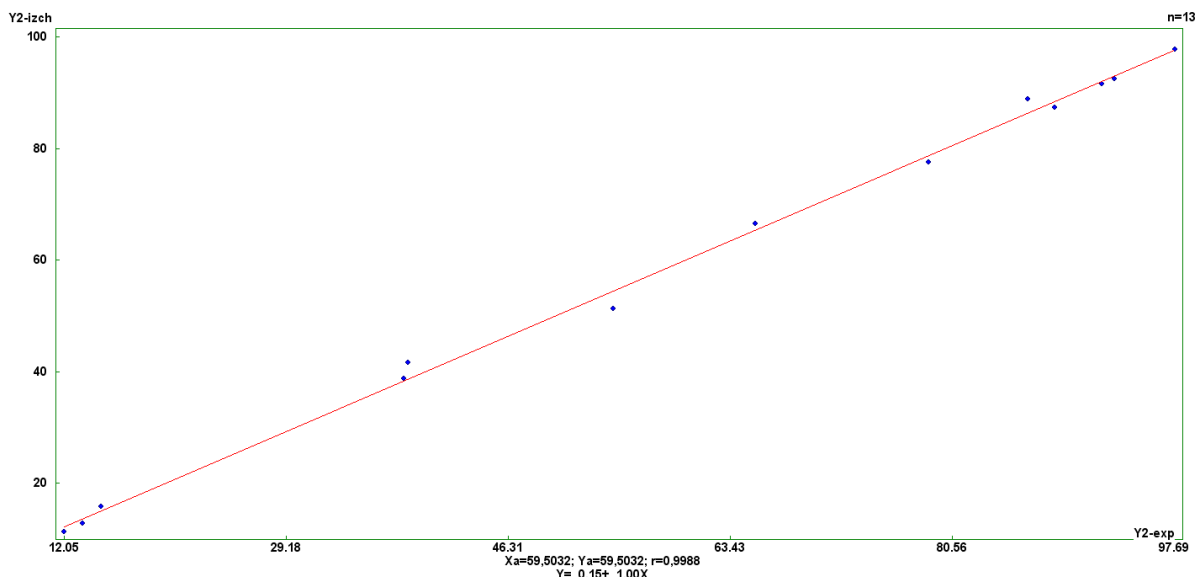
Статистическите характеристики на апроксимационния модел за шлаката Y_2 при $\alpha = 0.05$ са: $F_{\text{tabl}}(0.05, 5, 4) = 6.25606 < F_{\text{izch}} = 572.11787$.

Изчислената стойност на критерия на Фишер $F_{\text{izch}} = 572.11787$ е по-голям от табличната стойност, което показва добра апроксимация.

Коефициентът на множествена корелация е висок и значим $R^2 = 0.99756$.

Средната абсолютна грешка на **Модел 2** за шлаката (Y_2) е **1.2194 t/h**.

Съответствието между изчислените стойности на Y_2 (шлака) по аналитичния модел ($Y_{2\text{експ.}}$) и по апроксимационния ($Y_{2\text{изч.}}$) са дадени на фиг. 3.5.



Фиг. 3.5. Съответствие между „опитно” и „изчислено” за Y_2 (шлака) по План № 2 ($Y_{2\text{експ. ср.}} = 59.5032$; $Y_{2\text{изч. ср.}} = 59.5032$; $R = 0.999$; $Y_{2\text{изч.}} = 0.1452 + 0.99756Y_{2\text{експ.}}$)

3.2.3. Регресионни модели за План № 3

(а) Регресионно уравнение за Y_1 (шлака)

$$Y_1 = 0.75966x_1 + 0.10358x_2 - 1.36395x_3 - 0.00518x_1x_2 + 0.024326x_2x_3 + 0.050024x_1x_3$$

Табл. 3.5. Изчислени и предсказани по модела стойности за Y_1 (щейн, t/h)

№	Y_1 експ.	Y_1 изч.	Y_1 експ. - Y_1 изч.
1.	14.1500	14.0403	0.1097
2.	46.0785	42.9128	3.1657
3.	46.9274	46.6843	0.2432
4.	55.1218	55.4928	-0.3710
5.	42.3379	43.8779	-1.5400
6.	43.2677	44.5003	-1.2326
7.	46.5030	47.2311	-0.7281
8.	54.5912	53.4862	1.1050

9.	38.0964	39.4464	-1.3501
10.	38.7331	38.1348	0.5983
Средна абсолютна грешка за щейн = 1.0447 t/h			

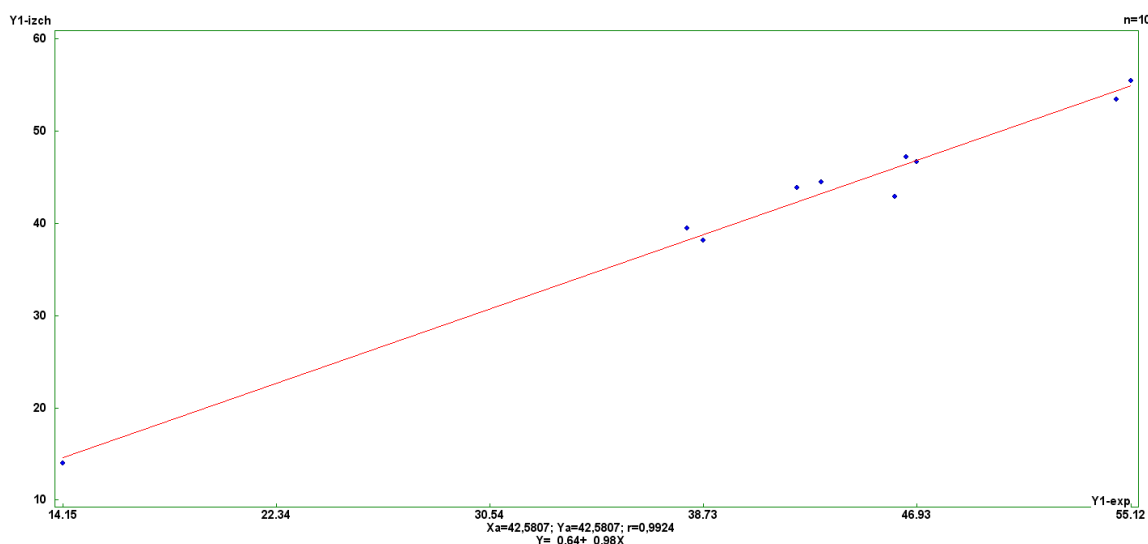
Статистическите характеристики на апроксимационния модел за щейна Y_1 при $\alpha = 0.05$ са: $F_{\text{tabl}}(0.05, 5, 4) = 6.25606 < F_{\text{изч}} = 52.01199$.

Изчислената стойност на критерия на Фишер $F_{\text{изч}} = 52.01199$ е по-голям от табличната стойност, което показва добра апроксимация.

Коефициентът на множествена апроксимация е висок и значим $R^2 = 0.98485$.

Средната абсолютна грешка на **Модел 3** за щейн (Y_1) е 1.0447 t/h.

Съответствието между изчислените стойности на щейн Y_1 по аналитичния модел ($Y_{1\text{експ.}}$) и по апроксимационния ($Y_{1\text{изч.}}$) и статистическите характеристики са дадени на фиг. 3.6.



Фиг. 3.6. Съответствие между „опитно“ и „изчислено“ за Y_1 (щейн) по План № 3 ($Y_{1\text{експ. ср.}} = 42.5807$; $Y_{1\text{изч. ср.}} = 42.5807$; $R = 0.9924$; $Y_{1\text{изч.}} = 0.6449 + 0.9848Y_{1\text{експ.}}$)

(б) Регресионно уравнение за Y_2 (шлака)

$$Y_2 = 1.003298x_1 + 1.861x_2 + 1.9682x_3 - 0.0012x_1x_2 - 0.03879x_2x_3 - 0.0703x_1x_3$$

Табл. 3.6. Изчислени и предсказаните по модела стойности за Y_2 (шлака, t/h)

№	Y_2 експ.	Y_2 изч.	Y_2 експ. – Y_2 изч.
1.	72.3665	72.5414	-0.1749
2.	64.7037	69.2505	-4.5468
3.	29.0477	29.9363	-0.8886
4.	20.2272	19.4353	0.7919
5.	79.4705	77.2153	2.2552
6.	49.4248	47.4594	1.9654

7.	46.8757	45.7147	1.1610
8.	40.5030	42.2649	-1.7619
9.	66.6194	64.8007	1.8187
10.	39.8774	40.4974	-0.6200
Средна абсолютна грешка за шлаката = 1.59844 t/h			

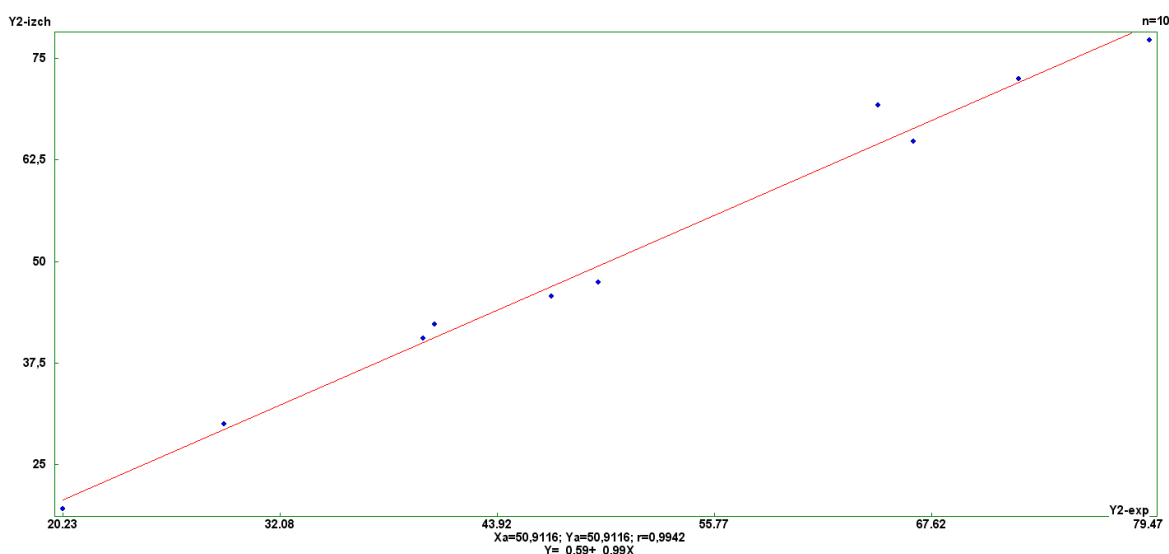
Статистическите характеристики на апроксимационния модел за шлаката Y_2 при $\alpha = 0.05$ са: $F_{\text{tabl}}(0.05, 5, 4) = 6.25606 < F_{\text{izch}} = 68.17712$.

Изчислената стойност на критерия на Фишер $F_{\text{izch}} = \mathbf{68.17712}$ е по-голям от табличната стойност, което показва добра апроксимация.

Коефициентът на множествена корелация е висок и значим $R^2 = \mathbf{0.98840}$;

Средна абсолютна грешка на **Модел 3** за шлака (Y_2) е **1.59844** t/h.

Съответствието между изчислените стойности на шлаката Y_2 по аналитичния модел ($Y_{2\text{експ.}}$) и по апроксимационния ($Y_{2\text{изч.}}$) са дадени на фиг. 3.7. На фигурата са дадени и статистическите характеристики, които потвърждават добрата апроксимация между „опитно” и „изчислено” за Y_2 .



Фиг. 3.7. Съответствие между „опитно” и „изчислено” за Y_2 (шлака) по План № 3 ($Y_{2\text{експ. ср.}} = 50.9116$; $Y_{2\text{изч. ср.}} = 50.9116$; $R = 0.9942$; $Y_{2\text{изч.}} = 0.59 + 0.9884Y_{2\text{експ.}}$)

3.3. Сравнителен анализ на резултатите по изследваните планове

Табл. 3.8. Средна абсолютна грешка Δ_{cp} на изследваните модели

Модел 1 (План № 1)		Модел 2 (План № 2)		Модел 3 (План № 3)	
Y_1 , щейн, t/h	Y_2 , шлака, t/h	Y_1 , щейн, t/h	Y_2 , шлака, t/h	Y_1 , щейн, t/h	Y_2 , шлака, t/h
0.5247	0.8015	1.1349	1.2194	1.0447	1.5984

Ако приемем като показател за приемлива точност на апроксимационния модел средната абсолютна грешка Δ_{cp} между стойностите на аналитичния модел и стойностите получени по апроксимационния модел за Y_1 (щейн) и за Y_2 (шлака), от Табл. 3.8 се вижда, че **Модел 1**, получен по „експериментален” План No 1 на Мак-Лийн и Андерсен, показва най-малка грешка Δ_{cp} в интервала на $10 \leq Cu \leq 35 \text{ mas. \%}$, $15 \leq Fe \leq 45 \text{ mas. \%}$ и $10 \leq S \leq 40 \text{ mas. \%}$.

За **Модел 2** (План № 2) средните абсолютни грешки Δ_{cp} са около 2 пъти по големи от тези за Модел 1, но и областта на изследване е по-голяма.

3.4. Определяне на оптималния фазов състав за щейн

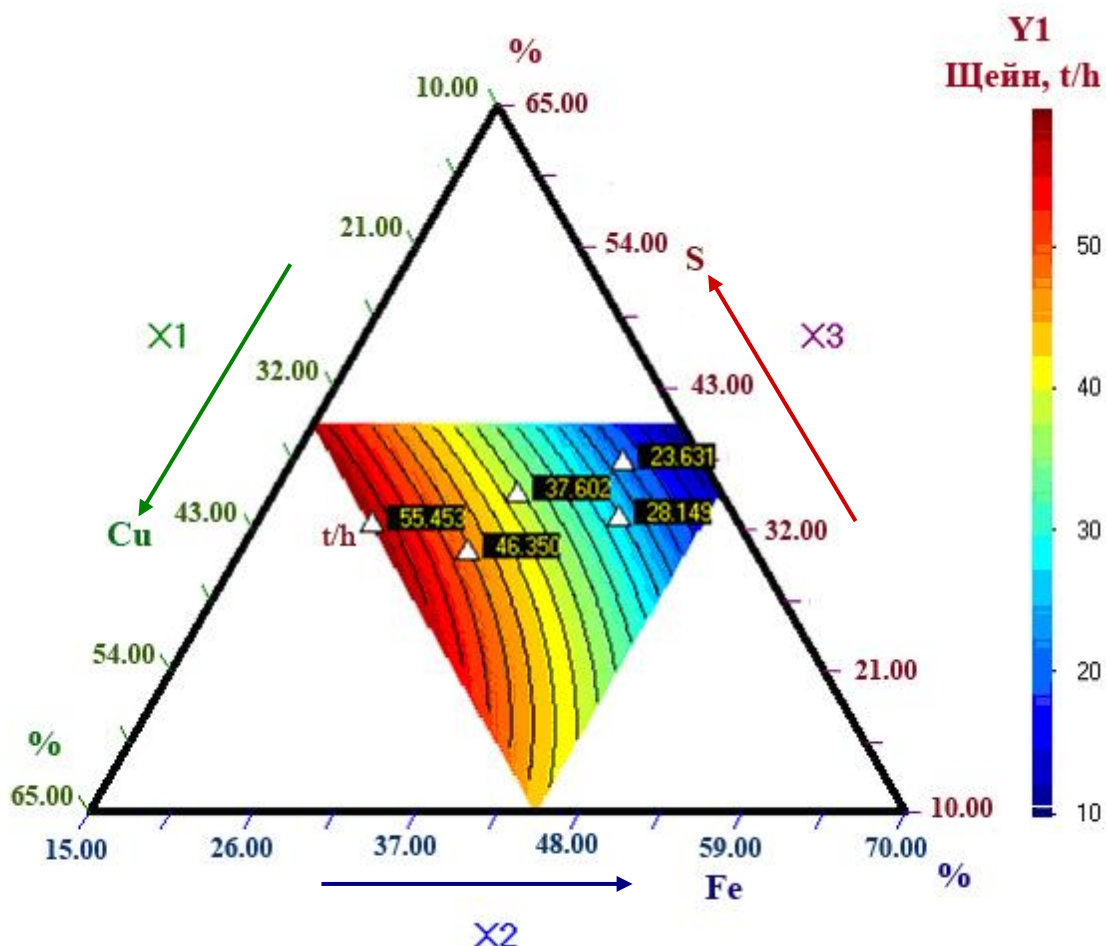
С програмния пакет QStatLab, по апроксимационния математичен **Модел 1** е намерен следният оптимален фазов състав:

$$X_1^* (Cu^*) = 35.00 \%; \quad X_2^* (Fe^*) = 22.50 \%; \quad X_3^* (S^*) = 32.50 \%.$$

При този оптимален състав е получена максималната стойност за щейн:

$$Y_{1\max} = 55.95 \text{ t/h}.$$

На фиг. 3.8. са представени линиите на постоянни стойности за щейн (Y_1) изчислени по апроксимационния **Модел 1** в допустимата област определена от плана на Мак - Лийн и Андерсен.



Фиг. 3.8. Линии на постоянни стойности за щейн (Y_1), изчислени по апроксимационния **Модел 1** в допустимата област

3.5. Определяне на оптималния фазов състав за шлага

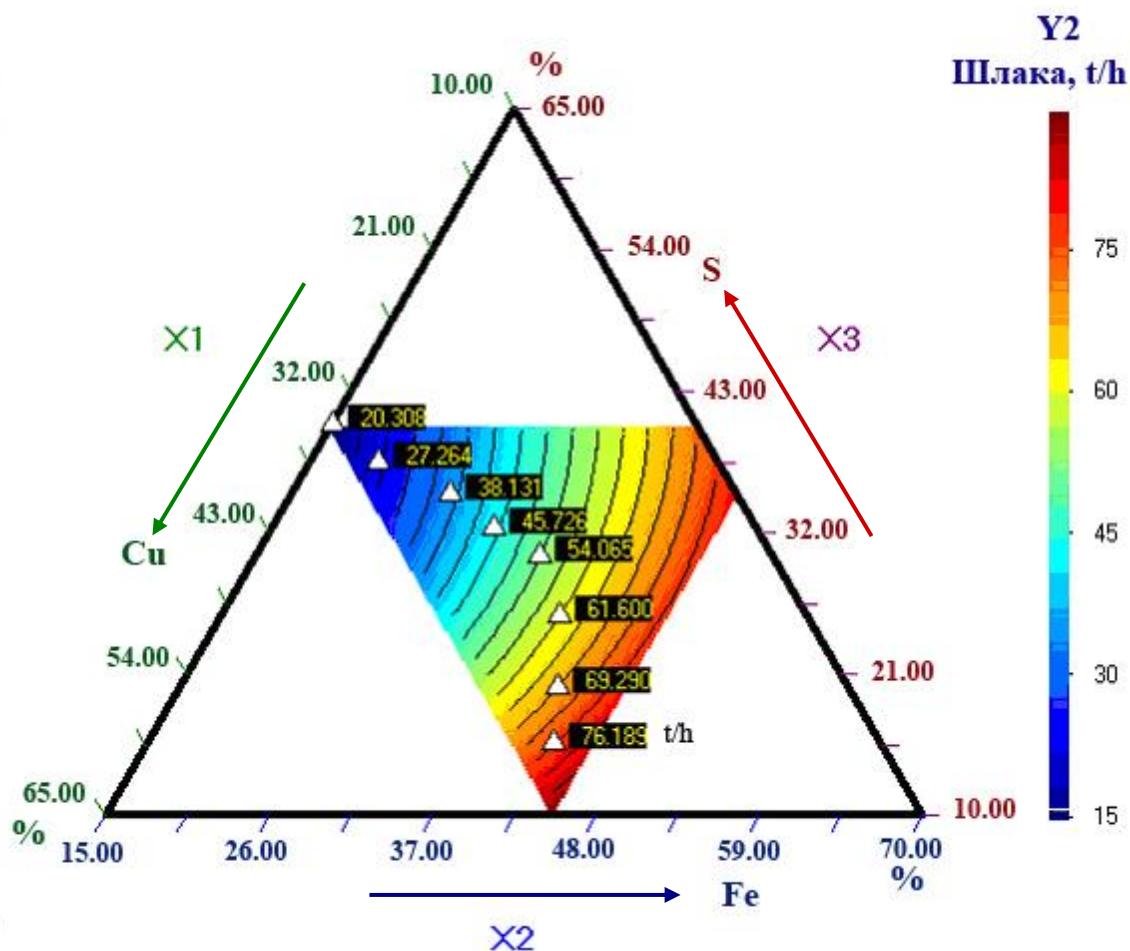
По апроксимационния математичен **Модел 1**, с програмния пакет QStatLab е намерен оптималния фазов състав за шлага:

$$X_1^* (\text{Cu}^*) = 35.00 \% ; \quad X_2^* (\text{Fe}^*) = 15.00 \% ; \quad X_3^* (\text{S}^*) = 40.00 \%$$

При този оптимален състав е получена минимална стойност за шлага:

$Y_{2\min} = 20.05 \text{ t/h}$. На фиг. 3.9 са представени линиите на постоянни стойности за щейн (Y_1) изчислени по апроксимационния **Модел 1** в допустимата област определена от плана на Мак - Лийн и Андерсен.

От получените оптимални фазови състави за щейн и за шлага, както и от фиг. 3.8 фиг. 3.9. се вижда, че за оптималното управление на процесите е необходимо търсене на компромисни решения.



Фиг. 3.9. Линии на постоянни стойности за шлака (Y_2), изчислени по апроксимационния Модел 1 в допустимата област

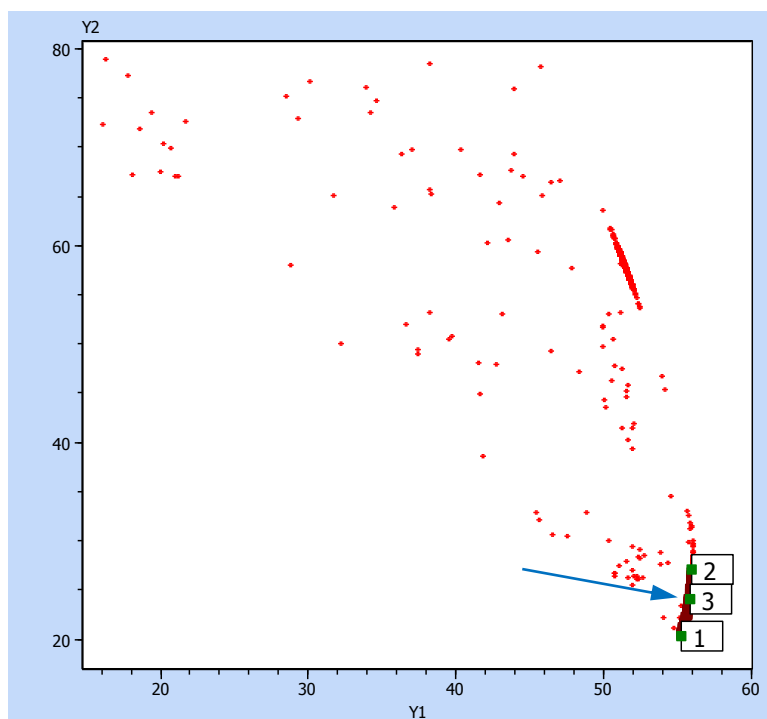
3.6. Определяне на Парето – оптимална област на фазовия състав

От направената оптимизация в т. 3.5 и от фиг. 3.8 и фиг. 3.9 се вижда, че при тази двуцелева, задача за управление на фазовите състави, желаните стойности за щейн, на който се търси максимум и за шлака, на която се търси минимум, оптималните фазови състави не съвпадат. За намиране на множество от възможни компромисни решения е използвана оптимизационна програма с генетичен алгоритъм на QstatLab. Намерено е множество от 10 Парето-оптимални (компромисни) решения за фазовите състави Cu, Fe и S (%) за целевите показатели щейн (Y_1) и шлака (Y_2). Резултатите са дадени в Табл. 3.9.

Табл. 3.9. Парето-оптимални решения за фазовите състави и съответстващите целевите показатели щейн (Y_1) и шлага (Y_2)

Решение №	X_1 , Cu	X_2 , Fe	X_3 , S	Y_1 , щейн	Y_2 , шлага
-	%	%	%	t/h	t/h
1.	35.00	15.50	39.50	55.3277	20.5868
2.	35.00	17.50	37.50	55.7494	23.1695
3.	35.00	17.20	37.80	55.6904	22.6977
4.	35.00	18.80	36.20	55.9100	24.9189
5.	35.00	19.50	35.50	55.9655	25.9159
6.	35.00	15.30	39.70	55.2795	20.3679
7.	35.00	15.80	39.20	55.3994	20.9322
8.	35.00	16.30	38.70	55.5221	21.5918
9.	35.00	16.70	38.30	55.5970	22.0486
10.	35.00	18.20	36.80	55.8466	24.1122

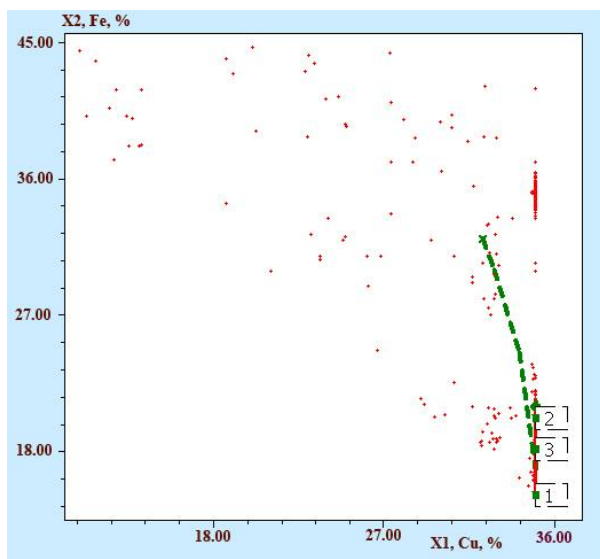
Намереният Парето-фронт на компромисните решения за целевите показатели щейн и шлага е даден на фиг. 3.10. За илюстрация, са селектирани три компромисни решения (1), (2) и (3) от Парето-фронта. Съответстващите им състави за Cu, Fe и S (%) са дадени на Табл. 3.10 и на фиг. 3.11, фиг. 3.12 и фиг. 3.13.



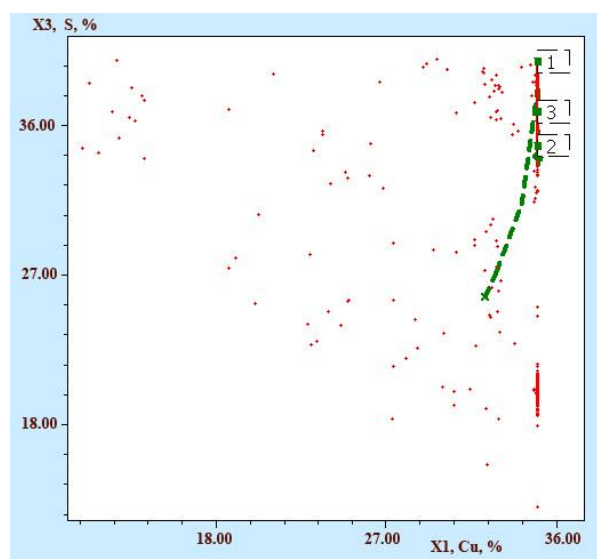
Фиг. 3.10. Парето - оптимален фронт за Y_1 (штейн) и Y_2 (шлага) и селектирани три компромисни решения (1), (2) и (3)

Табл. 3.10. Примерни Парето-оптимални решения от Фиг. 10

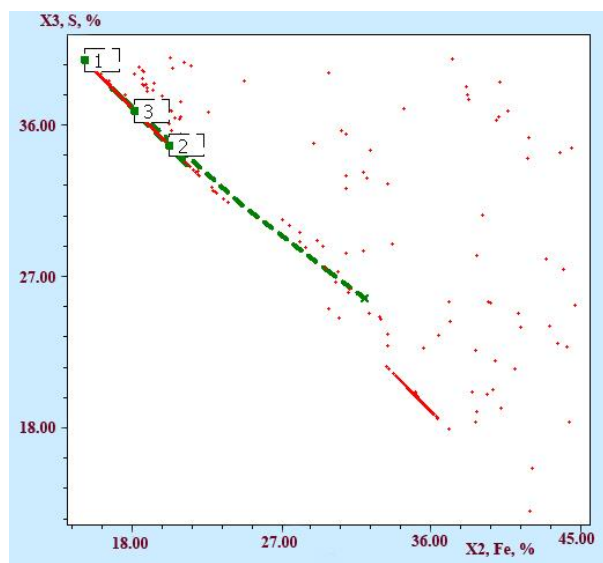
Решения	X_1 , Cu	X_2 , Fe	X_3 , S	Y_1 , щейн	Y_2 , шлака
	%	%	%	t/h	t/h
Решение (1)	35.00	15.13	40.00	55.24	20,20
Решение (2)	35.00	20.21	34.80	56.00	26,98
Решение (3)	35.00	19.00	36.83	55,84	24,03



Фиг. 3.11. Състави на X_1 (Cu) и X_2 (Fe) за селектираните решения (1), (2) и (3)



Фиг. 3.12. Състави на X_1 (Cu) и X_3 (S) за селектираните решения (1), (2) и (3)



Фиг. 3.13. Състави на X_2 (Fe) и X_3 (S) за селектираните решения (1), (2) и (3)

С предложените и реализирани в дисертационния труд математични модели може да се решат поставени бъдещи задачи за търсене на компромисни оптимални решения (Парето-оптимални решения) в зависимост от зададени приоритети на целите, наличните неопределености и поставени за решаване проблеми за устойчиво развитие в комбиниранта система на технологиите, опазването на околната среда и икономическите индикатори за устойчивост.

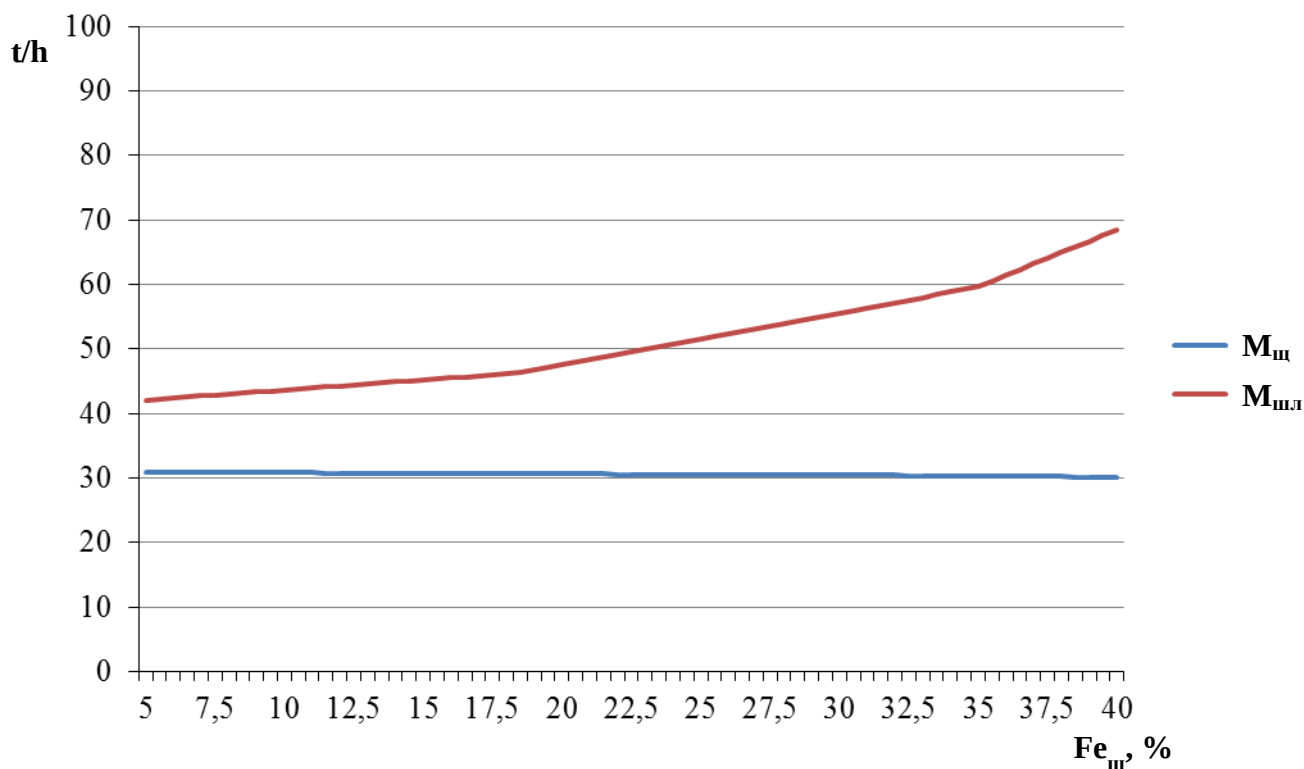
3.7. Определяне влиянието на основните компоненти на шихтовите материали върху количеството на получаваната шлака

Въз основа на получените резултати за практическа приложимост на математичния модел, реализиран програмно, са направени изчисления за определяне на влиянието на състава на шихтовите материали, подложени на високо температурно третиране във факелна топилна пещ, върху количеството на образуващата се отпадъчна шлакова фаза.

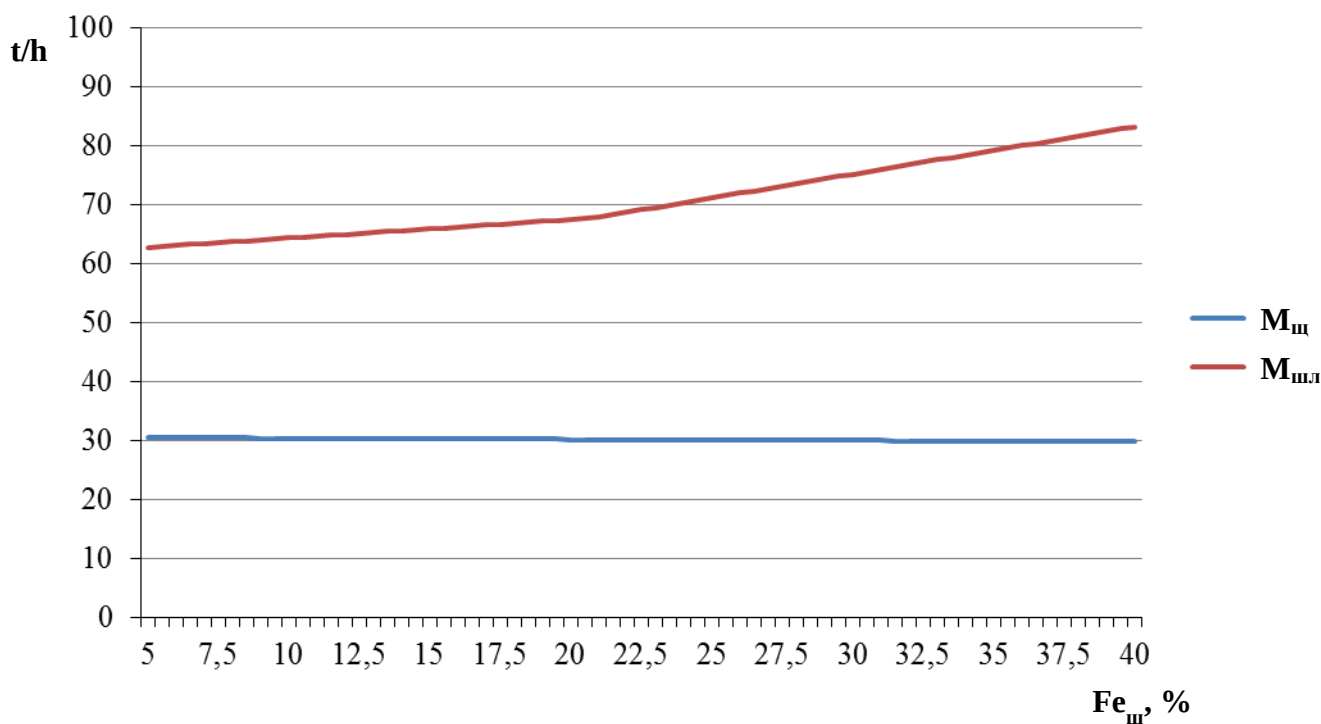
Тъй като съдържанието на Fe в шихтовите материали оказва най-съществено влияние върху масата на основния отпадък от топилния процес, първата серия от балансови изчисления бяха направени при променливо съдържание на желязо ($\text{Fe}_{\text{ш}}\%$) и постоянни концентрации на мед ($\text{Cu}_{\text{ш}}\%$) и сяра ($\text{S}_{\text{ш}}\%$) във входящия материален поток. Резултатите от изчисленията са обобщени в таблици от табл. IV.21 до табл. IV.26, дадени в приложение към дисертацията. Въз основа на данни от тези таблици са построени графични зависимости на масовите потоци на шлака ($M_{\text{шл}}, \text{t/h}$) и щейн ($M_{\text{щ}}, \text{t/h}$) от изменението на концентрацията на желязо в изходните материали. Съставените графични зависимости при различни постоянни съдържания на мед и сяра са представени на фигури (от фиг. 3.14 до фиг. 3.19).

Характерно за всички разглеждани случаи е, че с повишаване на концентрацията на желязо в шихтата, масовият поток на отпадъчната шлака $M_{\text{шл}}$ нараства линейно. В най-голяма степен $M_{\text{шл}}$ нараства с повишаване на $\text{Fe}_{\text{ш}}\%$ при $\text{Cu}_{\text{ш}}\% = 25\%$ и $\text{S}_{\text{ш}}\% = 35\%$ (3.16) и при $\text{Cu}_{\text{ш}}\% = 30\%$ и $\text{S}_{\text{ш}}\% = 10\%$

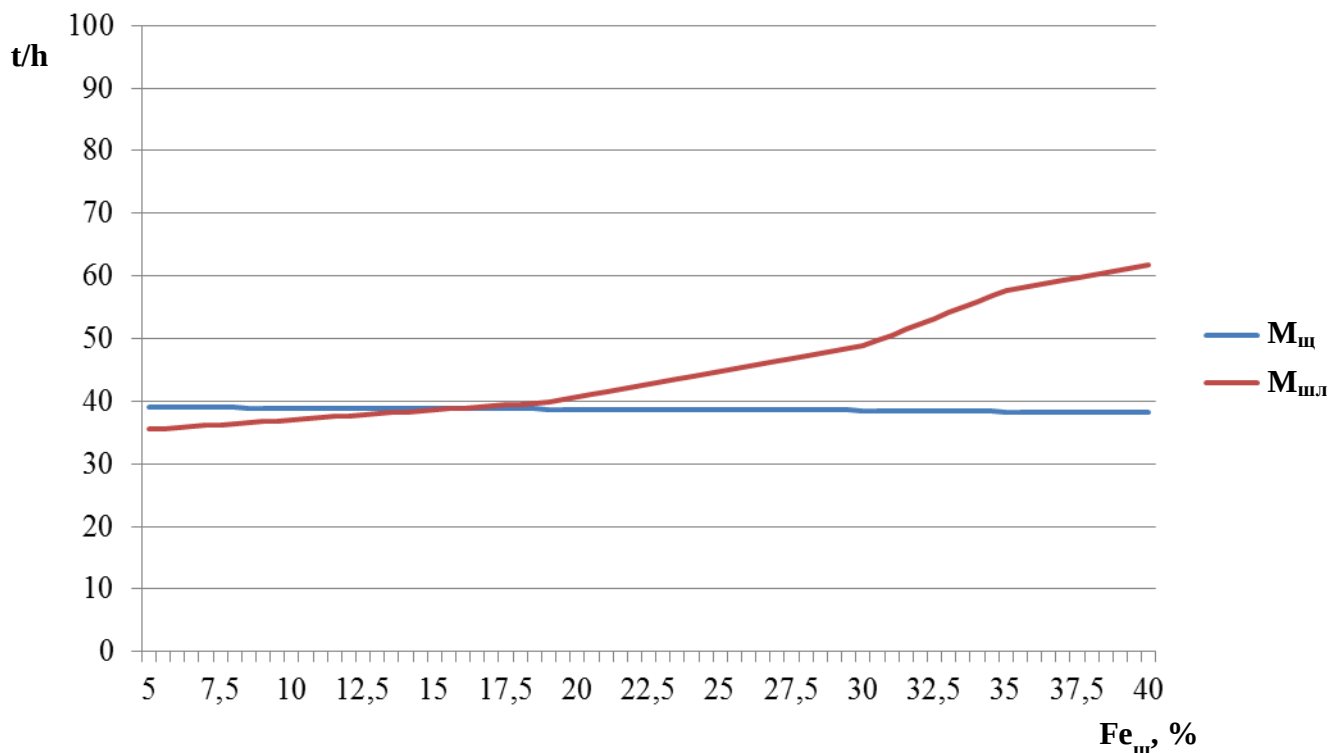
(фиг. 3.19). В първия случай нарастването е с над 26 t/h, а във втория случай е с над 27 t/h.



Фиг. 3.14. Изменение на $M_{шл}$ и $M_{ш}$ при промяна на съдържанието на $Fe_{ш}^{\%}$ в шихтата при $Cu_{ш}^{\%} = 20 \text{ mas.}\%$, $S_{ш}^{\%} = 35^{\%} \text{ mas.}\%$



Фиг. 3.15. Изменение на $M_{шл}$ и $M_{ш}$ при промяна на съдържанието на $Fe_{ш}^{\%}$ в шихтата при $Cu_{ш}^{\%} = 20 \text{ mas.}\%$, $S_{ш}^{\%} = 15 \text{ mas.}\%$



Фиг. 3.16. Изменение на $M_{шл}$ и $M_{щ}$ при промяна на съдържанието на $Fe_{ш}$ в шихтата при $Cu_{ш} = 25 \text{ mas.}\%$, $S_{ш} = 35 \text{ mas.}\%$

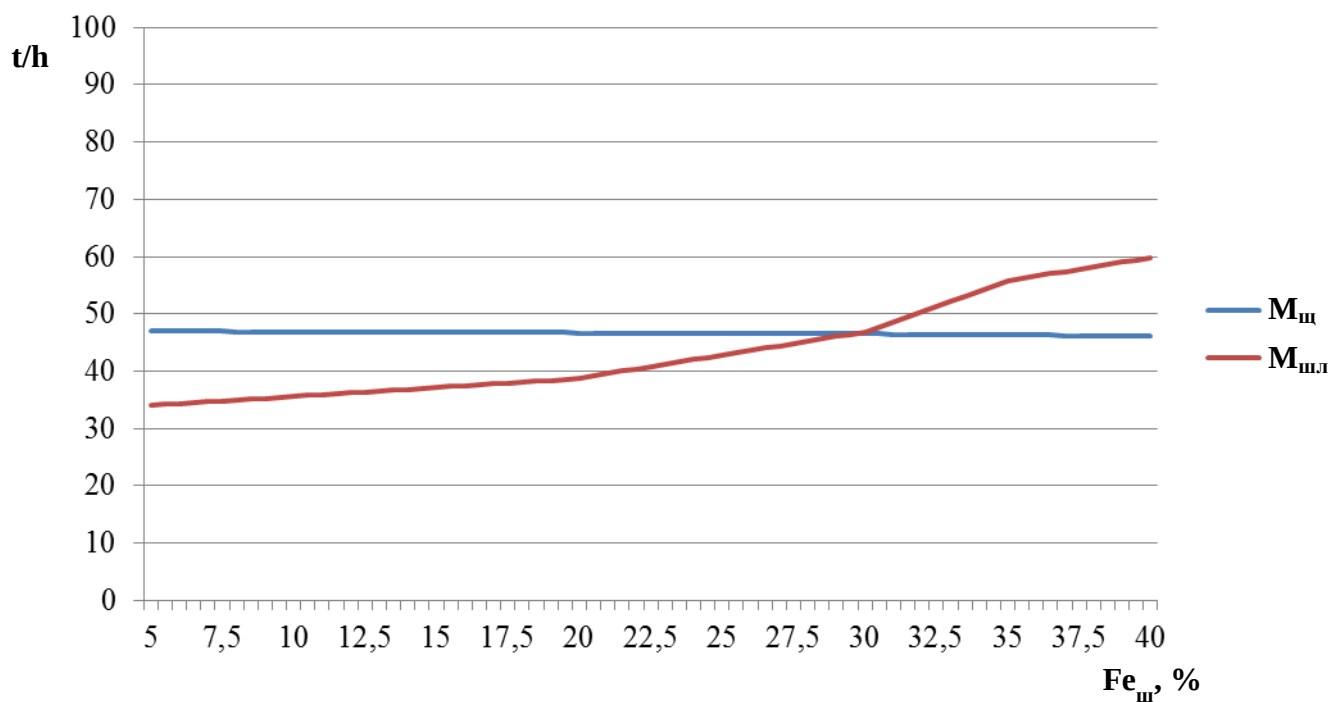
На всички графични зависимости определящи изменението на $M_{шл}$ в зависимост от $Fe_{ш}^{\%}$ се наблюдават промени в ъгловия коефициент на правите, отразяващи тази функционална зависимост. Първоначално нарастването на $M_{шл}$ е пропорционално на нарастването на $Fe_{ш}^{\%}$, при което част от желязото участва във формирането на щейна като FeS , а друга част от него се оксидира и формира шлакова стопилка като $2FeO \cdot SiO_2$ и Fe_3O_4 . При постоянна концентрация на медта в шихтата и в щейна (63 mas.% Cu), след определена стойност на $Fe_{ш}^{\%}$, цялото количество желязо, което се добавя започва да преминава в шлаковия отпадък като $2FeO \cdot SiO_2$ и Fe_3O_4 . Това е свързано с добавяне на допълнителни количества $SiO_{2\text{доп}}$. При състав на шихтата при който се появява термодинамична необходимост от допълнително количество кварцов флюс, масовият поток на шлаката започва да нараства по-интензивно, което е свързано с промяна на ъгловия коефициент на графичната зависимост.

На фиг. 3.14, фиг. 3.16 и фиг. 3.17 се установява втора промяна в ъгловия коефициент при висока концентрация на желязо в шихтата. Тази промяна на ъгловия коефициент се дължи на значително увеличаване на количеството на $\text{SiO}_{2\text{доп}}$ необходимо за формиране на основния компонент на шлаковата фаза ($2\text{FeO}.\text{SiO}_2$).

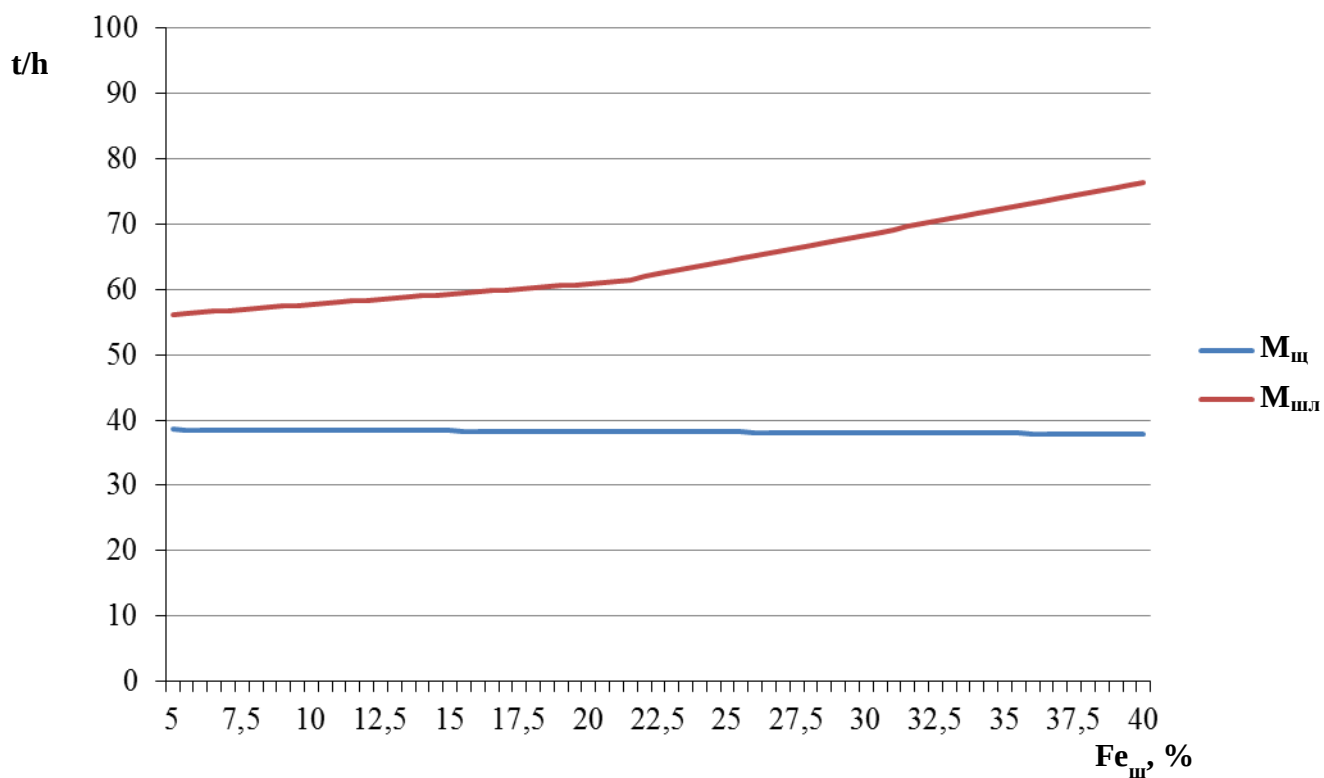
При всички експериментални пресмятания масовите количества на $M_{\text{щ}}$, t/h, остават практически постоянни величини при променливо съдържание на желязо в шихтата и постоянни концентрации на мед и сяра. Това е напълно естествено, като се има предвид, че $M_{\text{щ}}$ зависи единствено от $\text{Cu}_{\text{щ}}\%$ при приемане на постоянна концентрация на мед в шейна ($\text{Cu}_{\text{щ}}\% = 63\%$).

По-внимателния анализ на табличните данни и графичните зависимости показва, че в действителност $M_{\text{щ}}$ намалява незначително своя масов поток с повишаване на стойността на $\text{Fe}_{\text{щ}}\%$ и съответно на количеството на шлаката $M_{\text{шл}}$. Това се дължи на приемането за постоянна концентрацията на мед в топилната шлака ($\text{Cu}_{\text{шл}}\% = 1,5\%$, като Cu_2S). С увеличаването на масата на шлаката расте и количеството мед разтворено в нея и съответно намалява количеството мед формиращо шейновата фаза.

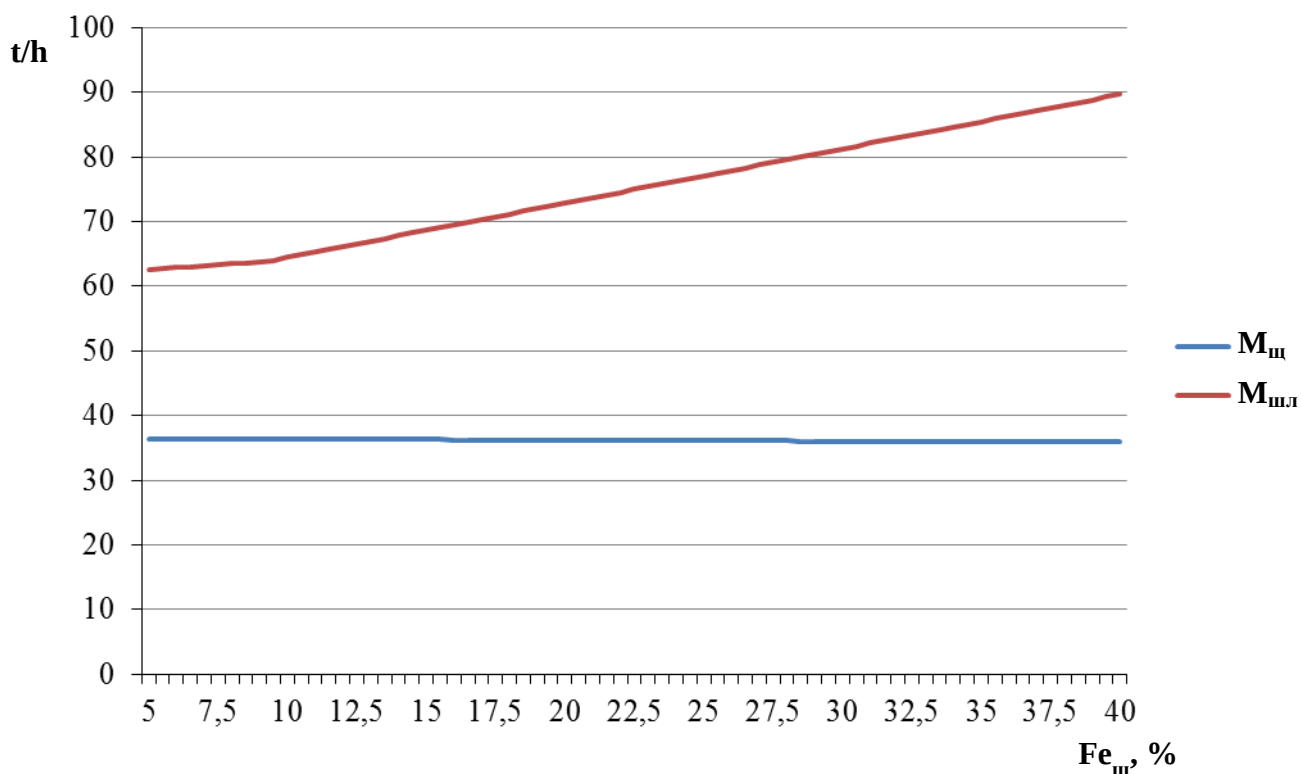
Втората серия от балансови изчисления са направени при променливо съдържание на мед ($\text{Cu}_{\text{щ}}\%$) и постоянни концентрации на желязо ($\text{Fe}_{\text{щ}}\%$) и сяра ($\text{S}_{\text{щ}}\%$) във входящия шихтов поток. Резултатите от изчисленията са обобщени в таблици, дадени в приложение към дисертацията (от табл. IV.27 до табл. IV.32). Въз основа на данни от тези таблици са построени графични зависимости на масовите потоци на отпадъчна шлака ($M_{\text{шл}}$, t/h) и шейнова фаза ($M_{\text{щ}}$, t/h) от изменението на концентрацията на мед в изходните материали.



Фиг. 3.17. Изменение на $M_{ш.л}$ и $M_{ш}$ при промяна на съдържанието на $Fe_{ш}^{\%}$ в шихтата при $Cu_{ш}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$, $S_{ш}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$



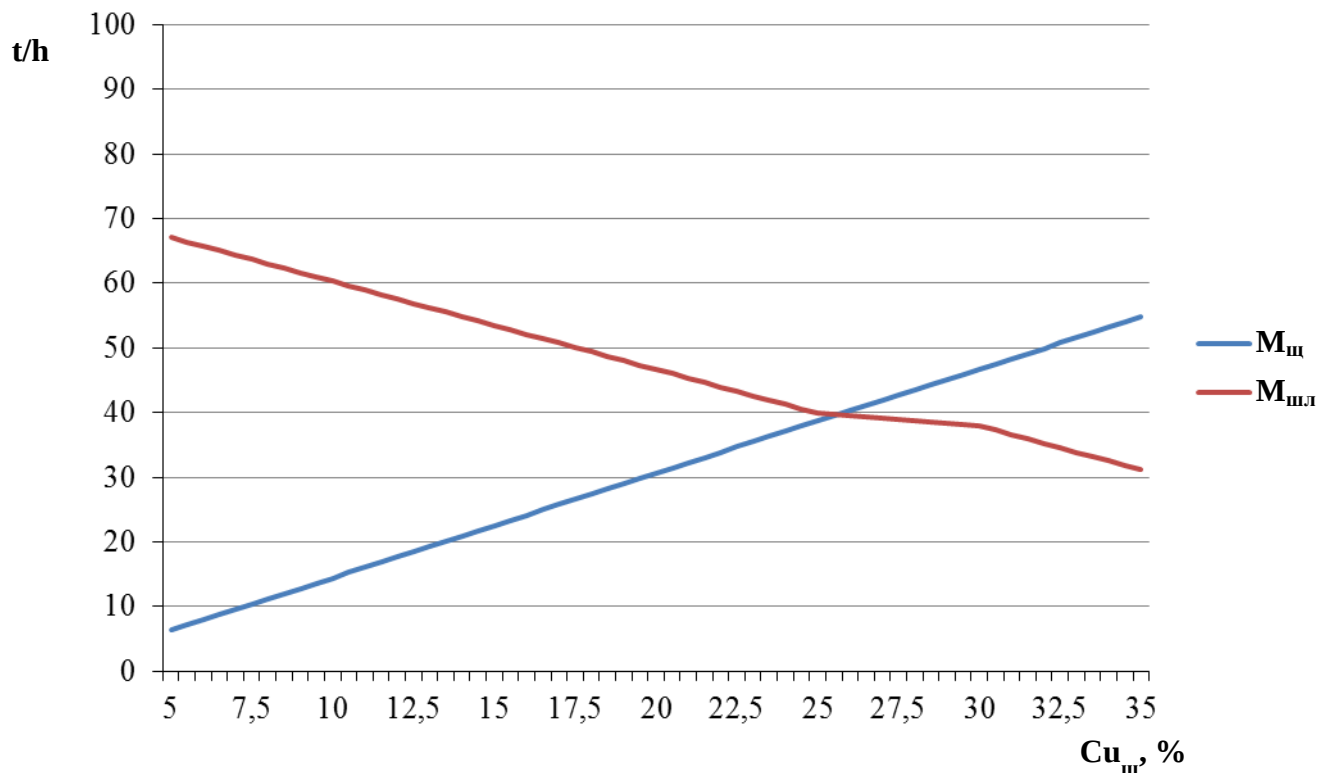
Фиг. 3.18. Изменение на $M_{ш.л}$ и $M_{ш}$ при промяна на съдържанието на $Fe_{ш}^{\%}$ в шихтата при $Cu_{ш}^{\%} = 25 \text{ mas.}\%$, $S_{ш}^{\%} = 15 \text{ mas.}\%$



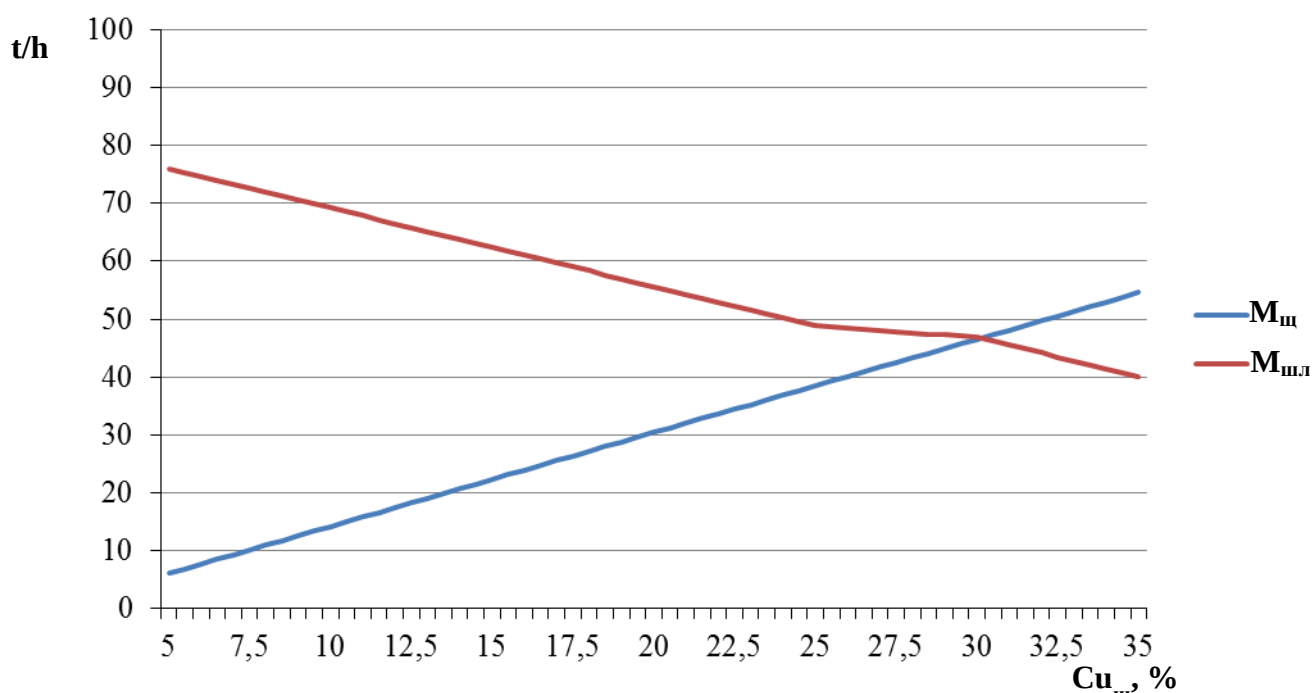
Фиг. 3.19. Изменение на M_{slr} и M_{sl} при промяна на съдържанието на $Fe_{sl}^{\%}$ в шихтата при $Cu_{sl}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$, $S_{sl}^{\%} = 10 \text{ mas.}\%$

Съответните графични зависимости при различни постоянни съдържания на желязо и сяра са представени на фигури (от фиг. 3.20 до фиг. 3.25). Характерно за всички разглеждани резултати, получени в резултат на втората серия изчисления е, че с повишаване на концентрацията на мед в шихтата масовият поток на топилната шлака M_{slr} , t/h се намалява линейно. Този резултат е предвидим експертно, но количествените характеристики, получавани при различни условия имат важно практическо значение. Така например, M_{slr} намалява в най-голяма степен при повишаване на $Cu_{sl}^{\%}$ при $Fe_{sl}^{\%} = 25 \text{ mas.}\%$ и $S_{sl}^{\%} = 20 \text{ mas.}\%$ (фиг. 3.24). В най-малка степен това намаление е при $Fe_{sl}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$ и $S_{sl}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$ (фиг. 3.23). В първия случай намаляването на масовия поток на шлаковата фаза е с 41 t/h, а във втория случай е само с 30 t/h. Този резултат показва възможности на модела за минимизиране на количеството на отпадъчната шлака след топилния процес, чрез оптимизиране на състава на шихтовите материали.

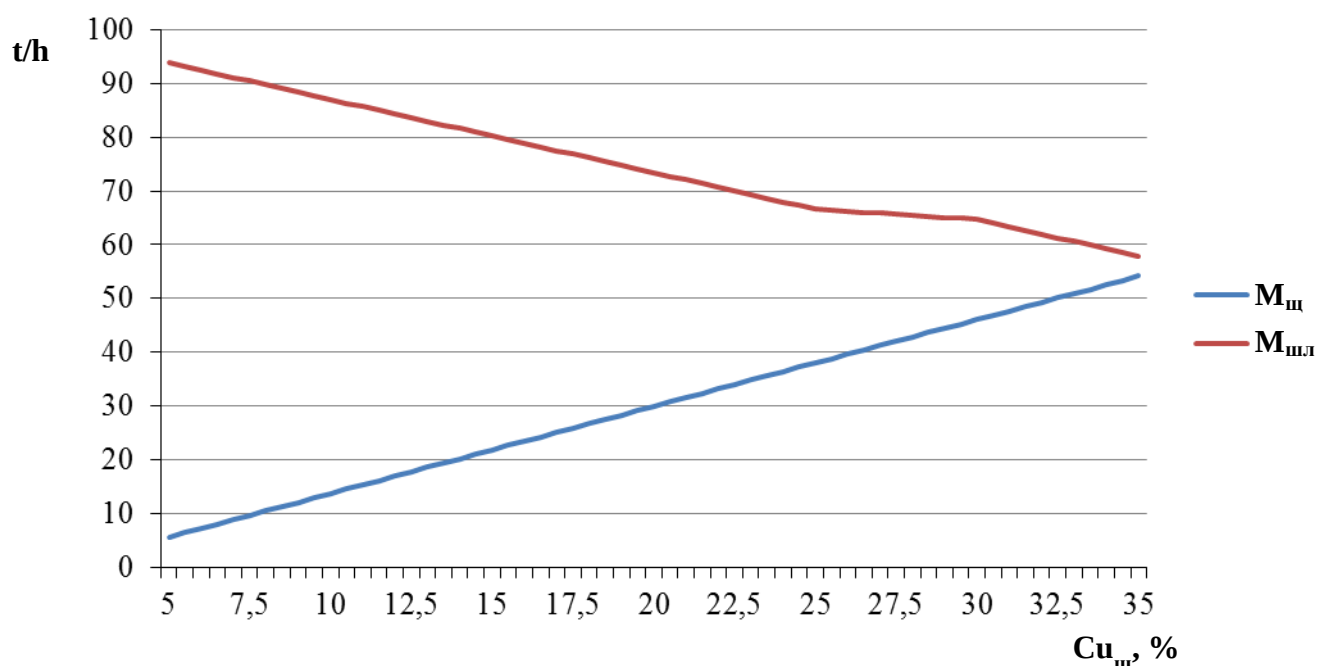
На фиг. 3.20, фиг. 3.21, фиг. 3.22 и фиг. 3.23 се наблюдават промени в ъгловия коефициент на правите, отразяващи функционалната зависимост на $M_{\text{шл}}$ от концентрацията на мед в шихтата. Първоначалното намаляване на $M_{\text{шл}}$ е пропорционално на повишаването на $\text{Cu}_{\text{ш}}\%$ и съответното намаляване на другите компоненти ($\text{Др}_{\text{ш}}\%$), които представляват метални оксиди и преминават директно в шлаковата фаза. Интензивността на намаляване на масовия поток на шлаковата фаза се понижава в точката, в която стойностите на $\text{Cu}_{\text{ш}}\%$ започнат да се повишават за сметка на намаляване на съдържанието на съдържанието на $\text{SiO}_2\text{ ш}\%$. За да се осигури необходимото количество на силициев диоксид за свързване на желязото до $2\text{FeO}.\text{SiO}_2$ в шлаковата фаза, съответствие с математичния модел се повишава количеството $\text{SiO}_{2\text{доп}}$. В крайна сметка се променя наклона на линейната зависимост, което е от практическо значение за определяне на състава на шихти, които биха допринесли за в най-голяма степен за генерирането на по-малки количества отпадъчна шлака от топилния процес.



Фиг. 3.20. Изменение на $M_{\text{шл}}$ и $M_{\text{ш}}$ при промяна на съдържанието на $\text{Cu}_{\text{ш}}\%$ в шихтата при $\text{Fe}_{\text{ш}}\% = 25 \text{ mas.}\%$, $\text{S}_{\text{ш}}\% = 40 \text{ mas.}\%$



Фиг. 3.21. Изменение на M_{sh} и M_{sl} при промяна на съдържанието на $Cu_{sh}^{\%}$ в шихтата при $Fe_{sh}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$, $S_{sh}^{\%} = 35 \text{ mas.}\%$



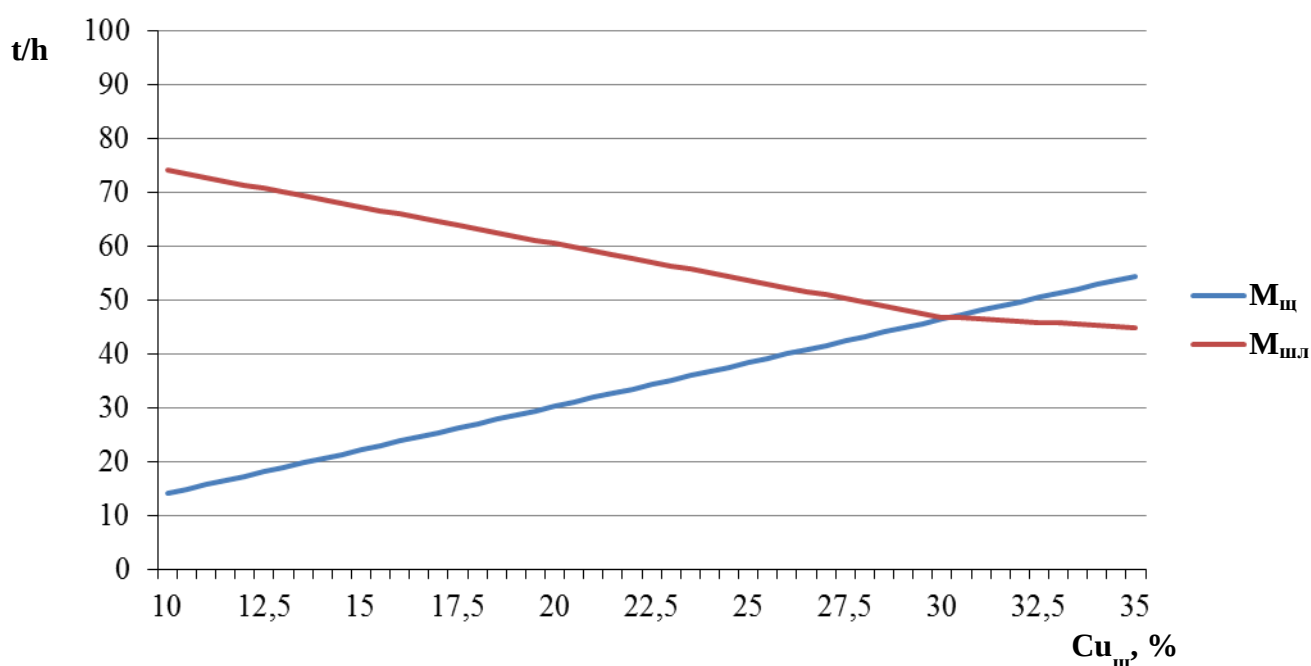
Фиг. 3.22. Изменение на M_{sh} и M_{sl} при промяна на съдържанието на $Cu_{sh}^{\%}$ в шихтата при $Fe_{sh}^{\%} = 40 \text{ mas.}\%$, $S_{sh}^{\%} = 25 \text{ mas.}\%$

Втората промяна на ъгловия коефициент на линейната зависимост на M_{sh} от $Cu_{sh}^{\%}$ (фиг. 3.20, фиг. 3.21, фиг. 3.22) се получава в точката, в която започва отново да се понижава равномерно съдържанието на други компоненти ($Dr_{sh}^{\%}$), които преминават в шлаката. Намаляването на $Dr_{sh}^{\%}$

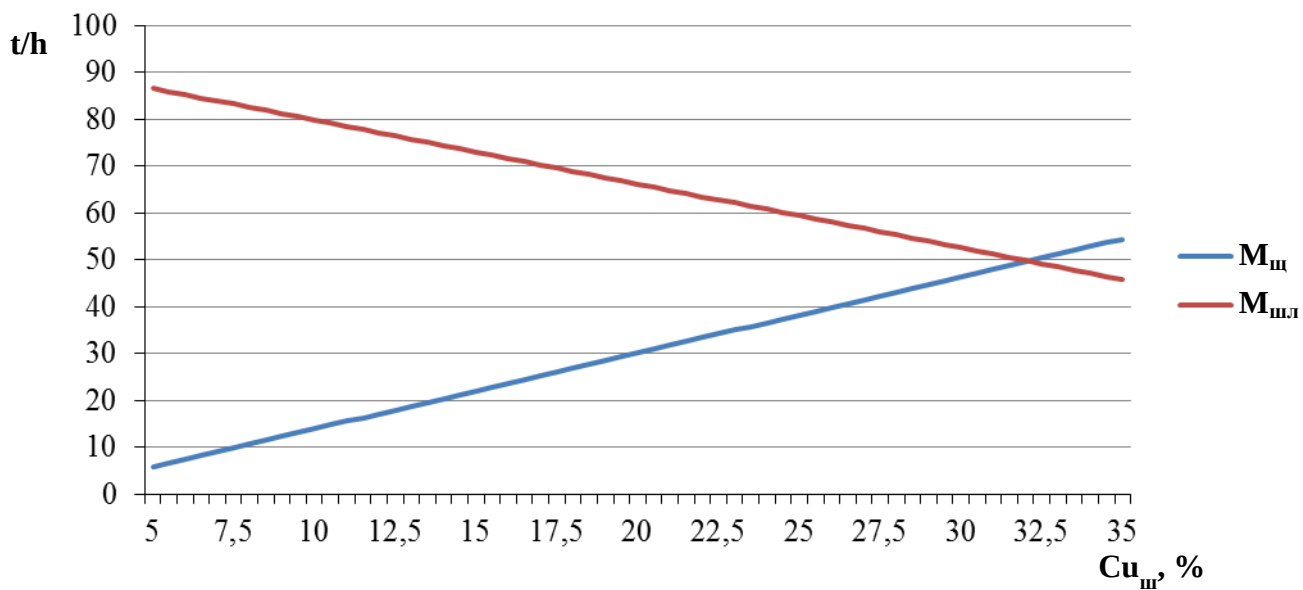
интензифицира намаляването на $M_{\text{шл}}$ при повишаване на концентрацията на мед в шихтата.

При резултатите от експериментите, отразени на фиг. 3.24 и фиг. (3.25), не се установяват преходни състояния подобни на описаните по-горе. Поради това не се наблюдават промени в ъгловите коефициенти на линейните зависимости на количествата на шлаковата фаза от концентрацията на мед в шихтата.

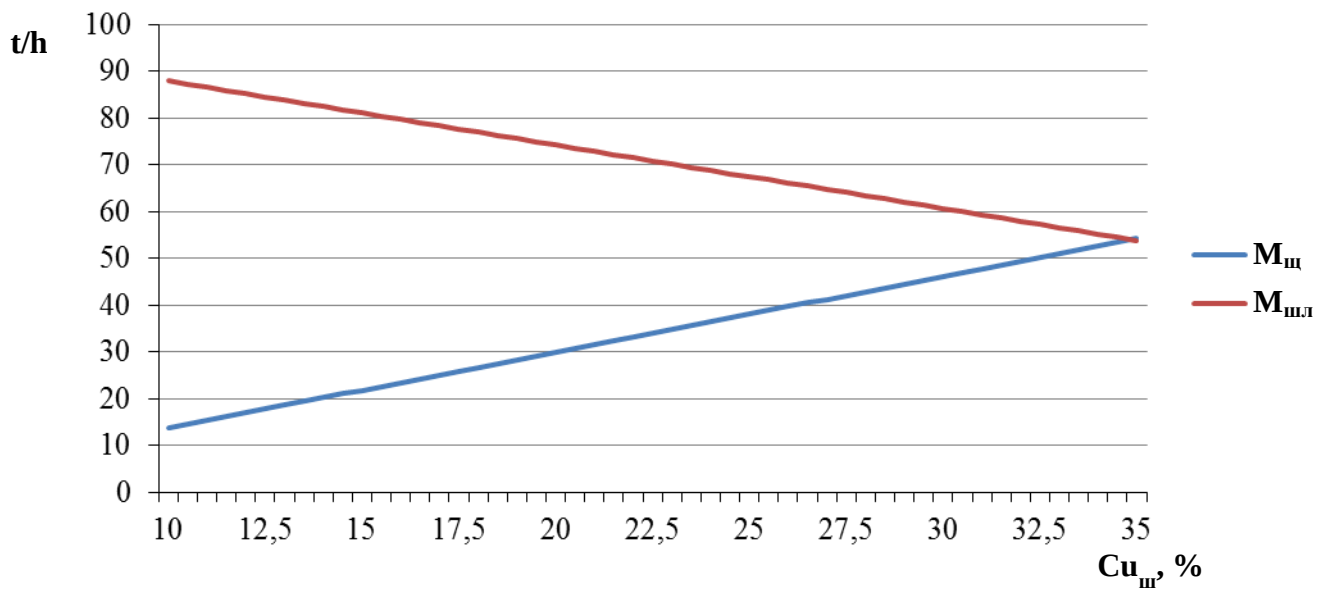
Линейното повишаване на масата на шейна ($M_{\text{ш}}$), при увеличаване на съдържанието на мед в изходните материали, отразено на горните фигури, позволява количествено да се оцени съотношение между двата основни течнофазни материални потоци при високотемпературните топилни процеси.



Фиг. 3.23. Изменение на $M_{\text{шл}}$ и $M_{\text{ш}}$ при промяна на съдържанието на $\text{Cu}_{\text{ш}}^{\%}$ в шихтата при $\text{Fe}_{\text{ш}}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$, $\text{S}_{\text{ш}}^{\%} = 30 \text{ mas.}\%$



Фиг. 3.24. Изменение на $M_{\text{ш.л}}$ и $M_{\text{ш}}$ при промяна на съдържанието на $\text{Cu}_{\text{ш}}^{\%}$ в шихтата при $\text{Fe}_{\text{ш}}^{\%} = 25 \text{ mas.}\%$, $\text{S}_{\text{ш}}^{\%} = 20 \text{ mas.}\%$



Фиг. 3.25. Изменение на $M_{\text{ш.л}}$ и $M_{\text{ш}}$ при промяна на съдържанието на $\text{Cu}_{\text{ш}}^{\%}$ в шихтата при $\text{Fe}_{\text{ш}}^{\%} = 35 \text{ mas.}\%$, $\text{S}_{\text{ш}}^{\%} = 20 \text{ mas.}\%$

Заклучение

Формулираните в дисертацията изводи позволяват да се потвърди, че в съответствие с поставената основна цел в дисертационния труд, е изграден системен методологичен подход за определяне и оценяване на технологичните възможности за количествено минимизиране, обратно оползотворяване и/или високотемпературно обезвреждане на твърди промишлени отпадъци, генерирани при технологични операции в производствени инсталации от металургичната и химическата промишленост. Въз основа на физико-химичните особености на процесите на факелно топене на сулфидни медни концентрати са оценени възможностите на съответните агрегати за високотемпературно третиране, обезвреждане и оползотворяване на отпадъци. Определени са технологичните възможности за минимизиране и обратно оползотворяване на шлаковата фаза. Създаден е аналитичен математичен модел на процесите факелно топене на сулфидни медни концентрати и апроксимационни модели за целите на оперативното управление и оптимизация. Доказани са възможностите на моделите за минимизиране на количеството на отпадъчната шлака чрез регулиране на състава на шихтовите материали, както и за използване на нестандартни шихтови материали: отпадъци от мината и въгледобивната промишленост, енергопроизводството, електрониката и др.

Научни и научно-приложни приноси на дисертационния труд

1. Реализиран е балансов метод за количествено минимизиране, оползотворяване и/или обезвреждане на промишлени отпадъци в металургичната и химическата промишленост чрез използване на технологичните възможности на производствените инсталации и на подходящи шихтови материали за основните технологични операции.

Съставен е моделиращ алгоритъм, включващ математично описание на материалните и топлинни баланси, определени от физико-химичните превръщания в промишлени агрегати. Определени са основните изисквания

за формулиране на балансови математични модели в зависимост от характерните особености на технологичните процеси.

2. Предложен е математичен модел за минимизиране на количествата на промишлените отпадъци при металургичните процеси на факелно топене на сулфидни медни суровини.

Съставени са пет характерни системи от независими балансови уравнения в зависимост от фазовия състав на входящия твърдофазен шихтов поток.

3. Разработен е алгоритъм за програмно реализиране на математичния модел и за числено решаване на изведените системи от независими балансови уравнения чрез използване на метода на Гаусовата елиминация.

Основните изчислителни модули на програмата са следните:

- Определяне на фазовото разпределение на компонентите в шихтата в широк диапазон на изменение на концентрациите им;
- Изчисляване на топлинния баланс на топилния агрегат и определяне на необходимото количество първично гориво за осигуряване на технологично необходимия температурен режим;
- Изчисляване на масовите дебити на получаваната шлакова фаза и щейновия продукт, както и обемния дебит и състава на газовата фаза.

4. Съставеният балансов математичен модел на високотемпературни факелни технологични процеси, е алгоритмизиран и е реализиран програмно с помощта на програмна среда, определена в софтуерния продукт „Maple“.

Доказани са възможностите на програмния продукт, реализиращ математичния модел, за минимизиране на количеството на отпадъчната шлака и за предсказващо и превантивно осигуряване на оптимален режим на факелно топене на сулфидни суровини в широк диапазон на изменение на концентрациите на основните компоненти в използваните шихтови материали.

5. Предложени са апроксимиращи полиномиални математични модели на базата на разработения в дисертационния труд аналитичен математичен

модел за минимизиране на количествата на промишлените отпадъци при металургичните процеси на факелно топене на сулфидни медни суровини. Апроксимиращите модели може да се използват за оперативно планиране, оптимизация и управление на целевия продукт и на отпадъчните продукти. Апроксимиращият модел е верифициран по резултати от виртуални числови експерименти с използване на методи на планираните експерименти в ограничено факторно пространство. Най-малките средни абсолютни грешки за полезния продукт и за отпадъка се получават в следната област от концентрации на основните компоненти: $10 \leq \text{Cu} \leq 35$; $15 \leq \text{Fe} \leq 45$; $10 \leq \text{S} \leq 40$ (mas.%).

6. По предложените математични модели са определени множество от Парето - оптимални решения за компоненти на шихтата при металургичните процеси на факелно топене на сулфидни медни суровини, които осигуряват изисквания за максимално количество щейн и минимално количество на шлака.

Публикации по дисертацията

Статии

B. Stefanov, D. Borisov, "Mathematical model for the waste material flows and contents of toxic compounds minimization in electrolytic copper production", International Journal of Pure and Applied Mathematics, Vol.38, No. 3, 2007, 425-43.

D. Borisov, B. Stefanov, S. Stoyanov, An algorithm for metallurgical waste minimization, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 49, 1, 2014, 99-105.

Доклади на научни конференции, публикувани в пълен текст

Б. Стефанов, Д. Чошнова, Н. Терзиев, Д. Борисов, Математичен модел за изчисляване на съдържанието на минералните фази във флотационните сулфидни медни концентрати, Първи международен семинар "Металургична топлотехника" 3-4 ноември 2003, стр.163-174.

D. Choshnova, B. Stefanov, D. Borisov, Mathematical model of the heat transfer in the reaction space of flash smelting furnace, X national conference of metallurgy with international participation, ISBN 978-954-92052-1-3, Varna 28-31 May 2007, P28.

D. Borisov, B. Stefanov, D. Choshnova, "Possibilities for common cleaning of ventilation gasses from smelting and refining of non-ferrous metals and exhausted gasses from combustion installations, X national conference of metallurgy with international participation, ISBN 978-954-92052-1-3, Varna 28-31 May 2007, C13.