

Міністерство освіти України
Дніпродзержинський державний технічний університет

На правах рукопису

САМОХВАЛОВ Сергій Євгенович

УДК 669.18:536.24:532:517

**ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМІВ КОВШОВОЇ ОБРОБКИ ТА РОЗЛИВКИ СТАЛІ
НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ
У БАГАТОФАЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Спеціальності 05.16.02 - металургія чорних металів
05.14.06 - технічна теплофізика

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпродзержинськ - 1995

669.1/8

621.1.01



Дисертацію *с рукопис*

Робота виконана в Дніпродзержинському
державному технічному університеті

Наукові консультанти:

доктор технічних наук, професор
доктор технічних наук, професор

ОГУРЦОВ А.П.
НИКИТЕНКО М.І.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
доктор технічних наук, професор
доктор технічних наук, професор

ІСАЄВ Є.І.
КАЗАЧКОВ Є.О.
НЕДОПЬОКІН Ф.В.

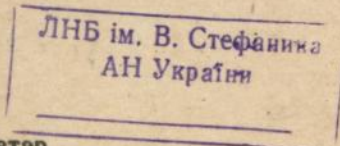
Провідна організація:

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться "15" листопада 1995 р. о 12 год 00 хв
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 37.01.01 Дніпродзержинського державного технічного університету за адресою: 322618 м. Дніпродзержинськ, вул. Дніпробудівська, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці ДДТУ

Автореферат розісланий "14" лютого 1995 р.



Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

[Signature] ЧЕРНОВ М.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Аналогічність. Майже усі середовища, які зустрічаються при виробництві сталі і, зокрема, при ковшовій обробці та розливці сталі, є багатофазними. Це обумовлено самою природою технологічних процесів сталеплавильного виробництва, основу яких складають фазові та хімічні перетворення.

Вже при наповненні ковша (виливниці) струмінь металу захоплює повітря, яке суттєво змінює гідродинаміку розплаву, отже і перебіг тепломасопереносних процесів у ковші (виливниці). На етапі позаагрегатної обробки металу в ковші газова фаза може примусово нагнітатись в об'єм розплаву (при продувці інертним газом), або утворюватись там в результаті фазових перетворень (наприклад, при випаровуванні кальцію).

Крім газової фази у ківш різними способами подаються тверді добавки з метою корегування складу сталі. Так кускові матеріали можуть вводитись або під струмінь розплаву під час наповнення ковша, або у якийсь інший спосіб, наприклад, через патрубок пульсаційної установки під час пульсаційної обробки металу в ковші. Тверді порошкові матеріали подаються у ківш разом зі струменем інертного газу (інжекційна металургія). Тверді матеріали в ковші перетерплюють фазові перетворення: плавляться, випаровуються, розчинюються, перетворюються хімічно. В усіх випадках практично важливою є оптимізація параметрів подаваних матеріалів та режимів їх вводу для отримання найкращих кінцевих результатів з якості сталі, а також з метою енергоресурсозбереження, зокрема, заощадження вводимих матеріалів.

Надзвичайно складним теплофізичним процесом з рухом і перетворенням багатьох взаємодіючих фаз є тверднення сталі, яке починається зразу після надходження у виливницю перших порцій розплаву. На якість кінцевого шару зливка в його донній частині важливий вплив справляє поведінка вільної поверхні розплаву (межі поділу рідкої та газової фаз) на початковому етапі наповнення виливниці. При подальшій кристалізації зливка утворюються кристали, частина з яких може бути рухомою. Крім того, внаслідок сегрегації виділяються різноманітні рухомі домішкові фази розподіл яких у значній мірі визначає якість затверділого зливка. В окремих випадках розгляд процесів кристалізації ускладнюється необхідністю врахування додаткових фаз, наприклад, рідкої фази результатів плавлення шлакоутворюючого стрижня, вводимого у вилив-

ницю з метою покращення якості зливка. Все це вимагає вивчення перебігу теплофізичних процесів у тверднучому зливку з урахуванням динаміки як основних, так і домішкових фаз для оптимізації режимів наповнення і тверднення сталі з метою отримання якісного зливка.

Проте дослідження багатофазних середовищ сталеплавильного виробництва наражаються на певні труднощі. Вони пов'язані, з одного боку, з непрозорістю розплаву сталі та його високою температурою, що перешкоджає проведенню всебічних експериментальних досліджень як у лабораторних умовах, так і на виробництві, а також з коштівністю експериментів. З іншого боку, математичне моделювання багатофазних середовищ є досить складною задачею, бо їм притаманні крім великої кількості змінних, динаміку яких треба відслідковувати, такі властивості, як наявність фазових перетворень, ефективна стисливість та ін., які призводять до несоленоїдальності руху багатофазних середовищ. Все це унеможлиблює використання при математичному моделюванні теплофізичних процесів у багатофазних середовищах більшості методів розроблених для однофазних речовин і вимагає розробки спеціальних методів.

Якщо вищеозначені експериментальні труднощі дослідження теплофізичних процесів у багатофазних середовищах сталеплавильного виробництва важкоподоланні, то розробка спеціальних математичних методів дослідження має досить обнадійливі перспективи, особливо беручи до уваги сучасний розвиток ЕОМ, збільшення їх потужності та доступності з одночасним зменшенням відносної вартості. Крім того, математичне моделювання спроможне увібрати у себе якісні та кількісні результати експериментальних досліджень, додаючи свої можливості (оперативності, здатності окремого вивчення впливу того чи іншого фактору, швидкого розгляду великої кількості варіантів, точності та універсальності) і виступаючи як більш глибокий рівень розуміння вивчаємих процесів. Тому математичному моделюванню тих чи інших аспектів перебігу теплофізичних процесів у багатофазних середовищах присвячено значну кількість публікацій з теплофізики у сучасних як вітчизняних, так і закордонних журналах.

Актуальність дослідження та оптимізації перебігу теплофізичних процесів у багатофазних середовищах при ковшовій обробці, розливі та кристалізації сталі у наш час обумовлена розробкою нових енерго- та ресурсозберігаючих наукоємних технологій вироб-

ництва сталі, зростанням вимог до його ефективності.

Мета роботи полягає у створенні комплексу ефективних математичних методів та розробці адекватних математичних моделей теплофізичних процесів у багатофазних середовищах на основі розплаву сталі, які б допускали комп'ютерну реалізацію та могли служити засобом прийняття рішень з оптимізації технологічних параметрів ковшової обробки і кристалізації сталі з ціллю енерго та ресурсозбереження, а також застосування цих моделей для комплексних досліджень означених процесів.

Наукова новизна основних результатів роботи полягає у наступному.

Для багатофазних середовищ, які мають місце у сталеплавильному виробництві (середовище газ-розплав, суспензія на основі розплаву та ін.) у характерних для цих випадків наближеннях (вакуумному, малих об'ємних густин домішкових фаз та ін.) та з застосуванням колективного опису руху дисперсних частинок отримано рівняння, що використовуються для чисельних досліджень таких середовищ.

Розроблено багатофазну нерівноважну модель кристалізації, яка, на відміну від існуючих моделей кристалізації, враховує можливий рух дрібнодисперсних кристалів у плинній зоні, а також перенос домішок у неплинній зоні не тільки завдяки їх сумісному фільтраційному руху крізь дендритний каркас разом з ще не застиглим розплавом, але й завдяки незалежному руху кожної з домішкових фаз під дією парціального тиску, виникаючого внаслідок різного ступеня змочуємості дендритного каркасу різними фазами. Дана модель здатна досить повно описати процес тверднення сталі, в тому числі й такі його аспекти, які не враховуються в сучасних моделях тверднення, як то: формування конусу осадження, ліквідаційних смуг та ін.

З використанням загального принципу розщеплення за фізичними факторами розроблено комплекс нових ефективних чисельних методів розв'язання рівнянь гідродинаміки та тепломасопереносу у багатофазних середовищах, котрі дозволяють враховувати такі властивості багатофазних середовищ, як несоленоїдальність руху, перебіг фазових перетворень, рух та нестійкість межі поділу фаз (як газ-рідина, так і рідина-тверде тіло), тощо.

На основі розроблених чисельних методів створено адекватні математичні моделі та проведено чисельні дослідження теплофізич-

них процесів:

– у газо-рідинних середовищах: на початковому етапі наповнення виливниці сифоном з урахуванням динаміки вільної поверхні, при наповненні згори виливниці та сталерозливочного ковша з урахуванням впливу захоплюемого струменем розплаву повітря, а також при продувці ковша інертним газом з урахуванням ефективної стисливості середовища газ-розплав;

– у твердо-рідинних та багатофазних середовищах, які мають місце на етапі позаагрегатної обробки сталі при різноманітних способах подачі у ківш твердих добавок (кускових матеріалів під час наповнення та через патрубок пульсаційної установки, порошкових матеріалів – інжекційним способом), з урахуванням просторового розподілу твердих частинок, їх взаємодії з газовою фазою (для порошоків), фазових перетворень (звичайного чи дифузійного плавлення або розчинення) та можливості для результатів фазових перетворень твердих частинок подальших фазових перетворень (розчинення або випаровування);

– при кристалізації зливків під час звичайного та безнапорного варіантів наповнення виливниці сифоном, в разі наповнення виливниці з шлакоутворюючим стрижнем, а також на етапі подальшого тверднення зливків з урахуванням конвективного руху дрібнодисперсних кристалів та незалежного фільтраційного руху домішкових фаз.

Практична цінність та реалізація результатів роботи. Дана робота реалізує один з пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки, а саме, при її виконанні розроблено комплекс ефективних математичних методів та математичні моделі теплофізичних процесів у багатофазних середовищах на основі розплаву сталі, які служать засобом прийняття рішень з оптимізації технологічних параметрів сталеплавильного виробництва з метою енерго та ресурсозбереження.

Чисельні дослідження теплофізичних процесів на початковому етапі різних режимів наповнення виливниці сифоном, які стали можливими завдяки розробленому в роботі консервативному ейлеровому методу, а також чисельні дослідження залежності процесів кіркоутворення від способу та швидкості наповнення виливниці сифоном були використані при освоєнні на Дніпровському металургійному комбінаті (м. Дніпродзержинськ), разом з Дніпродзержинським індустріальним інститутом (нині Дніпродзержинським державним тех-

нічним університетом), технології швидкісної безнапорної розливки спокійного металу сифоном.

З використанням результатів чисельного моделювання процесів гідродинаміки розплаву та масопереносу в ньому модифікуючих та рафінуючих добавок, яке виконане у даній роботі, інститутом чорної металургії НАН України розроблені, освоєні та впроваджені у промислову практику металургійного комбінату "Азовсталь" (м. Маріуполь) ресурсозберігаючі технології позапічного глибокого рафінування сталі кусковою ТШС ефективного складу у наповнюємому та порошковим силікокальцієм у наповненому сталерозливочному ковші.

Математичні моделі процесів гідродинаміки та тепломасопереносу при пульсаційній обробці металу в ковші, розроблені у даній дисертаційній роботі, а також отримані за їх допомогою результати чисельного моделювання використовувались при розробці проектної та технічної документації на створюєму на Дніпровському металургійному комбінаті (м. Дніпродзержинськ) разом з Дніпродзержинським індустріальним інститутом установку пульсаційного перемішування металу в ковші.

Сумарний дольовий економічний ефект від впровадження результатів даної дисертаційної роботи склав понад 450 тис. крб. (у цінах 1990 р.).

Результати роботи впроваджені, також, у навчальний процес Дніпродзержинського та Санкт-Петербурзького державних технічних університетів і використовуються у курсах з математичного моделювання металургійних процесів, а також при виконанні студентами курсових та дипломних робіт.

На залист вноситься:

1. Колективна модель переносу твердих частинок у розплаві.
2. Багатофазна нерівноважна модель кристалізації, враховуюча рух дрібнодисперсних кристалів у плинній зоні та незалежний перенос домішок у дендритному каркасі.
3. Комплекс чисельних методів розрахунку теплофізичних процесів у багатофазних середовищах:
 - метод розщеплення за фізичними факторами для ефективно стисливих середовищ;
 - консервативний ейлерів метод для середовищ з вільною поверхнею поділу фаз;
 - метод просторового розщеплення за фізичними факторами для

тверднучого зливка.

4. Математичні моделі та результати чисельних досліджень тепло-фізичних процесів у багатофазних середовищах на основі розплаву сталі в умовах:

- початкового етапу наповнення виливниці сифоном з урахуванням динаміки вільної поверхні;
- наповнення виливниці та сталерозливочного ковша згори з урахуванням захоплююмого струменем розплаву повітря;
- продувки ковша інертним газом;
- подачі феросиліцію у ківш через патрубок пульсаційної установки;
- вдування у ківш порошоків графіту та силікокальцію через занурюему фурму;
- подачі твердої шлакоутворюючої суміші при наповненні ковша;
- наповнення виливниці сифоном безнапорним способом;
- наповнення виливниці з шлакоутворюючим стрижнем;
- тверднення зливка з урахуванням руху дрібнодисперсних кристалів;
- тверднення зливка з урахуванням незалежного переносу домішок у дендритному каркасі.

5. Рекомендації з вдосконалення режимів та оптимізації технологічних параметрів:

- безнапорної швидкісної розливки спокійного металу сифоном;
- позапічного глибокого рафінування сталі кусковою ТШС у наповнюємому та порошковим силікокальцієм у наповненому сталерозливочному ковші;
- пульсаційного перемішування металу в ковші.

Апробація роботи. Матеріали дисертації були представлені на XI Всесоюзній конференції з проблем зливка "Процеси розливки, модифікації та кристалізації сталі і сплавів", Волгоград, 1990; на Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми кристалізації сплавів та комп'ютерне моделювання", Іжевськ, 1990; на II Всесоюзній науково-технічній конференції "Вдосконалення металургійної технології у машинобудуванні", Волгоград, 1991; на Всесоюзній конференції "Тепло- та масообмінні процеси у ваннах сталеплавильних агрегатів", Маріуполь, 1991; на IV науково-технічній конференції "Автоматизація проектування і управління якістю відливок", Санкт-Петербург, 1991; на Всесоюзній нараді "Моделювання фізико-хімічних систем і технологічних процесів у металургії",

Новокузнецьк, 1991; на Міжнародній конференції "Тепло та масоперенос у технологічних процесах", Юрмала, 1991; на Міждержавній конференції "Тепломасообмін та гідродинаміка у турбулентних течіях", Алушта, 1992; на V Міжнародній науково-технічній конференції "Кристалізація та комп'ютерні моделі", Іжевськ, 1992.

Публікації. З теми дисертації опубліковано 33 роботи, у тому числі 2 монографії.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, семи глав, загальних висновків, викладена на 449 сторінках машинописного тексту, ілюстрована 65 малюнками, 3 таблицями, має список літератури з 330 назв та додатки.

Робота виконана в лабораторії математичного моделювання металургійних процесів тоді Дніпродзержинського індустріального інституту, а також у докторантурі інституту технічної теплофізики НАН України (м.Київ).

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дається загальна характеристика роботи, визначається її актуальність, мета та основні положення, що виносяться на захист.

Перша глава присвячена огляду існуючих положень і підходів до опису та дослідження теплофізичних процесів у багатофазних середовищах металургійного виробництва, їх аналізу та теоретичному узагальненню, з якого випливають задачі дисертаційної роботи.

Проведений аналіз публікацій, що стосуються теми дисертації, дозволив зробити наступні висновки:

- при математичному моделюванні багатофазних середовищ на основі розплаву здебільшого використовується однофазне наближення, яке часто виявляється надто грубим і призводить до не тільки кількісно, але й якісно невірних результатів;
- змінні та форма запису рівнянь для багатофазних середовищ вибираються (серед еквівалентних) без урахування перспектив їх чисельного розв'язання, що значно ускладнює, а інколи й унеможливає комп'ютерну реалізацію розроблених таким чином моделей у повному обсязі;
- розгляд багатофазних середовищ сталеплавильного виробництва часто ведеться занадто спрощено, без урахування таких факторів, як відносний рух фаз, перебіг фазових перетворень, несоленої-

дальність руху і т.ін;

– не приділяється належної уваги економії ресурсів ЕОМ шляхом підвищення ефективності методів розрахунку, внаслідок чого деякі цікаві процеси залишаються не розглянутими, наприклад, теплові аспекти задачі початкового етапу наповнення виливниці (з урахуванням вільної поверхні поділу фаз) та ін.;

– дисперсні частинки розглядаються, в основному, окремо, що занадто деталізує опис, залишаючи поза увагою такі параметри, як статистичні характеристики їх розподілу, взаємодію частинок з іншими фазами (скажімо порошоків з газовою фазою), котрі є дуже важливими на практиці;

– при побудові математичних моделей кристалізації сталі не враховуються такі важливі процеси, як рух дрібнодисперсних кристалів та окрема фільтрація домішкових фаз через дендритний каркас.

Це визначило наступні задачі дисертаційної роботи:

1. Відібрати рівняння, котрі описують перебіг теплофізичних процесів у багатофазних середовищах на основі розплаву сталі з урахуванням перспектив їх комп'ютерного розв'язання, розробивши колективний підхід до опису руху і перетворень дисперсних частинок.
2. Розробити багатофазну нерівноважну модель кристалізації, враховуючу рух дрібнодисперсних кристалів у плинній зоні та незалежний перенос домішок у дендритному каркасі.
3. На базі розщеплення за фізичними факторами розробити комплекс чисельних методів розрахунку гідродинамічних та теплофізичних параметрів багатофазних середовищ, враховуючих такі їх властивості, як несоленоїдальність руху, перебіг фазових перетворень, рух та нестійкість межі поділу фаз.
4. З використанням розроблених методів і моделей виконати дослідження та оптимізацію перебігу теплофізичних процесів у газорідних середовищах, маючих місце у конкретних задачах ковшової обробки і розливки сталі.
5. На основі моделювання теплофізичних процесів у твердо-рідних та багатофазних середовищах, що мають місце у конкретних практично цікавих задачах позаагрегатної обробки сталі у ковші, отримати рекомендації з вдосконалення режимів ковшової обробки сталі.
6. На основі моделювання теплофізичних процесів при наповненні

та кристалізації зливків отримати рекомендації з вдосконалення режимів розливки сталі, зокрема, виконати оптимізацію геометричних та швидкісних режимів наповнення виливниці сифоном і маси стрижня при наповненні виливниці з шлакоутворюючим стрижнем, а також виконати дослідження перебігу теплофізичних процесів у зоні кристалізації зливка на основі багатофазної нерівноважної моделі кристалізації.

Глави 2 - 4 присвячені розробці теоретичних положень моделювання багатофазних середовищ ковшової обробки та розливки сталі, а саме: обґрунтуванню концептуального підходу, вибору змінних та рівнянь, розробці багатофазної нерівноважної моделі кристалізації та спеціальних математичних методів для дослідження теплофізичних процесів у багатофазних середовищах.

У другій главі з використанням підходу вкладених взаємодіючих та взаємопроникаючих континуумів вписано основні рівняння, які використовуються при створенні математичних моделей теплофізичних процесів у багатофазних середовищах, що розглядаються у даній роботі. Тут сформульовано пропонуємий нами загальний підхід до побудови математичних моделей динаміки багатофазних середовищ, котрий дозволяє створювати моделі, які можуть бути реалізованими на сучасних електронно-обчислювальних машинах (ЕОМ), а також розроблено колективний підхід до опису руху і перетворень дисперсних частинок.

Згідно з концепцією вкладених континуумів багатофазне середовище зображується у вигляді m континуумів (за кількістю різних фаз), кожен з яких заповнює один і той же об'єм, зайнятий середовищем і рухається один крізь другий. Кожному з континуумів приписуються свої значення макроскопічних параметрів: густини ρ_i , швидкості \vec{v}_i , питомої енергії E_i ($i = 1, \dots, m$) та інших. Для кожної з фаз виконуються рівняння для ρ_i , \vec{v}_i , E_i балансу маси, імпульсу, енергії, у які, зокрема, входять величини J_{ji} , \vec{P}_{ji} та E_{ji} - інтенсивності обміну масою, імпульсом та енергією між i -ю та j -ю фазами. Внаслідок збереження маси, імпульсу та енергії J_{ji} , \vec{P}_{ji} та E_{ji} антисиметричні за нижніми індексами. З даних рівнянь слідує рівняння для параметрів, які відносяться до середовища в цілому: $\rho = \sum_i \rho_i$ - густини, $\vec{v} = (1/\rho) \sum_i \rho_i \vec{v}_i$ - середньомасової (барицентричної) швидкості, $E = (1/\rho) \sum_i \rho_i E_i$ -

питомої енергії середовища, котрі вже не вміщують інтенсивностей міжфазних взаємодій (які можуть мати досить складну структуру важку для моделювання), хоча і вміщують доданки з дифузійними швидкостями фаз $\vec{w}_i = \vec{v}_i - \vec{v}$ та величинами, що характеризують окремі фази. Тому рівняння для середовища в цілому є більш простими, але й більш загальними завдяки чому можуть досить повно описувати динаміку середовища в цілому.

Вищесказане дозволяє запропонувати наступну методику моделювання багатофазного середовища, яка відбиває шлях поступового наближення до повного, але досить складного опису через більш прості етапи. Спочатку, користуючись спрощувачими припущеннями відносно доданків, які містять величини, що належать до окремих фаз, розв'язуються рівняння для середовища в цілому. Якщо отриманої інформації виявляється недостатньо, ці рівняння доповнюються ще деякою кількістю рівнянь для окремих фаз (від однієї до $n-1$). Кількість додаткових рівнянь визначається необхідною ступінню деталізації опису процесу та можливостями виконання необхідних обчислень (здебільшого технічними можливостями використовуваної обчислювальної техніки).

В металургійному виробництві часто зустрічаються газорідинні середовища з розплавом в якості несучої рідини, яка містить різноманітні газові включення. Через те, що густина газів на декілька порядків менша за густину рідин дуже добрим наближенням за цих умов буде "вакуумне" наближення, якому відповідає нульовий порядок по відношенню густин газу та рідини. Хай індекс 1 відноситься до рідинної фази, 2 - до газової й відомі істинні густини кожної з фаз ρ_i^0 , тобто відношення маси фази до займаемого нею об'єму, а густини фаз в середовищі визначаються за допомогою об'ємної частки α газової фази в середовищі: $\rho_1 = \rho = (1 - \alpha) \rho_1^0$, $\rho_2 = \alpha \rho_2^0$. В розглядаємому наближенні $\vec{w}_1 = 0$, $\vec{w}_2 = \vec{w}$. Істинна густина газової фази визначається рівнянням стану $\rho_2^0 = \rho_2^0(p, T)$. Рівняння руху газорідинного середовища в "вакуумному" наближенні мають вигляд:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} p + \mu \Delta \vec{v} + (\zeta + \mu/3) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{g}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}) + (J_{12} - \alpha \frac{d_2 \rho_2^0}{dt}) / \rho_2^0, \quad (2)$$

де $d/dt = \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \vec{\nabla}$ - субстанційна похідна вздовж \vec{v} , а d_1/dt -

вздовж \vec{v}_1 , μ та ζ - динамічна та друга в'язкості середовища, \vec{g} - прискорення вільного падіння. Вони доповнюються рівнянням переносу газової фази:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{v}) = - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}) + (J_{12} - \alpha \frac{d_2 \rho_2^0}{dt}) / \rho_2^0. \quad (3)$$

Дифузійна швидкість газової фази \vec{w} може бути вибратна у конкретних випадках вихордячи з експериментальних даних. Рівняння теплопереносу для середовища в цілому у припущенні його локальної рівноважності та наближенні $\lambda_2 / \lambda_1 \rightarrow 0$ має вигляд:

$$(1 - \alpha) \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot [a_1 \frac{2(1 - \alpha)}{2 + \alpha} \vec{\nabla} T] + Q / C_1 \rho_1^0, \quad (4)$$

де $a_1 = \lambda_1 / C_1 \rho_1^0$ - температуропровідність розплаву.

Ще одним важливим прикладом двофазного середовища, який досить часто зустрічається в процесі виробництва сталі, є твердо-рідинне середовище з твердими включеннями у вигляді рухомих частинок (суспензія). Несучою рідиною тут може виступати розплав сталі, частинками - різноманітні неметалеві включення, розкислювачі, лігуючі та інші матеріали. Досить добрим за цих умов є припущення невеликої об'ємної частки твердої фази. Хай індекс 1 відноситься до рідини, а 2 - до дисперсної твердої фази, об'ємну частку якої позначасмо як β . У лінійному по β наближенні $\rho_1 = (1 - \beta) \rho_1^0$, $\rho_2 = \beta \rho_2^0$, $\rho = (1 - \beta) \rho_1^0 + \beta \rho_2^0 = \rho_1^0 (1 - \beta \gamma)$, де введені позначення: $x = \rho_2^0 / \rho_1^0$, $\gamma = 1 - x$. Рівняння руху суспензії в нашому випадку мають вигляд:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = - \vec{\nabla} p + \mu \Delta \vec{v} + (\zeta + \mu/3) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{g} - \rho_2^0 \nabla^k (\beta \vec{w}_2 w_2^k), \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \gamma [- \vec{\nabla} \cdot (\beta \vec{w}_2) + J_{12} / \rho_2^0], \quad (6)$$

і доповнюються рівнянням переносу твердих частинок:

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\beta \vec{v}) = - \vec{\nabla} \cdot (\beta \vec{w}_2) + J_{12} / \rho_2^0 \quad (7)$$

Дифузійна швидкість твердої фази \vec{w}_2 , як і газової, може бути вибрана постійною, що відповідає наближенню нехтування інерційними властивостями частинок дисперсної фази. Якщо для газових пазирів це безумовно виправдано, то для твердих частинок врахування інерційності у певних випадках необхідне. Випадкова (турбулент-

на) складова дифузійної швидкості твердої фази має вигляд $\vec{w}_2^d = -(D/\beta) \vec{\nabla} \beta$ (D - ефективний коефіцієнт турбулентної дифузії), а колективна складова знаходиться з рівняння руху твердої фази. Це рівняння можна одержати з рівнянь руху для окремих частинок шляхом їх підсумування по ансамблю частинок. Такий підхід для колективної швидкості \vec{v}_2^c твердої фази призводить до рівняння:

$$(C_A + x) \frac{d_2 \vec{v}_2^c}{dt} = -y \vec{g} + \vec{f}_D - x \frac{J_{12}}{\beta \rho_2^c} \vec{v}_2^c, \quad (8)$$

де C_A - коефіцієнт приєднаної маси і \vec{f}_D - питома сила опору, яка дається виразом:

$$\vec{f}_D = - (C_{1D} v_1 \frac{v_{21}^2}{d^2} + C_{2D} \frac{v_{21}^2}{d}) \vec{n}_{21}, \quad (9)$$

де C_{1D} і C_{2D} - коефіцієнти опору і d - середній розмір частинок дисперсної фази. Рівняння теплопереносу для розглядаємої суспензії в локально-рівноважному випадку має вигляд:

$$[C_1(1 - \beta) \rho_1^o + C_2 \beta \rho_2^o] \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot [\lambda_1 (1 - 3\beta \lambda_{12}) \vec{\nabla} T] + Q - \rho_2^o \nabla^k [\beta (E_2 - E_1) w_2^k], \quad (10)$$

де $\lambda_{12} = (\lambda_1 - \lambda_2) / (2\lambda_1 + \lambda_2)$.

З (2), (6) слідує, що рух як газо-рідинного, так і твердо-рідинного середовищ несоленоїдальний. Формула (6) свідчить про те, що навіть в разі нестисливості окремо кожної з фаз і відсутності фазових перетворень рух суспензії у загальному випадку може бути несоленоїдальним при відмінності від нуля дифузійної швидкості дисперсної фази \vec{w}_2 і нерівності густин фаз.

Дисперсні рідинні фази внаслідок їх нестисливості та відносно великої густини розглядаються аналогічно дисперсним твердим фазам. Для середовищ з декількома дисперсними газовими, рідинними, або твердими фазами рівняння гідродинаміки та тепломакопереносу отримані шляхом узагальненням рівнянь, наведених вище.

У третій главі розроблено багатофазну нерівноважну модель кристалізації, яка враховує рух дрібнодисперсних кристалів у плинній зоні та незалежний перенос домішок у дендритному каркасі.

Експериментальні дані (Б.Б.Гуляєв) свідчать, що область тверднення можна поділити на п'ять зон, які якісно відрізняються

між собою за характером перебігаючих в них теплофізичних процесів: рідинну зону; зону рухомих кристалів, в якій розплав рухається вільно разом зі зваженими в ньому кристалами; зону живлення, в якій кристали нерухомі і утворюють жорсткий дендритний каркас, але розплав ще має змогу крізь нього фільтруватись; зону вкрапленого розплаву, в якій ще не застиглий розплав розбивається на окремі ізольовані об'єми внаслідок чого губить здатність до переміщення; тверду зону. Зона рухомих кристалів, зона живлення та зона вкрапленого розплаву відрізняються тим, що в них одночасно існують як рідинна, так і тверда фази, а тому вони разом утворюють двофазну зону. Зона рухомих кристалів та зона живлення розділяються по межі виливасності. Межа, розділяюча зону живлення і зону вкрапленого розплаву, носить назву межі живлення. Місце знаходження цих меж визначається багатьма чинниками, як то: швидкістю охолодження зливка, тиском та іншими факторами, серед яких основним є об'ємна густина кристалічної фази ζ . В звичайних умовах тверднення існує критичне значення частки кристалічної фази в розплаві ζ_v , при якій кристали об'єднуються в жорсткий дендритний каркас і стають нерухомими (В.А.Єфімов). Аналогічно цьому межі живлення відповідає значення ζ_c . За характером перебігу гідродинамічних процесів область тверднення поділяється на неплинну і плинну зони з нульовою і відмінною від нуля рідинно-плинністю. Для кристалізації сталі межа рідинно-плинності співпадає з межею виливасності, що і припускається. Плинна та неплинна зони в значній мірі відрізняються особливостями перебігу теплофізичних процесів і потребують різного підходу при побудові математичної моделі.

Через те, що $\zeta_v \approx 0,2$ плинна зона розглядається як суспензія з рухомими кристалами у якості однієї з дисперсних фаз (поряд з домішками) на основі рівнянь, отриманих у другій главі.

Гідродинаміка у неплинній зоні нетривіальна лиш у зоні живлення і характер руху розплаву і домішкових фаз в ній виявляє великий вплив на кінцевий розподіл домішок в зливку, його структуру і якість. Через меншу рухомість розплаву та невелике значення коефіцієнтів дифузії газових фаз та домішок в зоні живлення накопичується їх більше, ніж у плинній зоні. Ще більшою буде їх частка по відношенню до об'єму розплаву α_a^L (а нумерує газові фази) та β_b^L (b нумерує тверді та рідинні домішкові фази), а тому припущення малості α_a та β_b , як і ζ , в зоні живлення і в інших

частинах неплінної зони не робиться. Густина розплаву визначається формулою $\rho_L = \rho_0 \gamma_L$, де $\gamma_L = \gamma + \sum_b \beta_b x_b = 1 - \zeta - \alpha - \sum_b \beta_b (1 - x_b)$, де $x_b = \rho_b^0 / \rho_0$, $\alpha = \sum_a \alpha_a$, $\beta = \sum_b \beta_b$ (індекс L використовується для позначення величин, які належать до розплаву). Величини, які належать до кристалічної фази, поряд з індексом 2 позначаються, також, індексом S , а для об'ємних густин розплаву і кристалічної фази використовуються ще позначення $\varphi_L = \gamma + \alpha + \beta$, $\varphi_S = \zeta$. Основною кінематичною характеристикою розплаву є його середньомасова швидкість $\vec{v}_L = (\gamma \vec{v}_1 + \sum_b \beta_b x_b \vec{v}_b) / \gamma_L$, відносно якої визначаються дифузійні швидкості основної рідинної, газових та домішкових фаз: $\vec{w}_{iL} = \vec{v}_i - \vec{v}_L$.

Швидкість розплаву у дендритному каркасі знаходиться за законом Дарсі, узагальненим на випадок наявності домішкових фаз:

$$\vec{v}_L = - \frac{K(\zeta)}{\gamma_L v'_L} \{ \vec{\nabla} \tilde{p} + [\alpha + \sum_b \beta_b (1 - x_b)] \vec{g} \}, \quad (11)$$

де функція $K(\zeta)$ - проникність зони живлення, $v'_L = \mu_L / \rho_0$, μ_L - динамічна в'язкість розплаву, \tilde{p} - динамічний тиск, поділений на ρ_0 . Тиск в зоні живлення визначається з рівняння:

$$\vec{\nabla} \cdot [K(\zeta) \vec{\nabla} \tilde{p}] = - \vec{g} \cdot \vec{\nabla} \{ (1 - \gamma_L) K(\zeta) \} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{w} - \Psi_L) v'_L, \quad (12)$$

де $\vec{w} = \sum_a \alpha_a \vec{v}_a + \sum_b \beta_b (1 - x_b) \vec{v}_b$, $\Psi_L = - \delta_f \Phi_S + \sum_a \Phi_a + \sum_b (1 - x_b) \Phi_b$ і Φ_i - ефективне об'ємне джерело i -ї фази.

В основу моделі масопереносу в зоні живлення покладається механізм, який впливає з експериментальних досліджень, проведених в ІПЛ АН України. Він полягає у тому, що завдяки капілярним явищам змочуюча рідина втягується в капіляр, а незмочуюча, навпаки, з нього виштовхується. В процесі усадки основний компонент розплаву через кращу змочуємість поверхні кристалів переміщується вздовж дендритного каналу у напрямку до повністю застиглому металу і виштовхує звідти рідину, збагачену лікватами. Ця рідина рухається в напрямку вершин дендритів з швидкістю, порівнянною зі швидкістю фронту кристалізації. Залежність напрямку та швидкості руху домішки від ступеню змочуємість нею дендритного каркасу не враховується в існуючих динамічних математичних моделях кристалізації і в даній роботі врахована вперше шляхом моделювання парціального капілярного тиску на дисперсну фазу, виникаючого в дендритному каркасі.

Величини, що належать додатковим фазам, відрізняються за індексом l , який для газових фаз приймає значення $l = a$, а для домішкових фаз $l = b$. Сили, які діють на одиничний об'єм l -ї фази в зоні живлення, за умови нехтування інерційними та реактивними силами, задовольняють рівнянню:

$$\vec{F}_{Vl} + \vec{F}_{Kl} + \vec{F}_{Ll} + \vec{F}_{Sl} = 0, \quad (13)$$

де $\vec{F}_{Vl} = -\alpha_l \rho_0 (1 - x_l) \vec{g}$ - рівнодіюча об'ємної та архимедової сили, $\vec{F}_{Kl} = -\vec{\nabla} p_{Kl}$ - капілярна сила, де p_{Kl} - парціальний капілярний тиск на l -у фазу і $\vec{F}_{Ll} = -m_l \rho_0 \alpha_l (\vec{v}_l^c - \vec{v}_L)$ та $\vec{F}_{Sl} = -n_l \rho_0 \alpha_l \vec{v}_l^c$ - сили опору руху l -ї фази з боку розплаву та дендритного каркаса відповідно, де m_l та n_l - коефіцієнти опору, а \vec{v}_l^c - колективна складова швидкості l -ї фази. Найпростішим модельним виразом для p_{Kl} є однопараметричний: $p_{Kl} = H_l \alpha_l^L \zeta^2$ з параметром H_l , який враховує структуру дендритного каркасу і ступінь його змочуєності фазою l . Хай $H'_l = H_l / \rho_0$. З (13) слідує:

$$\vec{v}_l^c = [m_l \vec{v}_L - (1 - x_l) \vec{g} - H'_l (2 \vec{\nabla} \zeta + \zeta \vec{\nabla} \ln \alpha_l^L) \phi_S / \phi_L] / (m_l + n_l). \quad (14)$$

Масоперенос газових та домішкових фаз в зоні живлення визначається рівняннями:

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\alpha_l \vec{v}_l^c) = \vec{\nabla} \cdot (\phi_L D_l \vec{\nabla} \alpha_l^L) + \Phi_l. \quad (15)$$

Теплові процеси в плинній і неплінній зонах визначаються рівняннями конвективного теплопереносу, що враховує наявність декількох фаз і тепло фазових перетворень.

У випадку сегрегації, яка є основним механізмом виділення домішок на фронті кристалізації, джерело домішок Φ_b визначається джерелом тверднення Φ_S . Рівняння сегрегації, отримане Флемінгом та Нереем, враховує сумісний фільтраційний рух розплаву та розчинених у ньому домішок крізь дендритний каркас. Узагальнення цього рівняння на випадок врахування руху дрібнодисперсних кристалів виконане Килимником та Самойловичем. Якщо, крім того, врахувати незалежний рух домішок та різну усадку домішок і основного компонента розплаву при твердненні, рівняння сегрегації приймає вигляд:

$$\phi_L \frac{d_L \beta_b^L}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\phi_L D_b \vec{\nabla} \beta_b^L) - \vec{\nabla} \cdot (\beta_b^L \phi_L \vec{v}_L) + \Phi_b$$

ЛІТЕРАТУРА
 ім. П. С. Плетенко
 АН України

$$k_b (1 + \delta_{fb}) \Phi_S - (1 + \delta_{fb}) k_b \varphi_S \frac{\delta \beta_b^L}{\delta t}, \quad (16)$$

де k_b , δ_f та δ_{fb} - коефіцієнти розподілу, фазової усадки розплаву та фази b, $\vec{w}_{bc}^c = \vec{w}_b^c - \vec{v}_L$, $\delta \beta_b^L / \delta t = \xi \partial \beta_b^L / \partial t + \eta \vec{v}_S \vec{\nabla} \beta_b^L$ і $\xi, \eta \in [0,1]$ - параметри, які при максимальній мікросегрегації дорівнюють нулю і одиниці в протилежному випадку.

Отримані однофазне (теплове), двофазне та квазидвофазне наближення до розглядаємої багатофазної нерівноважної моделі кристалізації, які дозволяють встановити відповідність даної моделі більш простим відомим моделям кристалізації.

У четвертій главі розроблено комплекс чисельних методів розрахунку гідродинамічних та теплофізичних параметрів багатофазних середовищ, які враховують такі їх властивості, як несоленоїдальність руху, перебіг фазових перетворень, рух та нестійкість межі поділу фаз. Ці властивості вимагають застосування природних (фізичних) змінних при описі динаміки середовищ, а також розщеплення за фізичними факторами при чисельному розв'язанні відповідних рівнянь.

Після опису використання методу розщеплення в задачах конвективного масопереносу і теплопереносу та гідродинаміки нестисливого середовища викладений наш метод розщеплення за фізичними факторами, узагальнюючий на несоленоїдальний випадок метод розщеплення за фізичними факторами для нестисливої рідини і придатний для опису багатофазного середовища.

Хай заданий вираз для дивергенції барицентричної швидкості середовища на зразок (2) або (6):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = -\phi. \quad (17)$$

Крім цього рівняння для середовища в цілому виконуються ще рівняння нерозривності, руху та теплопереносу, які в загальному випадку записуються з застосуванням скорочуючих позначень:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}), \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = R(\rho, \vec{v}) - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p, \quad \frac{dT}{dt} = P(\rho, \vec{v}, T). \quad (18)$$

Пропонуємо метод чисельного розв'язання системи (17), (18) зводиться до наступної трьохетапної схеми розщеплення:

$$I \quad \vec{\tilde{v}} = \vec{v}^n + \tau R(\rho^n, \vec{v}^n), \quad (19)$$

$$\tilde{T} = T^n + \tau P(\rho^n, \vec{v}^n, T^n), \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \rho^{n+1,0} &= \rho^n, & \vec{v}^{n+1,0} &= \vec{v}^n, \\ p^{n+1,0} &= p^n, & T^{n+1,0} &= \tilde{T}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{II} \quad T^{n+1,k+1} = \tilde{T} - \tau \vec{v}^{n+1,k} \cdot \vec{\nabla} T^{n+1,k}, \quad (22)$$

$$\rho^{n+1,k+1} = \rho^n - \tau \vec{\nabla} \cdot (\rho^{n+1,k} \vec{v}^{n+1,k}), \quad (23)$$

$$p^{n+1,k+1} = p^{n+1,k} +$$

$$\omega (\vec{\nabla} \cdot [(1/\rho^{n+1,k}) \vec{\nabla} p^{n+1,k}] - (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}^{n+1,k} + \phi^{n+1,k})/\tau), \quad (24)$$

$$\text{III} \quad \vec{v}^{n+1,k+1} = \vec{v}^{\tilde{v}} - \tau (1/\rho^{n+1,k}) \vec{\nabla} p^{n+1,k}, \quad (25)$$

де τ – крок по часу, ω – ітераційний параметр, f^n – значення функції f на n -му часовому шарі, k – номер ітерації.

На першому етапі знаходиться проміжне значення швидкості $\vec{v}^{\tilde{v}}$, не враховуюче поле тиску (19), і температури \tilde{T} , не враховуюче конвективну складову теплопереносу (20). Крім того, визначаються вихідні на даному часовому кроці значення полів ρ , \vec{v} , p і T (21). Другий і третій етапи виконуються в ітераційному циклі по k . На другому етапі знаходяться значення T (22), ρ (23) і p (24). Рівняння для тиску (24) отримане з умови виконання на $n+1$ -му часовому шарі умови (17). Тому швидкість, яка знаходиться на третьому етапі (25) за допомогою поля тиску, знайденого з рівняння (24), вже буде задовольняти умові (17). Розщеплення рівняння теплопереносу дозволяє розрахунок дифузійної складової теплопереносу виконувати за явною схемою і винести з ітераційного циклу, залишивши там розрахунок конвективної складової, небезпечний з точки зору стійкості. Аналогічно теплопереносу в схемі (19)–(25) може бути розглянуто і масоперенос окремих фаз.

Метод розщеплення за фізичними факторами виявився плідним, також, в задачах з наявністю поверхні поділу фаз. Ідея його застосування в цих умовах полягає у відщепленні тих фізичних процесів, що спільні для всіх, або деякої кількості фаз (вони можуть відрізнятися для кожної з фаз лише числовими значеннями фізичних параметрів). Тоді рівняння, що описують ці процеси, будуть справедливими на всій області, зайнятій середовищем (або області, зайнятій тими фазами, для яких описуємі процеси є спільними). Ті ж фізичні процеси, які притаманні тільки окремим фазам, додатково розглядаються тільки в областях, ними зайнятих.

Реалізація цієї ідеї для опису руху рідини з вільною поверхнею дозволила створити новий ефективний чисельний метод (КЕМ) розв'язання рівнянь гідродинаміки в таких умовах. Цей метод є ейлеровим й консервативним і легко узагальнюється на випадок вільних поверхонь поділу декількох рідинних або газових фаз. Розглянутий в роботі варіант КЕМ використовує припущення, що рівняння стану середовища має вигляд: $p = \text{const}$ при $\gamma = 1$; $p = \text{const}$ при $\gamma < 1$, де γ - об'ємна частка рідини. Внаслідок цього рівняння руху середовища розпадається на дві системи рівнянь:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nu \Delta \vec{v} + \vec{g} - \nabla p', \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad \text{при } \gamma = 1, \quad (26)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}, \quad p = \text{const}, \quad \text{при } 0 < \gamma < 1. \quad (27)$$

де $p' = p/\rho_0$. Вони доповнюються рівняннями:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma \vec{v}) = 0, \quad (28)$$

в залежності від результатів розв'язання якого область інтегрування розбивається на три зони: рідинну з $\gamma = 1$, де виконуються рівняння (26), вакуумно-рідинну з $0 < \gamma < 1$, для якої справедливі рівняння (27), та вакуумну з $\gamma = 0$. Можливість опису динаміки вакуумно-рідинної зони, передбачена в КЕМ, дозволяє при чисельній реалізації КЕМ забезпечити консервативність різницевої схеми. Згідно запропонованої схеми просторового розщеплення за фізичними факторами рівняння руху середовища в усіх зонах можуть бути представленими у вигляді єдиної системи рівнянь:

$$I \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{v}^n + \tau \{ - (\vec{v}^n \cdot \nabla) \vec{v}^n + \nu \Delta \vec{v}^n + \vec{g} \}, \quad (29)$$

$$II \quad \Delta p'^{n+1} = \frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{v}}{\tau}, \quad (30)$$

$$III \quad \vec{v}^{n+1} = \vec{v} - \tau \vec{\nabla} p'^{n+1}, \quad (31)$$

причому рівняння (29) - (31) розв'язуються в зонах, де присутня рідина (з $\gamma \neq 0$), а рівняння для тиску (30) - тільки в зоні, цілком заповненій рідиною (з $\gamma = 1$). Таким чином, рівнянням (31) забезпечується соленоїдальність руху середовища тільки в її рідинній частині.

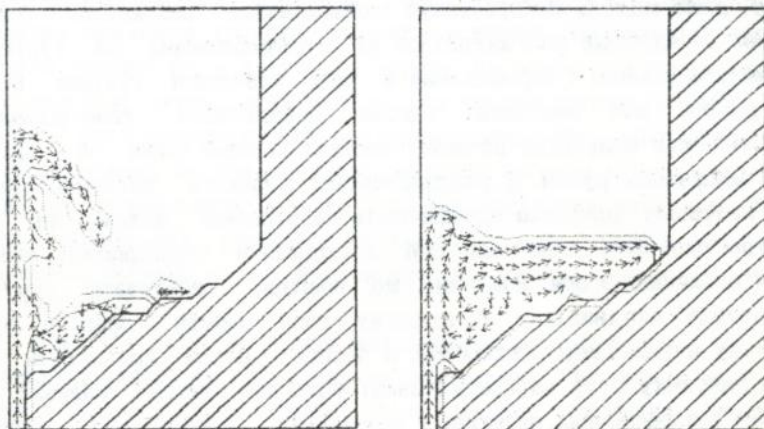
Для успішного застосування КЕМ було розроблено бездифузійний метод (БМ) розв'язання рівняння переносу рідкої фази (28) з подавленням сіткової дифузії, який може використовуватись і в інших випадках.

Глава завершується описом та обґрунтуванням методу просторового розщеплення для тверднучого зливка, який дозволяє виконувати розрахунки спряжених гідродинамічних та теплофізичних процесів в усіх зонах тверднучого зливка. В основу методу покладено, з одного боку, запропоновану багатофазну нерівноважну модель кристалізації, з іншого боку, ідею просторового розщеплення за фізичними факторами, що і дозволило створити ефективний алгоритм розрахунку, здатний бути реалізованим на сучасних ПЕОМ.

Глави 5 - 7 присвячені дослідженням багатофазних середовищ у конкретних процесах ковшової обробки та розливки сталі з метою вдосконалення технологічних режимів.

У п'ятій главі з використанням розроблених методів і моделей виконано дослідження гідродинамічних та теплофізичних процесів у газо-рідинних середовищах, маючих місце в задачах ковшової обробки і розливки сталі.

Починається глава з розгляду тестових задач, для яких існують або аналітичні розв'язки (вільне падіння краплі, розповсюдження гравітаційної хвилі у мілкому басейні), або дані експериментів, чи розрахункові дані, отримані іншими методами (падіння краплі у басейн, наповнення виливниці сифоном). За допомогою цих задач доводиться а) кількісна адекватність КЕМ при описі характеристик руху рідини та поведінки вільної поверхні для процесів



Мал.1. Розрахункова динаміка початкового етапу наповнення виливниці.

з невеликими деформаціями вільної поверхні та б) якісна адекватність КЕМ при описі процесів з бурхливою поведінкою вільної поверхні, пов'язаною з утворенням заплесків, бризок і т. ін.

Далі цей метод застосовується для розгляду задачі чисельно-го вивчення початкового етапу сифонного наповнення виливниці розплавом. Шляхом порівняння з даними фізичного моделювання доведено кількісну й якісну адекватність основаної на КЕМ математичної моделі опису початкового етапу наповнення виливниці сифоном, яка враховує, також, процеси теплопереносу і кристалізації розплаву біля стінок і дна виливниці. Використання створеної моделі дає можливість оптимізувати донну частину виливниці та швидкість розливки металу. За її допомогою проведено чисельні дослідження початкового етапу наповнення виливниці сифоном різними способами – звичайним (фрагменти якого подані на Мал.1) та безнапорним (з литниковою системою, що розширюється). Результати цих досліджень дають підстави стверджувати, що безнапорний спосіб, крім того, що є більш швидким, більш прийнятний, оскільки виключає такий фактор утворення дефектів донної частини зливка, як фонтанування та бризкоутворення.

Вивчення газо-рідинних середовищ без виділеної межі поділу фаз починається з розгляду простої математичної моделі наповнення виливниці згори, яка враховує інжекцію повітря струменем розплаву. Дана модель використовує соленоїдалне наближення (газо-рідинне середовище розглядається як стратифікована за густиною нестислива рідина) і справедлива в разі невеликої густини несучої рідини, або невеликих глибин проникнення газо-рідинного струменя, при невеликих об'ємних частках газової фази та нехтуванні міжфазним рухом. З використанням широкого експериментального матеріалу доведена адекватність розробленої моделі, за допомогою якої проведено чисельні дослідження теплофізики наповнення виливниці згори. Показано, що повітря, інжектване струменем металу, кардинально, на якісному рівні змінює характер руху розплаву в виливниці (наприклад, в певних умовах призводить до зміни напрямку руху на протилежний) через що суттєво впливає на перебіг теплофізичних процесів у виливниці і обов'язково повинно враховуватись при математичному моделюванні. Інжектване струменем повітря помітно зменшує дію струменя на дно виливниці, особливо на заключних стадіях наповнення.

Розглянута модель не враховує такої суттєвої властивості

середовища газ-розплав, як ефективна стисливість, що має місце внаслідок досить великої густини розплаву, значних міжфазних швидкостей, наявності джерел газової фази і т.ін. Наприклад, пупир газу, який спливає від дна ковша до поверхні розплаву, збільшується в об'ємі приблизно втричі, що збільшує об'ємний коефіцієнт газовміщення α і змінює гідродинамічні параметри руху.

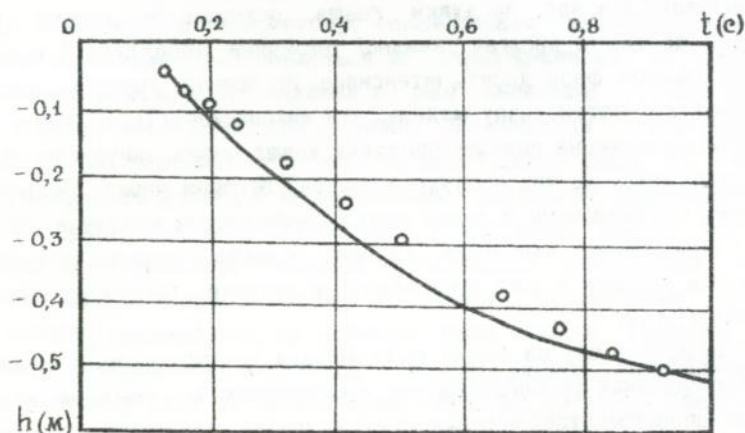
Розглянуто два способи опису стисливості газо-рідинних середовищ. Перший спосіб дозволяє враховувати ефект стисливості з точністю до першого порядку за коефіцієнтом газовміщення α , тобто в припущенні слабкої стисливості, а також за умови нехтування впливом міжфазної швидкості та сторонніх джерел газової фази на соленоїдальність руху середовища в цілому. Цей спосіб застосовано для розгляду гідродинаміки розплаву в ковші під час його наповнення та продувки через шибєрний затвор, причому у випадку продувки враховується відносна швидкість газової та рідкої фаз, правда в припущенні її малості. У другому способі, завдяки застосуванню розробленого методу розщеплення за фізичними факторами для ефективно стисливих середовищ, немає обмежень на ступінь ефективної стисливості середовища, що дозволяє, наприклад, зняти обмеження на швидкість міжфазного руху, яке має місце у першому способі, явно описати джерела газової фази і т.ін. Ці можливості роблять другий спосіб особливо корисним при вивченні гідродинаміки розплаву під час продувки ковша, оскільки в даному разі міжфазна швидкість досягає значної величини (порядку 1 м/с) і джерело газової фази досить інтенсивне. На основі другого способу розроблено математичну модель, яка використовується для чисельного дослідження режимів продувки ковша через занурюєму фурму. Встановлено, що при продувці розплаву аргоном через занурюєму фурму оптимальними з точки зору перемішування металу в 350-т ковші і запобігання утворення газових каналів (через які може втрачатись порошок у разі його подачі) є витрати аргону у межах 60 - 80 м³/год.

У шостій главі на основі моделювання теплофізичних процесів у твердо-рідинних та багатофазних середовищах, що мають місце у задачах позаагрегатної обробки сталі в ковші, отримано рекомендації з вдосконалення режимів обробки.

На прикладі розгляду процесу вводу матеріалів у ківш при пульсаційній обробці металу вивчається випадок твердо-рідинного середовища (без газових включень). Побудовано математичну модель

процесу. Шляхом співставлення з даними фізичного моделювання доведено кількісну і якісну адекватність моделі в описі гідродинамічної частини задачі для широкого кола режимів пульсаційної обробки. Так характер утворення і динаміки руху тороїдного вихору, отримані в розрахунку, повністю співпадають з отриманими в експериментах, а кількісні характеристики поля швидкостей співпадають з експериментальними з точністю не гірше 5%. Про адекватність моделі свідчить і той факт, що зафіксовані в чисельних дослідженнях місце і напрям обертання дрейфового вихору у верхній частині ковша зати́м були підтверджені на фізичній моделі. Адекватність моделі в описі переносних процесів доведена шляхом співставлення розрахункових та експериментальних даних, отриманих на фізичній моделі, які стосуються динаміки плями туші, що виштовхується з патрубку пульсаційної установки. Результати такого співставлення, подані на Мал.2, свідчать про адекватність моделі в описі переносних процесів не гіршу за 10%.

На основі розробленої моделі (шляхом її розширення) створено математичну модель перебігу теплофізичних процесів в ковші при вводі в нього через патрубок пульсаційної установки легуючих матеріалів. Модель враховує процеси фазового перетворення вводимих матеріалів і подальшого переносу результатів їх плавлення. За допомогою цієї моделі (на прикладі феросиліцію ФС75) вивчена



Мал.2. Залежність глибини проникнення плями туші від часу. Крива — розрахунок, кільця — експеримент.

динаміка засвоєння легуючих добавок при вводиті їх через патрубок пульсаційної установки разовою порцією. Показано, що визначальною для переносу, розплавлення та засвоєння легуючих добавок є динаміка тороїдного вихору, що утворюється в процесі пульсаційного впливу на метал. При введенні в розплав добавок, які легші за метал, для оптимізації режиму їх плавлення і засвоєння доцільно забезпечити такий характер пульсаційної дії, який відповідає утворенню найбільш інтенсивного тороїдного вихору. При цьому, по-перше, буде виконуватись умова плавлення домішок під поверхню розплаву, оскільки вони, всмоктуючись у вихор, будуть утримуватись ним до повного розплавлення, а не спливати на поверхню, по-друге, буде швидше відбуватись усереднення результатів плавлення домішок по об'єму ковша.

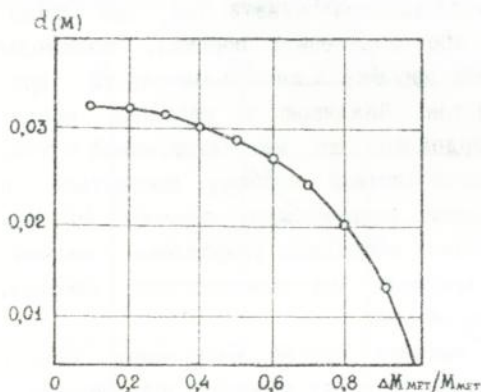
Вивчення процесу засвоєння матеріалів, що вводяться інжекційним способом, вимагає розгляду багатofазного, а до того ж і ефективно стисливого середовища, яке складається з рідинної несучої фази розплаву металу, газової фази інертного газу, вдуваного через фурму разом з порошком, твердої дисперсної фази частинок вдуваного порошку, рідинної дисперсної фази продуктів плавлення порошку, яка може ще далі перетворюватись. Між цими фазами виникає взаємодія на фізичному та хімічному рівнях, котру при повному розгляді також необхідно враховувати. Так, іде фазове перетворення (розчинення або плавлення) порошку, взаємодія продуктів фазового перетворення порошку з киснем металу та процес розчинення їх в розплаві і т.ін. Важливою є проблема врахування взаємодії газової та твердої фаз, що має практичний сенс, оскільки захоплена газовою фазою частина порошку виноситься в атмосферу і втрачається. На основі розвиваємого підходу до чисельного моделювання багатofазних середовищ розроблено математичну модель, яка комплексно враховує всі вищезначені процеси. Доведено адекватність створеної моделі.

З її допомогою чисельно вивчено процес науглення металу порошком графіту. Отримані залежності втрат порошку від параметрів процесу, зокрема, фракційного складу порошку, інтенсивностей подачі порошку та аргону і т.ін. Показано, що для уникнення втрат графіту через поверхню розплаву розміри його частинок не повинні перевищувати 0,2 мм при витратах аргону 40 - 70 м³/год, порошку 70 кг/хв і вологості порошку не більше 1%.

Розроблену загальну модель застосовано, також, до вивчення

процесів вводу у 350-т ківш порошку силікокальцію СК30. Отримано, що час плавлення порошку силікокальцію фракції 0,4 мм в розплаві складає приблизно 0,1 с, що збігається з даними інших авторів. Встановлено, що основна частина кальцію засвоюється розплавом за час спливання рідкого кальцію в околі фурми від місця плавлення силікокальцію (трохи вище нижнього зрізу фурми) до глибини $\sim 1,2$ м, де кальцій випаровується, причому найбільш інтенсивно процес засвоєння перебігає не в безпосередній близькості від фурми, а на відстані від неї, яка складає приблизно півтора радіуса фурми. Встановлено, також, що деякому збільшенню ефективності засвоєння кальцію сприяє підвищення інтенсивності продукви Ψ_a при виконанні умови $\Psi_a < 80 \text{ м}^3/\text{год}$.

Глава завершується розглядом задачі вводу в розплав в період наповнення ковша твердої шлакоутворюючої суміші (ТШС), яка складається з 80% вапна (CaO) та 20% плавикового шпату (CaF_2). Розроблено математичну модель перебігу теплофізичних процесів у ковші при подачі ТШС, яка враховує захоплює струменем розплаву повітря, колективний рух та дифузійне плавлення ТШС з урахуванням її інерційних властивостей (у двошвидкісному підході), а також перенос результатів плавлення ТШС. Це вимагає застосування розробленого колективного підходу до опису динаміки твердої фази



Мал.3. Розрахункова залежність фракції кусків вапна в ТШС, які встигають розплавитись до кінця наповнення ковша, від ступеня наповнення ковша на час її введення під струмінь розплаву.

в розплаві у повному обсязі. Показано, що модель адекватно описує процес формування синтетичного шлаку з ТШС.

За допомогою розробленої моделі вивчена залежність ефективності впливу ТШС від її фракційного складу, часу та місця вводу. Аналіз гідродинамічної картини процесу дозволив виявити, що оптимальним місцем вводу ТШС є місце під струменем розплаву. Через

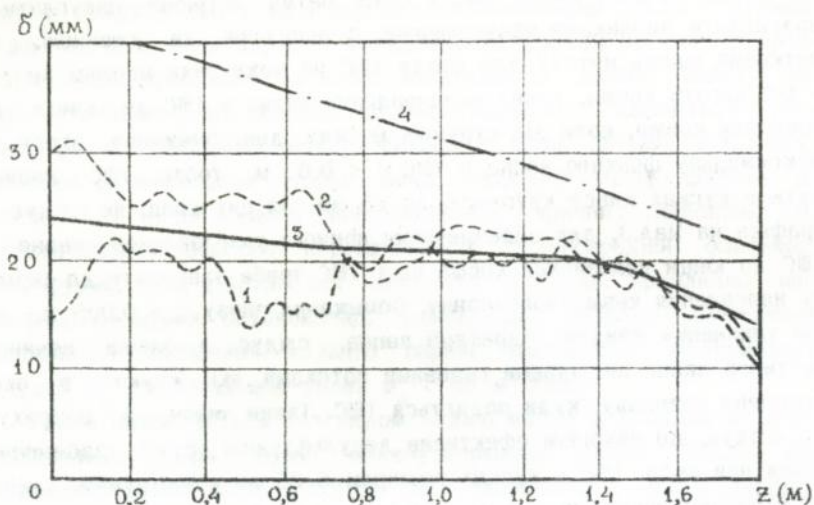
те, що до початку вводу ТШС у ковші метал потрібно навуглити і розкислити добавками навуглювачів, феросплавів та алюмінію, початковий рівень металу для вводу ТШС не може бути меншим за $1/5 - 1/3$ висоти ковша. Умова розплавлення вапна з ТШС до кінця наповнення ковша, коли діє струмінь металу, дає обмеження згори на максимальну фракцію вапна в ТШС $d < 0,03$ м, тобто ТШС повинна бути в кусках класу крупності до 25 мм. За цих умов, як слідує з графіка на Мал.3, для забезпечення повного розплавлення вапна з ТШС до кінця наповнення ковша ввід ТШС треба завершити до моменту наповнення ковша наполовину. Обмеження знизу $d > 0,005$ м, окрім уникнення швидкої гідратації вапна, слідує з умови невиносу частинок вапна висхідними газовими потоками, які існують в околі струменя розплаву, куди подається ТШС. Таким чином, з розрахунків слідує, що найбільш ефективна десульфурація сталі забезпечується при вводі ТШС в кусках розміром 5–25 мм під струмінь металу в процесі наповнення ковша на $1/3 - 1/2$ його висоти. Результати розрахунків кореспондують з промисловими даними з рафінуючої здатності ТШС.

У сьомій главі на основі моделювання тепломасопереносних процесів у виливниці, пов'язаних з фазовим перетворенням кристалізації сталі, отримано рекомендації з вдосконалення режимів розливки сталі, а також виконано дослідження динаміки рухомих кристалів та домішок в тверднучому зливку.

Розроблено математичну модель гідродинамічних та теплопереносних процесів, а також процесів кіркоутворення під час наповнення виливниці сифоном. Шляхом порівняння розрахункових даних з даними фізичного моделювання гідродинаміки наповнення та експериментальними даними щодо товщини кірки металу, яка утворюється за час наповнення 6-тонного зливка сифоном (Мал.4), доведено адекватність запропонованої математичної моделі.

Для 8-тонного зливка проведені чисельні дослідження безнапорного способу наповнення виливниці сифоном у порівнянні зі звичайним. Показано, що найкращим з точки зору рівномірності утворення кірки металу по висоті виливниці під час її наповнення і запобігання, таким чином, утворення ризикованих з точки зору можливого тріщиноутворення місць є швидкісний безнапорний спосіб наповнення. Отримані розрахунки підтверджуються даними промислових випробувань.

Розроблено математичну модель гідродинамічних, тепло та ма-



Мал.4. Залежність товщини кірки, яка утворилася за час наповнення виливниці, від висоти: експериментальні криві (за В.О.Сфімовим) на гранях зливка, розташованих 1 - навпроти і 2 - за центральною; 3 - розрахункова крива за нашою моделлю; 4 - розрахункова крива, отримана без врахування гідродинамічної дії струменя.

сопереносних процесів, процесів тверднення розплаву та плавлення стрижня під час наповнення виливниці з шлакоутворюючим стрижнем з легкоплавкого рафінуючого матеріалу, який перед розливкою устатковлюється на осі виливниці. Доведена адекватність розробленої моделі.

Проведені чисельні дослідження наповнення 8-тонного зливка зі стрижнями різних технологічно обумовлених мас. Отримана залежність форми кірки металу, котра утворюється під час наповнення на стінках виливниці, а також втрат шлакоутворюючого матеріалу стрижня від маси стрижня. Встановлено, що при масі стрижня, яка складає 1% від маси зливка, втрати шлакоутворюючого матеріалу складають більше 50% і рафінуюча дія стрижня на етапі тверднення незначна. Знайдено, що найбільш раціональним з точки зору економії шлакоутворюючого матеріалу і забезпечення якості зливка є стрижень з масою, що складає близько 4% від маси зливка. При цьому втрати матеріалу стрижня на етапі наповнення не перевищують 10%.

Запропоновано математичну модель, яка враховує рухомість кристалів в рідинно-твердій зоні і якісно правильно описує початковий етап кристалізації сталевого зливка. Модель дозволяє прослідкувати динаміку початкового етапу формування конуса осадження. Чисельні експерименти за допомогою розробленої моделі показали суттєву залежність динаміки кристалізації від кінетичного рівняння, а також від величини частки твердої фази, яка обумовлює межу виливності, що вимагає більш точного визначення цих факторів.

На основі розробленого методу просторового розщеплення за фізичними факторами для тверднучого зливка запропоновано математичну модель переносу домішок у дендритному каркасі, яка враховує фільтраційний рух домішкових фаз в залежності від ступеня змочуваності ними дендритного каркасу. Використання розробленої моделі у чисельних експериментах довело її якісну адекватність розглядаємому процесу і виявило ті параметри моделі (а саме: характеристики геометрії дендритного каркасу та ступеня його змочуваності розглядаємою домішкою; коефіцієнт розподілу домішки), визначення яких дає змогу досягти кількісної адекватності при вивченні процесів фільтраційного переносу конкретних домішок (вуглецю, сірки і т.ін.). Показано, що затримка у фільтраційному русі домішки призводить до виникнення локального максимуму її концентрації, що відповідає місцю розташування ліквідаційних смуг.

Основні наукові висновки та практичні результати роботи можна коротко сформулювати наступним чином:

1. Через нестійкість траєкторій руху та турбулентні ефекти при ковшовій обробці та розливці сталі тверді частинки слід розглядати як статистичний ансамбль, з урахуванням взаємодії з газовою фазою (в разі її присутності). Це може бути зроблено на основі розробленої в дисертації колективної моделі опису руху дисперсної твердої фази в рідині.

2. Для багатофазних середовищ, які мають місце у сталеплавильному виробництві (середовище газ-розплав, суспензія на основі розплаву та ін.), характерними і досить точними є наближення: вакуумне та малих об'ємних густин домішкових фаз з застосуванням яких отримано рівняння, що використовуються для чисельних досліджень таких середовищ.

3. Багатофазна нерівноважна модель кристалізації враховує експериментально виявлений при кристалізації сталевого зливка

рух дрібнодисперсних кристалів у плинній зоні, а також перенос домішок у неплинній зоні не тільки завдяки їх сумісному фільтраційному руху крізь дендритний каркас разом з ще не застиглим розплавом, але й завдяки незалежному руху кожної з домішкових фаз під дією парціального тиску, виникаючого внаслідок різного ступеня змочуєності дендритного каркасу різними фазами, що не враховується в існуючих моделях кристалізації. Дана модель здатна досить повно описати процес тверднення сталі, в тому числі й такі його аспекти, як формування конусу осадження, ліквідаційних смуг та ін.

4. Розроблений комплекс нових ефективних чисельних методів розв'язання рівнянь гідродинаміки та тепломасопереносу у багатофазних середовищах дозволяє враховувати такі властивості багатофазних середовищ, як несоленоідальність руху, перебіг фазових перетворень, рух та нестійкість межі поділу фаз (як газ-рідина, так і рідина-тверде тіло), тощо.

5. Основана на консервативному ейлеровому методі математична модель опису початкового етапу наповнення виливниці сифоном адекватна вивчаємому процесу. Використання даної моделі дає можливість оптимізувати донну частину виливниці та швидкість розливання металу. Результати чисельних досліджень за допомогою розробленої моделі дають підстави стверджувати, що безнапорний спосіб розливання, крім того, що є більш швидким, більш прийнятний, оскільки повністю виключає ризик утворення дефектів донної частини зливка, пов'язаних з фонтануванням та бризкоутворенням.

6. Рух середовищ газ-розплав, які мають місце на етапі наповнення виливниці згори, а також наповнення ковша і його продувки (як через шибєрний затвор, так і через занурюєму фурму), адекватно описується комплексом розроблених математичних моделей, котрі з різною кількістю спрощуючих припущень реалізують у конкретних випадках запропоновану загальну модель газо-рідинного середовища. У чисельних експериментах показано, що повітря, інжектоване струменем розплаву, кардинально впливає на перебіг теплофізичних процесів у виливниці та ковші і обов'язково повинно враховуватись при математичному моделюванні. Встановлено, що при продувці розплаву аргонем через занурюєму фурму оптимальними з точки зору перемішування металу в 350-т ковші і запобігання утворення газових каналів (через які може втрачатись порошок у разі його подачі) є витрати аргону у межах 60 - 80 м³/год.

7. Гідродинамічні та тепломасопереносні процеси в ковші при вводі в нього легуючих матеріалів через патрубок пульсаційної установки адекватно описуються розробленою математичною моделлю, яка враховує процеси фазового перетворення легуючих добавок і подальшого переносу результатів їх плавлення. На прикладі розрахунків вводу феросиліцію ФС75 показано, що визначальною для переносу, розплавлення та засвоєння легуючих добавок є динаміка тороїдного вихора, що утворюється в процесі пульсаційного впливу на метал. При введенні добавок, які легші за метал, доцільно забезпечити характер пульсацій, відповідаючий утворенню найбільш інтенсивного тороїдного вихору.

8. Теплофізичні процеси та розподіл добавок в ковші при продувці розплаву інертним газом через фурму з одночасною подачею порошкових матеріалів адекватно описуються розробленою математичною моделлю, яка враховує взаємодію порошкової та газової фаз. Отримані залежності втрат порошку графіту при наугленні металу від фракційного складу порошку, інтенсивностей подачі порошку та аргону і т.ін. можуть служити засобом прийняття рішень з оптимізації технологічних параметрів цього процесу. При вводі у 350-т ківш порошку силікокальцію деякому збільшенню ефективності засвоєння кальцію сприяє підвищення інтенсивності продувки за умови, якщо вона не перебільшує $80 \text{ м}^3/\text{год}$.

9. Теплофізичні процеси у ковші при подачі твердої шлакоутворюючої суміші під час наповнення адекватно описуються розробленою математичною моделлю, яка враховує повітря, що захоплюється струменем розплаву, колективний рух та дифузійне плавлення ТШС і перенос результатів плавлення ТШС. За допомогою розробленої моделі вивчена залежність ефективності впливу ТШС від її фракційного складу, часу та місця вводу. Показано, що найбільш ефективна десульфуратія сталі забезпечується при вводі ТШС в кусках розміром 5–25 мм під струмінь металу в процесі наповнення ковша на $1/3 - 1/2$ його висоти.

10. Гідродинамічні та теплопереносні процеси, а також процеси тверднення розплаву під час наповнення виливниці сифоном адекватно описуються розробленою математичною моделлю кіркоутворення у зливку. Для 8-тонного зливка за допомогою чисельних досліджень показано, що найкращим з точки зору рівномірності утворення кірки металу по висоті виливниці під час її наповнення і запобігання, таким чином, утворення ризикованих з точки зору

можливого тріщиноутворення місць є швидкісний безнапорний спосіб наповнення.

11. Гідродинамічні та тепломасопереносні процеси, процеси тверднення розплаву та плавлення стрижня під час наповнення виливниці з шлакоутворюючим стрижнем адекватно описуються розробленою математичною моделлю. Показано, що при масі стрижня, яка складає 1% від маси зливка, втрати шлакоутворюючого матеріалу під час наповнення складають більше 50% і рафінуюча дія стрижня на етапі тверднення значно знижується. Найбільш раціональним з точки зору економії шлакоутворюючого матеріалу і забезпечення якості зливка є стрижень з масою, що складає близько 4% від маси зливка. При цьому втрати матеріалу стрижня на етапі наповнення складають близько 10%.

12. Результати досліджень теплофізичних процесів на початковому етапі різних режимів наповнення виливниці сифоном, а також залежності процесів кіркутворення від способу та швидкості наповнення виливниці сифоном були використані при освоєнні на Дніпровському металургійному комбінаті (м. Дніпродзержинськ), разом з Дніпродзержинським індустріальним інститутом, технології швидкісної розливки спокійного металу сифоном, яка дозволила зменшити витрати виливниць на 3,7 кг/т та частку браку трубної заготовки на 0,64 %.

13. З використанням результатів чисельного моделювання процесів гідродинаміки розплаву та масопереносу в ньому модифікуючих та рафінуючих добавок, яке виконане у даній роботі, інститутом чорної металургії НАН України розроблені, освоєні та впроваджені у промислову практику металургійного комбінату "Азов-сталь" (м. Маріуполь) ресурсозберігаючі технології позапічного глибокого рафінування сталі кусковою ТШС ефективного складу у наповнюємому та поршковим силікокальцієм у наповненому сталерозливочному ковші.

14. Математичні моделі процесів гідродинаміки та тепломасопереносу при пульсаційній обробці металу в ковші, розроблені у даній дисертаційній роботі, а також отримані за їх допомогою результати чисельного моделювання використовувались при розробці проектної та технічної документації на створення на Дніпровському металургійному комбінаті (м. Дніпродзержинськ) разом з Дніпродзержинським індустріальним інститутом установку пульсаційного перемішування металу в ковші.

Основни результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства. – К.: Наукова думка, 1993. – 220 с.
2. Самохвалов С.Е. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 172 с.
3. Математическая модель заполнения замкнутых объемов, учитывающая инжекцию воздуха / Огурцов А.П., Яковлев Ю.Н., Самохвалов С.Е. и др. // Инжен.- физич. журнал. – 1992. – № 3. – С. 358–363.
4. Самохвалов С.Е. Консервативный эйлеров метод численного исследования гидродинамики жидкости со свободной поверхностью // Инжен.- физич. журнал. – 1994. – № 3 – 4. – С. 228–234.
5. Кривко Е.М., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. Численное моделирование распределения примесей при заполнении ковша металлом // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 11. – С. 15–17.
6. Разработка рационального сортамента ресурсоэкономных изделий для раскисления стали в ковше / Вихлевщук В.А., Вяткин Ю.Ф., Павлюченков И.А., Кондрашкин В.А., Самохвалов С.Е. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1992. – № 2. – С. 12–14.
7. Рубин Л.В., Самохвалов С.Е., Шиш Ю.И. Математическая модель гидродинамических процессов при пульсационном перемешивании металла в ковше // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 1. – С. 12–15.
8. Численное исследование гидродинамики заполнения изложницы сверху с учетом инжекции воздуха / Огурцов А.П., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 1. – С. 16–18.
9. Огурцов А.П., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. Процессы гидродинамики и тепломассопереноса при сифонном заполнении изложницы со стержнем // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 3. – С. 37–39.
10. Математическая модель гидродинамики начального этапа заполнения изложницы сифоном / Огурцов А.П., Миленький И.А., Самохвалов С.Е. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. –

1993. - № 7. - С. 23-26.
11. Самохвалов С.Е., Чернета В.А. Влияние движения мелкодисперсных кристаллов на ход кристаллизации стального слитка // Процессы литья. - 1994. - №2. - С. 80-86.
 12. Математическое моделирование гидродинамики при выпуске металла в ковш из конвертера с учетом инъекции воздуха / Огурцов А.П., Вихлевщук В.А., Самохвалов С.Е. и др. // Сталь. - 1994. - №5. - С. 21-22.
 13. Моделирование кристаллизации слитка с учетом гидродинамики двухфазной зоны / Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Чернета В.А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1995. - № 3. - С. 9-12.
 14. Решение двумерных и трехмерных задач гидродинамики в естественных переменных при сифонной разливке стали / Огурцов А.П., Павлюченков И.А., Полетаев В.П., Самохвалов С.Е. // Физические методы моделирования разливки и кристаллизации стали. - К. - 1990. - С. 11-15.
 15. Численное исследование гидродинамики заполнения изложницы со стержнем / Огурцов А.П., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. и др. // Наука производству. - К.: Вища школа. - 1991. - С. 9-12.
 16. Математическая модель процесса образования корки металла в период заполнения изложницы / Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Полетаев В.П. и др. // Наука производству. - К.: Вища школа. - 1991. - С. 12-15.
 17. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Нерівноважна модель кристалізації // Юбилейный сборник научно-технических трудов. - Днепродзержинск: ДГТУ. - 1995. - С. 291-298.
 18. Самохвалов С.Е. Компьютерне моделювання багатозафазних середовищ // Юбилейный сборник научно-технических трудов. - Днепродзержинск: ДГТУ. - 1995. - С. 298-305.
 19. Никитенко М.І., Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Рівняння сегрегації для незалежного капілярного переносу домішкових фаз у дендритному каркасі // Математичне моделювання. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. - С. 16-20.
 20. Самохвалов С.Е., Шиш Ю.І., Рубін Л.В. Математична модель плавлення та усереднення добавок у ковші при пульсаційному перемішуванні // Математичне моделювання. - Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. - С. 24-28.

21. Віхлевщук В.А., Самохвалов С.С., Толстих Ю.М. Теплофізичні процеси та розподіл добавок у ковші при вдуванні порошків через занурюєму фурму // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – С. 29–35.
22. Самохвалов С.С., Віхлевщук В.А., Толстих Ю.М. Тепломасопереносні процеси у наповнюємому ковші під час подачі твердої шлакоутворюючої суміші // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – С. 36–42.
23. Численное исследование влияния инъекции воздуха струей металла на гидродинамику заполнения ковша / Кулишев В.Л., Огурцов А.П., Павлюченков И.А., Самохвалов С.С. // Совершенствование металлургической технологии в машиностроении. – Волгоград. – 1991. – С. 84–86.
24. Математическая модель тепловой работы патрубка установки пульсационного перемешивания металла в сталеразливочном ковше / Павлюченков И.А., Самохвалов С.С., Ших Ю.И. и др. // Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов. – Мариуполь. – 1991. – С. 92–94.
25. Математическая модель заполнения изложницы / Огурцов А.П., Павлюченков И.А., Самохвалов С.С. и др. // Автоматизация проектирования и управления качеством отливок. – Санкт-Петербург. – 1991. – С. 45–46.
26. Mathematical simulation of heat physical processes of mould filling with the core made of slagforming material / Ogurtsov A.P., Pavluchenkov I.A., Samokhvalov S.E. and others // Heat and mass transfer in technological processes. – Jurmala. – 1991. – P. 59–60.
27. Metal hydrodynamics in the ladle by pulse mixing / Samokhvalov S.E., Shish J.I., Rubin L.V. and others // Heat and mass transfer in technological processes. – Jurmala. – 1991. – P. 92–93.
28. Самохвалов С.С., Миленский И.А. Консервативный эйлеров метод исследования динамики свободной поверхности жидкости // Тепломассообмен и гидродинамика в турбулентных течениях. – Алушта. – 1992. – С. 124–125.
29. Самохвалов С.С., Огурцов А.П., Павлюченков И.А. Методика определения параметров турбулентности в численных экспериментах // Тепломассообмен и гидродинамика в турбулентных течениях. – Алушта. – 1992. – С. 126–127.

30. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Компьютерное моделирование движения кристаллов при объемной кристаллизации // Кристаллизация и компьютерные модели. – Ижевск: Изд-во Удм. унив. – 1994. – С. 61-68.
31. Самохвалов С.Е. Математична модель газо-рідинного середовища / Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – Дніпродзержинськ, 1994. – 10 с. – Деп. № 840. – Ук94 20.04.94.
32. Самохвалов С.Е. Колективна модель розподілу дрібних часток в рідині / Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – Дніпродзержинськ, 1994. – 15 с. – Деп. № 768. – Ук94 18.04.94.
33. Самохвалов С.Е. Математична модель теплофізики багатозафазного середовища на основі рідини / Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. – Дніпродзержинськ, 1994. – 8 с.– Деп. № 767.– Ук94 18.04.94.



Samokhvalov S.E. The Improvement of Regims of Ladle Manufacturing and Spilling of Steel on the Basis of Mathematical Modeling of Thermal Physical Processes in Maltiphase Medias. Dissertation for the scientific degree of Doctor of Science (Eng.). Speciality 05.16.02 - ferrous metals metallurgy, 05.14.06 - technical heat physics, the State Technical University, Dniprodzerginsk, 1995, manuscript, 449 p., 3 tables, 68 figures, bibliogrrapfy - 330 titles.

The complex of efficient mathematical methods has been created and the adequate mathematical models of heat and mass transfer prosses in multiphase medias on the basis of steel melting was developed. Methods which assumes the computer realization and serve as the mean of solving for optimization of technological parameters of ladle manufacturing and solidification of steel with the goal of energy and resource preservation. The created models has been employed for complex reserches of the processes mentioned above. It has been carried out the industreal application of technologies developed with the results, which are received.

Самохвалов С.Е. Усовершенствование режимов ковшовой обработки и разливки стали на основе математического моделирования теплофизических процессов в многофазных средах. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.16.02 - металлургия черных металлов, 05.14.06 - техническая теплофизика, Государственный технический университет, Днепродзержинск, 1995. Рукопись, 449 с., 3 табл., 68 рис., библиогр. 330 назв.

Создан комплекс эффективных математических методов и разработаны адекватные математические модели теплофизических процессов в многофазных средах на основе розплава стали, которые допускают компьютерную реализацию и служат средством принятия решений по оптимизации технологических параметров ковшовой обработки и кристаллизации стали с целью энерго и ресурсосбережения. Созданные модели применены для комплексных исследований указанных процессов. Осуществлено промышленное внедрение технологий, разработанных с использованием полученных результатов.

Ключові слова: ковшова обробка та розливка сталі, теплофізичні процеси, багатофазне середовище, математичне моделювання.

Підписано до друку 20.09.95. Формат 60×84 1/16. об'єм 1,73 ум.
арк. Тираж 120 прим. Зам. 144. Безкоштовно, різнограф ДДТУ.
322618, Дніпродзержинськ, вул. Дніпробудівська, 2.

446011

AB 33.234