

**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

ІВАНОВА ГАННА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 681.5:51-74

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
РЕЖИМАМИ ОХОЛОДЖЕННЯ МЕТАЛУ
МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК**

05.13.07 - Автоматизація процесів керування

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Донецьк – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті прикладної математики і механіки Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, Ткаченко Валерій Миколайович, завідувач відділу теорії керуючих систем, Інститут прикладної математики і механіки НАН України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, Каргін Анатолій Олексійович, декан фізичного факультету, завідувач кафедри «Комп'ютерні технології», Донецький національний університет, МОН України.

кандидат технічних наук, доцент кафедри «автоматизація виробничих процесів» Циганаш Віктор Євграфович, Донбаська державна машинобудівна академія, МОН України.

Захист дисертації відбудеться “ 8 ” квітня 2010р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д11.052.03 Донецького національного технічного університету Міністерства освіти та науки України, за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, т. 304-30-55.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донецького національного технічного університету за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, корп.2.

Автореферат розісланий “ 5 ” березня 2010р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д11.052.03
кандидат технічних наук, доцент

Г.В. Мокрий

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Металургійний комплекс займає одне з важливіших місць в економіці України. В умовах постійного підвищення вартості енергоресурсів, посилення вимог до якості металургійної продукції й екологічної безпеки виробництва існує необхідність впровадження нових технологій виробництва металу. Безперервне розливання забезпечує високий ступінь однорідності заготовок, дозволяє впровадити повну механізацію й комплексну автоматизацію процесу, скорочує цикл металургійного виробництва, поліпшує умови праці й істотно знижує викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Тепловий режим при безперервному розливанні є одним з основних параметрів технологічного процесу. Його порушення може призвести до повної втрати плавки або масового браку злитків, а іноді до серйозних аварій на машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Стабілізація теплового режиму на певному рівні є обов'язковою умовою безаварійної роботи МБЛЗ й отримання якісної продукції. Отже необхідна система керування охолодженням, яка підтримуватиме встановлений температурний графік.

У зв'язку із складністю вимірювань показників теплового стану злитку, виникає необхідність в розробці математичних моделей, що досить повно описують теплові процеси безперервного лиття. Такі моделі засновані на нелінійних диференціальних рівняннях у частинних похідних, містять граничні умови різного роду, а також умови для визначення положення межі фазового переходу і не підлягають аналітичному рішенню. Сучасний розвиток чисельних методів й ЕОМ робить чисельний підхід у рішенні теплових задач для безперервного розливання найбільш привабливим, в першу чергу через те, що вартість чисельних досліджень постійно знижується, а можливості зростають.

Для адаптації моделей теплових процесів до умов виробництва потрібна розробка алгоритмів ідентифікації невідомих параметрів, які є розподіленими в просторі й часі. Останнім часом все більшу актуальність здобувають математичні методи, що дозволяють уточнювати структуру й параметри математичної моделі технологічного процесу тобто вирішувати задачі ідентифікації.

Розробка алгоритмів керування на основі оперативної оцінки теплового стану злитку, яка є результатом розрахунків за адаптивною математичною моделлю, робить можливим побудову найбільш ефективної системи керування процесами охолодження МБЛЗ, що в свою чергу дозволить підвищити якість продукції металургійного виробництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетної теми Інституту прикладної математики і механіки НАН України «Алгебраїчні, комбінаторні, логічні й еволюційні методи дослідження безперервних систем і їхнє

застосування до використання в завданнях ідентифікації та керування» (№ державної реєстрації 0104U00863).

Мета й завдання дослідження. Розробка алгоритмів і методів дослідження теплового стану безперервного злитку, ідентифікації теплофізичних параметрів і керування режимами охолодження в процесах безперервного розливання сталі на основі математичного моделювання.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані й вирішені **наступні задачі:**

1. дослідження особливостей технологічного процесу безперервного розливання сталі на криволінійних машинах безперервного лиття заготовок;
2. розробка математичних моделей квазістаціонарного й нестаціонарного процесів тепло-масоперенесення всередині безперервного злитку й теплопереносу всередині стінок кристалізатора МБЛЗ;
3. розробка чисельних методів рішення квазістаціонарної й нестаціонарної задач із вільною межею, що містять нелінійні диференціальні рівняння в частинних похідних;
4. розробка алгоритмів ідентифікації параметрів зовнішнього теплообміну для початкового й оперативного настроювання математичної моделі;
5. розробка методів і алгоритмів керування режимами вторинного охолодження МБЛЗ;
6. розробка імітаційної моделі для оцінки точності алгоритмів керування.

Об'єкт дослідження: система автоматичного керування процесами охолодження безперервного злитку.

Предмет дослідження: математичні методи моделювання теплового стану, ідентифікація параметрів зовнішнього теплообміну та синтез алгоритмів керування режимами охолодження в процесах безперервного розливання сталі на криволінійних МБЛЗ.

Методи дослідження базуються на положеннях теорії безперервного розливання сталі, рівняннях математичної фізики, чисельних методах рішення задач із невідомою межею для рівнянь у частинних похідних, теорії обернених задач, методах ідентифікації розподілених параметрів, теорії автоматичного керування, методах комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна результатів.

1. Набули подальшого розвитку математичні моделі об'єкта керування, які описують квазістаціонарний та нестаціонарний процеси тепло-масоперенесення в злитку й теплообміну в стінках кристалізатора МБЛЗ із урахуванням комплексу параметрів безперервного розливання, необхідного для розробки системи автоматичного керування охолодженням. Вперше розроблені алгоритми рішення задач тепло-масоперенесення в злитку з визначенням положення межі фазового переходу, що роблять можливим в режимі реального часу отримувати оперативну оцінку теплового стану злитку і використовувати її як на етапі проектування, так і під час роботи САК МБЛЗ.

2. Запропоновані нові методи ідентифікації розподілених параметрів зовнішнього теплообміну, що дозволяють проводити початкове настроювання

коефіцієнта конвективної тепловіддачі на поверхні злитку за допомогою метода найменших квадратів. Для адаптації параметрів моделі теплового стану безперервного злитку в режимі реального часу вперше запропоновані і розроблені алгоритми оперативного настроювання, засновані на методі стохастичної апроксимації.

3. Розроблено нові алгоритми прогнозного керування на основі оперативної оцінки теплового стану безперервного злитку розрахованої за адаптивною математичною моделлю, які забезпечують стабілізацію необхідного температурного режиму, що в свою чергу дозволяє покращити якість металу.

4. Вперше розроблена імітаційна модель об'єкта, що представляє собою програмний комплекс, який відтворює нестаціонарні режими роботи МБЛЗ в умовах випадкових збурювань і керуючих впливів, що розраховуються відповідно із досліджуванним методом. Результатом роботи імітаційної моделі є характеристики точності керування охолодженням в кожній секції ЗВО на етапі розробки САК МБЛЗ.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблені математичні моделі й засноване на них програмне забезпечення дозволяють у режимі реального часу спостерігати теплові процеси, що відбуваються в безперервному злитку й у стінках кристалізатора, вивчати чутливість різних керованих параметрів процесу до змін керуючих параметрів, робити оперативну оцінку теплового стану злитку.

2. Розроблені алгоритми ідентифікації параметрів зовнішнього теплообміну дозволяють визначати коефіцієнти тепловіддачі від поверхні безперервного злитку під час пусково-налагоджувальних робіт, а також у різних робочих режимах.

3. Для режимів вторинного охолодження ЗВО розроблені й програмно реалізовані алгоритми прогнозного керування на основі оперативної оцінки температурного стану безперервного злитку, розрахованої за адаптивною математичною моделлю, які забезпечують стабілізацію температурного режиму, необхідного для одержання якісних злитків.

4. Розроблений програмний комплекс імітаційного моделювання процесу керування вторинним охолодженням дозволяє оцінювати точність керування на етапі розробки САК МБЛЗ.

Результати науково-дослідної роботи, а також розроблене програмне забезпечення, були використані для рішення задач математичного моделювання, параметричної ідентифікації й синтезу алгоритмів керування нестаціонарними процесами тепло-масоперенесення в безперервному злитку ГНПК «Київський інститут автоматики», м. Київ.

Результати досліджень використані при розробці раціональних режимів охолодження й при проектуванні систем керування технологічними процесами МБЛЗ на Нижньотагільському металургійному комбінаті ВАТ «НТМК», м. Нижній Тагіл, Російської Федерації.

Особистий внесок здобувача.

Автором особисто розроблені методика й алгоритми чисельного рішення нелінійної задачі з вільною межею для розрахунку температурного стану безперервного злитку й положення границь розподілу фаз, алгоритми початкового настроювання параметрів зовнішнього теплообміну засновані на методі найменших квадратів, алгоритми оперативного настроювання параметрів зовнішнього теплообміну засновані на методі стохастичної апроксимації, алгоритми прогнозного керування вторинним охолодженням злитку, модель для імітаційного моделювання процесу керування вторинним охолодженням.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи пройшли апробацію на наступних конференціях: Конференція молодих учених із сучасних проблем механіки й математики ім. акад. Я. С. Підстригача. (м. Львів, 2005р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані системи керування в гірничо-металургійному комплексі» ІСУГМК-2006 (м. Кривий Ріг, 2006р.); Одинадцята міжнародна наукова конференція ім. акад. М. Кравчука. (м. Київ, 2006р.); 3-я міжнародна науково-практична конференція «Прогресивні технології в металургії сталі: XXI століття» (м. Донецьк, 2006р.); Міжнародна наукова конференція «Комп'ютерні науки й інформаційні технології», присв. пам'яті проф. А. М. Богомоллова (м. Саратов, 2007р.); X і XII міжнародні науково-технічні конференції «Моделювання, ідентифікація, синтез систем керування» (Москва – Донецьк, 2007 і 2009р.); Міжнародна наукова школа-конференція «Тараповські читання» (м. Харків, 2008г); IV міжнародна науково-технічна конференція «Металургійні процеси й устаткування» (м. Донецьк, 2008р.); XV міжнародна конференція по автоматичному керуванню «Автоматика - 2008» (м. Одеса, 2008р.); XVI Конференція по Прикладній та Індустріальній Математиці САІМ 2008 (Румунія, Орадея, 2008р.); XVII міжнародна науково-технічна конференція «Прикладні задачі математики і механіки» (м. Севастополь, 2009р.); наукових семінарах відділу теорії керуючих систем ІПММ НАН України.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 22 наукові праці, з них 13 написано без співавторів, 4 – в провідних наукових фахових виданнях ВАК України, 8 – тез доповідей на наукових конференціях.

Структура й обсяг роботи. Дисертація містить вступ, чотири розділи основної частини, висновки, список використаних джерел, додаток. Дисертаційна робота представлена на 212 сторінках основного тексту й містить рисунків - 64, таблиць - 7, бібліографічних джерел - 168, додатків - 2 на 23 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Актуальні проблеми математичного моделювання, ідентифікації і керування технологічними процесами безперервного розливання сталі» проведені огляд і аналіз найбільш відомих результатів наукових досліджень в області математичного моделювання процесів безперервного розливання сталі, ідентифікації теплофізичних параметрів і синтезу алгоритмів керування, а також варіантів побудови систем автоматичного керування МБЛЗ.

Викладена необхідна для розробки математичних моделей інформація про технологію безперервного розливання. Показано, що однією з головних умов формування якісного злитку є дотримання певного температурного режиму. Розглянуто розроблені дотепер методи математичного моделювання теплофізичних процесів, що відбуваються у безперервному злитку, й коротко викладені деякі найпоширеніші в дослідницьких роботах математичні моделі. У зв'язку з необхідністю вирішувати теплові задачі, що враховують фазовий перехід, розглянуто різні чисельні методи для задач із вільною межею.

Виконано огляд методів й алгоритмів ідентифікації параметрів зовнішнього теплообміну безперервнолитої заготовки й наведені деякі ключові поняття теорії обернених задач теплопровідності, на основі яких розробляються сучасні математичні методи, що дозволяють уточнювати структуру й параметри математичної моделі технологічного процесу. Найбільшу невизначеність при використанні математичних моделей технологічних процесів безперервного розливання сталі мають параметри зовнішнього теплообміну. При цьому високі вимоги до точності моделей змушують розглядати невідомі величини як розподілені параметри. Задачі ідентифікації систем з розподіленими параметрами (СПП) відносяться до класу обернених задач, які є некоректними в класичному сенсі, окрім того для безперервного розливання сталі їх рішення ускладнюється наявністю фазового переходу.

Обґрунтовано необхідність розробки методів і алгоритмів оперативної адаптації параметрів моделі об'єкта керування, у відповідності з інформацією про процес, що надходить в робочому режимі, для використання цієї моделі безпосередньо в системі керування.

Викладено відомі методи синтезу алгоритмів керування процесами охолодження в МБЛЗ, необхідність у яких виникає при розробці нових систем автоматичного керування МБЛЗ. Зокрема показана можливість розробки для підсистеми керування вторинним охолодженням алгоритмів на основі оперативної оцінки температурного стану безперервного злитку, що забезпечують оптимальні режими роботи з погляду дотримання критеріїв якості безперервного злитку. Наведено один із способів побудови системи автоматичного керування технологічним процесом безперервного розливання сталі, а також перераховані деякі існуючі САК МБЛЗ.

Виконана постановка задач дослідження.

У **другому розділі** «Розробка й дослідження математичних моделей теплофізичних процесів, що відбуваються у злитку під час безперервного розливання сталі» розроблені математичні моделі квазістаціонарного й нестаціонарного процесів тепло-масоперенесення всередині безперервного злитку й теплообміну всередині стінок кристалізатора МБЛЗ.

Процеси тепло-масоперенесення в злитку й теплообміну в стінках кристалізатора розглядаються в нерухомій відносно МБЛЗ системі координат.

Теплові процеси ділянки злитку всередині кристалізатора описуються наступними рівняннями:

$$\begin{aligned}
\nu \frac{\partial T(x, z)}{\partial z} &= \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\}, \\
-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} &= C_n \left[\left(\frac{T_a}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр.ср.4}}}{100} \right)^4 \right], \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad 0 \leq z \leq Z, \\
\lambda(T, z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} &= \frac{\lambda_{\Gamma.3}}{\delta_3} \left(T \Big|_{x=l+\delta_3} - T \Big|_{x=l} \right) + C_n \left[\left(\frac{T \Big|_{x=l+\delta_3}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T \Big|_{x=l}}{100} \right)^4 \right], \\
T(x, z) \Big|_{x=\xi_-(z)} &= T(x, z) \Big|_{x=\xi_+(z)} = T_{kr}, \\
\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{x=\xi_-(z)} - \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \Big|_{x=\xi_+(z)} &= \mu \rho(T_{kr}) \nu \frac{d\xi}{dz}, \quad \xi(0) = l,
\end{aligned}$$

де ν – швидкість витягування злитку, T – температура в рідкій і твердій фазах, c – питома теплоємність металу, ρ – густина, λ – теплопровідність, C_n – приведений коефіцієнт випромінювання, T_a – абсолютна температура випромінюючої рідкої сталі, $T_{\text{окр.ср.4}}$ – абсолютна температура навколишнього середовища, $\lambda_{\Gamma.3}$ – коефіцієнт теплопровідності газової суміші в зазорі між стінкою кристалізатора і поверхнею злитку, $T \Big|_{x=l}$, $T \Big|_{x=l+\delta_3}$ – температура поверхонь злитку й кристалізатора відповідно; δ_3 – ефективна товщина газового зазору, ξ – границя розподілу фаз, μ – прихована теплота кристалізації, T_{kr} – температура кристалізації (середня з інтервалу ліквідус – солідус), \bar{n} – нормаль до поверхні розподілу фаз.

Теплові процеси в стінці кристалізатора описуються рівняннями:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] &= 0, \\
\lambda(T, z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d} &= \alpha_1 (T_v - T \Big|_{x=d}), \quad z_0 < z < Z, \\
\lambda(T, x) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=Z} &= \alpha_2 (T_{\text{окр.ср.2}} - T \Big|_{z=Z}), \quad l < x < d, \\
-\lambda(T, z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l+\delta_3} &= \frac{\lambda_{\Gamma.3}}{\delta_3} \left(T \Big|_{x=l} - T \Big|_{x=l+\delta_3} \right) + C_n \left[\left(\frac{T \Big|_{x=l}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T \Big|_{x=l+\delta_3}}{100} \right)^4 \right], \quad 0 < z \leq Z
\end{aligned}$$

$$-\lambda(T, z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l+\delta_3} = \alpha_4 (T_{\text{окр.ср.4}} - T|_{x=l+\delta_3}) + C_n \left[\left(\frac{T_{\text{окр.ср.4}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T|_{x=l+\delta_3}}{100} \right)^4 \right], \quad z_0 < z < 0,$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки кристалізатора до охолоджуючої води, T_v – температура охолоджуючої води, $\alpha_{2,4}$ – коефіцієнти тепловіддачі від стінки кристалізатора в навколишнє середовище, $T_{\text{окр.ср.2,4}}$ – температура навколишнього середовища.

Температура охолоджуючої води в каналі кристалізатора описується наступним балансовим рівнянням:

$$c_v S_v v_v \frac{\partial T_v(\tau, z)}{\partial z} = P_c \alpha_1 (T_v(\tau, z) - T|_{x=d}) - P_{\text{вн}} \alpha_{\text{вн}} (T_v(\tau, z) - T_{\text{вн}}),$$

де c_v – об'ємна теплоємність води, S_v – площа перетину для проходу води, v_v – швидкість води, P_c – периметр перетину стінки кристалізатора, $P_{\text{вн}}$ – периметр зовнішньої стінки, $\alpha_{\text{вн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від води до зовнішньої стінки, $T_{\text{вн}}$ – температура зовнішньої стінки.

Відома температура охолоджуючої води на вході в канал кристалізатора:

$$T_v(\tau, 0) = T_{vv}(\tau).$$

Модель тепло-масоперенесення для злитку на криволінійних ділянках МБЛЗ має вигляд:

$$\begin{aligned} \theta_m \frac{\partial T(r, \varphi)}{\partial \varphi} &= \frac{1}{c(T, r, \varphi) \rho(T, r, \varphi)} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T, r, \varphi) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda(T, r, \varphi) \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\lambda(T, r, \varphi)}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right\}, \\ v \frac{\partial T(x, z)}{\partial x} &= \frac{1}{c(T, x, z) \rho(T, x, z)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T, x, z) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T, x, z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\}, \\ T(r, \varphi) \Big|_{r=\xi_{1,2-}(\varphi)} &= T(r, \varphi) \Big|_{r=\xi_{1,2+}(\varphi)} = T_{kr}, \quad r_{1,2} = \xi_{1,2}(\varphi), \\ \lambda(T, r, \varphi) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\xi_{1,2+}} &- \lambda(T, r, \varphi) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\xi_{1,2-}} = \pm \mu \rho_{kr} \theta_m \frac{\partial \xi_{1,2}}{\partial \varphi}, \\ -\lambda(T, \varphi) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_m} &= \alpha_I (G_m, \varphi) \cdot (T_{Im} - T|_{r=r_m}) + C_{Im} (T_{Im}^4 - (T|_{r=r_m})^4), \quad \lambda(T, z) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_p} = 0, \\ \lambda(T, \varphi) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_m+2l} &= \alpha_E (G_m(\tau), \varphi) \cdot (T_{Em} - T|_{r=r_m+2l}) + C_{Em} (T_{Em}^4 - (T|_{r=r_m+2l})^4) \end{aligned}$$

де θ_m – кутова швидкість руху злитку на m -й криволінійній ділянці, α_I , α_E , C_{Im} , C_{Em} , T_{Im} , T_{Em} – коефіцієнти тепловіддачі від поверхні злитку в навколишнє середовище, приведені коефіцієнти випромінювання від поверхні злитку, температура навколишнього середовища в m -й секції ЗВО по

внутрішньому й по зовнішньому радіусах відповідно, $G_m(\tau)$ – витрата води на m -й секції. Для рішення поставленої задачі застосовується метод кінцевих різниць з використанням рівномірних і нерівномірних шаблонів. Після введення кінцево-різницевого сіток задається початкове наближення положення границі розподілу фаз і поля температур. Отримані рівняння утворюють систему лінійних рівнянь, що розв'язується методом Гауса-Зейделя.

Для перерахунку положення межі розподілу фаз застосовується спеціально розроблений метод, при якому задача зводиться до рішення системи нелінійних рівнянь виду:

$$\xi_j^{k+1} = \xi_j^k + \Delta\tau \frac{\lambda}{\mu\rho} \left\{ \sqrt{\left(\frac{U_2 - T_{kr}}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_4 - T_{kr}}{h}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{U_1 - T_{kr}}{q}\right)^2 + \left(\frac{U_3 - T_{kr}}{h}\right)^2} - v \frac{\xi_j^{k+1} - \xi_{j-1}^{k+1}}{h} \right\},$$

де $\Delta\tau$ – крок у часі, q і h – кроки в просторі, U_1, \dots, U_4 – інтерполяція температури у вузлах спеціального шаблону.

Окремо розглядаються два особливих випадки: розрахунок положення межі розподілу фаз на рівні меніску і на рівні точки остаточного затвердіння, після якої в злитку присутня лише тверда фаза, і координати якої є характеристикою глибини рідкої лунки.

Алгоритми програмно реалізовані в середовищі програмування Borland C++ Builder 6.0. Розрахунки проведені для марки сталі ст40 і геометричних параметрів криволінійної МБЛЗ, аналог якої встановлений на ВАТ «МК «Азовсталь».

Чисельні експерименти показують, що зміна режиму охолодження в ЗВО не впливає на розподіл температур злитку всередині кристалізатора навіть на самих нижніх рівнях. Далі по довжині ЗВО виділяються ділянки з різними параметрами форсунок, що подають водо-повітряну суміш, і ділянка, на якому охолодження злитку здійснюється за рахунок вільної конвекції й випромінювання. Отримано функції чутливості температури поверхні злитку до змін витрати охолоджуючої води (рис.1). Розрахунки також показують, що на глибину рідкої лунки вирішальним чином впливає швидкість витягування злитку і лише в незначній мірі режим охолодження.

Нестационарна модель на відміну від квазістационарної містить нестационарні рівняння тепло-масоперенесення в злитку, теплоперенесення в стінках кристалізатора й положення невідомої межі фазового переходу. Крім того в ній задані початкове положення межі розподілу фаз, початкове розподілення температури води всередині каналу кристалізатора, початкові умови для всього поля температур. Для чисельного рішення поставленої задачі застосовується метод кінцевих різниць з використанням явних схем, для яких визначається умова стійкості:

$$\Delta\tau < \frac{c_{\min} \rho_{\min} q^2 h^2}{2\lambda_{\max} (q^2 + h^2) + v q^2 h c_{\max} \rho_{\max}},$$

де c_{\min} й c_{\max} – мінімальне й максимальне значення питомої теплоємності сталі по всіх прямолінійних ділянках, ρ_{\min} і ρ_{\max} – мінімальне й максимальне значення густини сталі, λ_{\max} – максимальне значення теплопровідності сталі. Для криволінійних ділянок умова стійкості визначається аналогічно. Найменше із всіх значень, що обмежують $\Delta\tau$ є максимально припустимим кроком у часі. В якості початкових умов використовується рішення квазістаціонарної задачі.

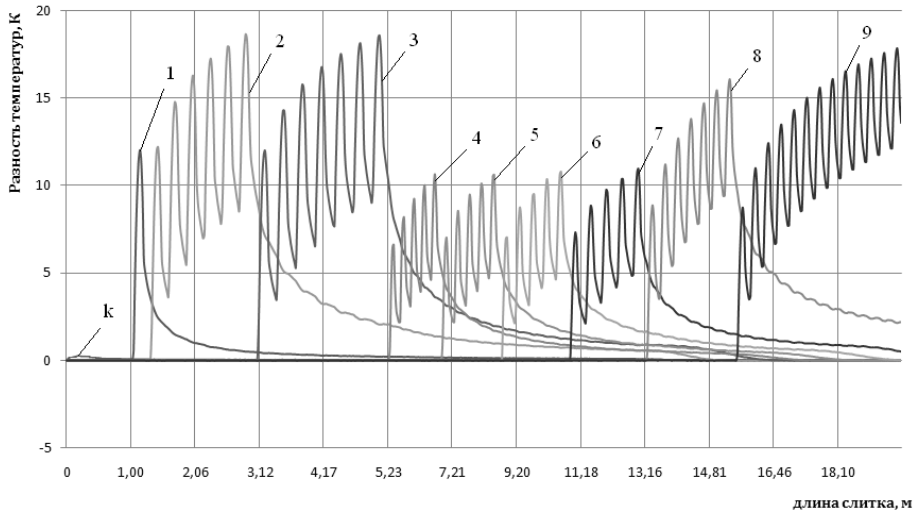


Рис. 1. Функції чутливості температури поверхні злитку до змін витрати охолоджуючої води в кристалізаторі та в 1-й – 9-й секціях ЗВО.

Для дослідження ступеня впливу зміни входних параметрів (витрат охолоджуючої води в кристалізаторі і в кожній секції ЗВО) на зміну температури злитку були побудовані графіки чутливості динамічної системи по параметрах. Досліджено вплив зміни швидкості витягування злитку, режимів витрати охолоджуючої води в кристалізаторі й ЗВО на значення температури й температурних градієнтів у різних частинах злитку.

У **третьому розділі** «Ідентифікація параметрів математичних моделей технологічних процесів безперервного розливання сталі» розглядаються питання ідентифікації розподілених параметрів зовнішнього теплообміну, зокрема коефіцієнтів конвективної тепловіддачі на поверхні злитку в двох різних ситуаціях:

1) коли під час пуско-налагоджувальних робіт вимірюється температура поверхні злитку в багатьох точках;

2) коли у звичайних виробничих умовах дані про тепловий стан злитку обмежуються показаннями температури в невеликій кількості точок.

Задано умови теплообміну на поверхні злитку у ЗВО:

$$\lambda(T, \varphi) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_m+2l} = \alpha_E(G_m(\tau), \varphi) \cdot (T_{Em} - T|_{r=r_m+2l}) + C_{Em} (T_{Em}^4 - (T|_{r=r_m+2l})^4)$$

Потрібно, за даними вимірів температури на поверхні злитку, визначити невідомий коефіцієнт конвективної тепловіддачі $\alpha_E(G_m(\tau), \varphi)$.

Коефіцієнт тепловіддачі, отриманий способом прямого обернення, не придатний для практичного використання, тому що відносно малим відхиленням (помилкам у вимірах) температури відповідають досить великі відхилення в рішенні. Метод регуляризації також має недоліки пов'язані з великими обсягами обчислень і згладжуванням рішення в межах похибки вимірів (збільшення похибки призводить до отримання більш гладкої кривої). Тому для ідентифікації розподілених параметрів моделі теплофізичного процесу пропонується застосувати ідею методу найменших квадратів (МНК).

При використанні МНК враховується, що $\alpha_E(G_m(\tau), \varphi)$ має спеціальний розподіл уздовж поверхні злитку. Зокрема на ділянці, що накривається факелом форсунки, його можна наблизити параболічною функцією:

$$\alpha(\varphi) = \alpha_c - \frac{\alpha_p}{w^2} \varphi^2 + \alpha_p \text{ (на інших ділянках – константою). Формула для нев'язки}$$

теплових потоків на границі:

$$\delta = \lambda_{i,N} \frac{T_{i,N-2} - 4T_{i,N-1} + 3T_{i,N}}{2q} - C_{Em} (T_{Em}^4 - T_{i,N}^4) - \alpha_c (T_{Em} - T_{i,N}).$$

З необхідної умови існування екстремуму визначаються такі α_c й α_p , при яких сума квадратів нев'язок буде мінімальною:

$$\alpha_c = \frac{\sum_i Q_i P_i}{\sum_i Q_i^2}, \quad \alpha_p = \frac{\alpha_c \sum_i Q_i \left(\frac{y_i^2}{w^2} - 1 \right) - \sum_i P_i Q_i \left(\frac{y_i^2}{w^2} - 1 \right)}{\sum_i Q_i^2 \left(\frac{y_i^2}{w^2} - 1 \right)^2},$$

$$\text{де } P_i = \lambda_{i,N} \frac{T_{i,N-2} - 4T_{i,N-1} + 3T_{i,N}}{2q} - C_{Em} (T_{Em}^4 - T_{i,N}^4), \quad Q_i = T_{Em} - T_{i,N}.$$

Отримане рішення є стійким до похибок вимірювання температур на поверхні досліджуваного тіла.

Використання математичної моделі безпосередньо в системі керування потребує її періодичного настроювання у зв'язку із зміною параметрів об'єкту керування. Необхідно за відхиленнями обчисленої по моделі температури T_j від

вимірюваної у відповідній точці T_j^* корегувати параметри моделі так, щоб звести до мінімуму ці відхилення.

Оперативне настроювання полягає в уточненні параметру α_c , що визначає величину коефіцієнта тепловіддачі, отриману в результаті рішення задачі початкового настроювання параметрів.

Алгоритм настроювання параметру має вигляд:

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j - k_j \cdot (T_j^* - T_j),$$

де α_j – j -і наближення коефіцієнта тепловіддачі α_c , k_j – спеціальна послідовність чисел, що задовольняє наступним умовам:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} k_j = 0, \quad \sum_{j=1}^{\infty} k_j = \infty, \quad \sum_{j=1}^{\infty} (k_j)^2 < \infty.$$

Чисельне моделювання дозволяє встановити основні особливості траєкторій процесу настроювання параметру. Для послідовності

$$k_j = \frac{a}{n_j}, \quad n_{j+1} = \begin{cases} n_j, & (T_j^* - T_j)(T_{j+1}^* - T_{j+1}) > 0 \\ n_j + 1, & (T_j^* - T_j)(T_{j+1}^* - T_{j+1}) \leq 0 \end{cases}.$$

при $1, 2 \leq a \leq 1,5$ вже після 20-ти ітерацій наближення будуть відрізнятися від істинного значення не більше ніж на 6%.

Перевагою алгоритму стохастичної апроксимації є його успішна робота для досить широкого інтервалу початкових значень параметру α_c .

В **четвертому розділі** «Керування процесом охолодження безперервного злитку» розглянуто один з варіантів побудови ієрархічної структури системи автоматичного керування процесом безперервного розливання. Наведені короткий опис і систематизація основних функцій комп'ютерної системи керування технологічним процесом. Виконано постановку основних задач керування тепловими процесами в кристалізаторі і в ЗВО. З метою встановлення зв'язку між параметрами на вході розглянутої системи й характеристиками якості готової продукції на виході, проаналізовано існуючі підходи до оцінювання різних параметрів теплового стану, а також критерії якості безперервного злитку.

Розглянуті дві підсистеми: оперативної оцінки теплового стану злитку й керування режимами вторинного охолодження. Перша дозволяє в оперативному режимі одержувати інформацію необхідну для роботи алгоритмів керування МБЛЗ, а також здійснювати спостереження за тепловими процесами всередині безперервнолитої заготовки. Програма, що реалізує розрахунок за моделлю, прогнозує динаміку теплового процесу в наступні моменти часу. Вихідною інформацією підсистеми є температура злитку й положення границі розподілу фаз у поздовжньому перетині, а також величини тепловідводу, середньої температури поверхні в кожній секції і температурних градієнтів, що дозволяє в повному обсязі враховувати різні параметри процесу, у тому числі поточний розподіл температур всередині злитку для того, щоб найбільш раціонально здійснювати корегування теплового стану злитку.

Для підсистеми керування режимами вторинного охолодження вирішені задачі динамічного розімкненого керування кінцевим температурним станом злитку на виході із ЗВО й динамічного прогностного керування із використанням оперативної оцінки теплового стану злитку.

За допомогою алгоритму розімкненого керування обчислюється такий режим витрати охолоджуючої води в ЗВО, який при заданих швидкості витягування злитку й температурі розплаву забезпечить необхідне значення температури поверхні злитку на виході із ЗВО. В якості керуючого впливу в цьому випадку обирається коефіцієнт, що вказує в скільки разів потрібно змінити загальну витрату води у всіх секціях щодо базового режиму. Результати розрахунків наведені в табл.1. Недоліком розімкненого керування є те, що короткострокове порушення технологічно встановленої швидкості витягування злитку спричиняє тривале порушення температурного режиму всіх секцій ЗВО.

Таблиця 1
Режими витрати охолоджуючої води

темп-ра розпл., v, м/хв K	1813	1823	1833
0,8	0,343	0,411	0,495
0,9	0,672	0,741	0,844
1	0,919	1	1,082
1,1	1,301	1,382	1,464
1,2	1,592	1,674	1,754
1,3	1,884	1,967	2,046
1,4	2,153	2,238	2,304

Структурна схема системи прогностного керування представлена на рис.2.

По температурі поверхні на виході із ЗВО, поточним витратам води, швидкості витягування злитку, температурі розплаву, температурі зовнішнього середовища й іншим параметрам процесу в режимі реального часу ідентифікується коефіцієнт конвективної тепловіддачі як розподілений параметр на поверхні злитку в ЗВО. Далі на основі оцінки теплового стану безперервного злитку, одержуваної з розрахунків за адаптивною математичною моделлю, обчислюються керуючі впливи на режими витрати охолоджуючої води в ЗВО, при яких будуть забезпечуватися задані значення середньої температури на відповідних ділянках поверхні. Ділянки поверхні, на які найбільший вплив має та або інша секція вторинного охолодження, виділяються на основі даних про функції чутливості, для кожної визначається критерій керування:

$$\sum_{k=p}^{p+r} \sum_{i=1}^9 \left| T_{s_i}^k - T_{t_i}^k \right|^2 \rightarrow \min, \text{ де } T_{s_i} - \text{значення середньої температури поверхні}$$

злитку на ділянці $[a_i, b_i]$ обчислене за моделлю, T_{t_i} – бажане значення відповідної характеристики, $[\tau_p, \tau_{p+r}]$ – час перебування фіксованого перерізу під дією охолодження. Обмеженнями на керуючі впливи є значення мінімальної й максимальної витрат води в кожній секції ЗВО: $G_{\min i} \leq G_i(\tau) \leq G_{\max i}$ $i = 1, \dots, 9$. Обмеженням на вихідні параметри є мінімально припустиме для кожної марки сталі значення температури злитку $T_{\min} \geq T_p$.

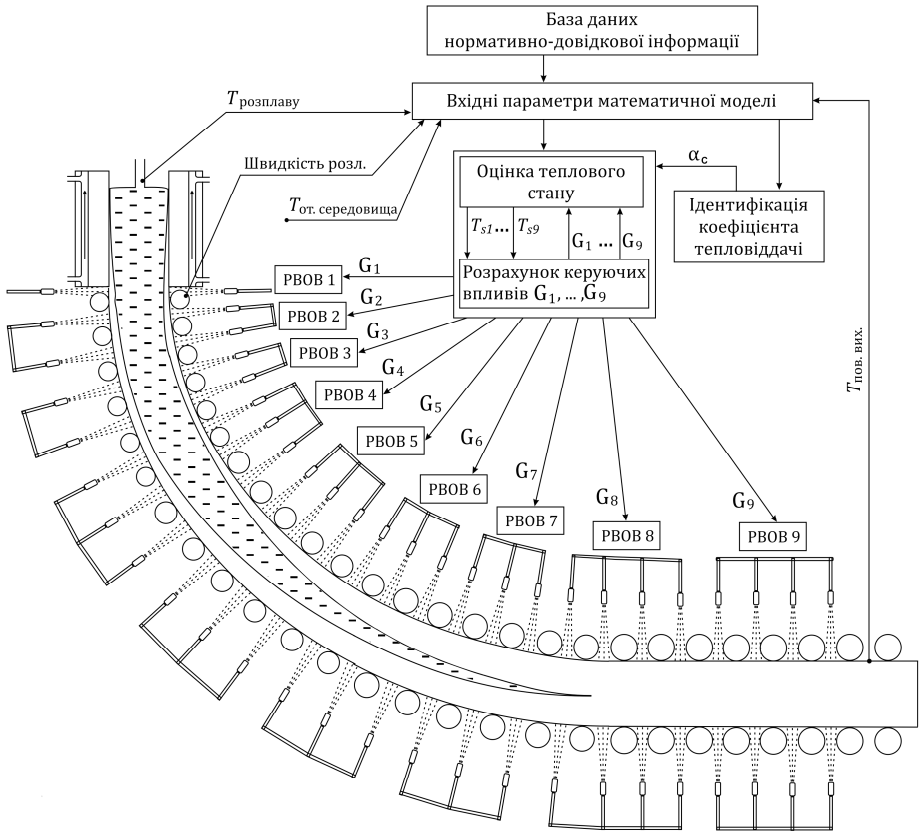


Рис. 2. Структурна схема САК. РРОВ 1 - РРОВ 9 – регулятори витрати охолоджуючої води в 1-й – 9-й секціях.

Алгоритм (рис. 3), заснований на розрахунку математичної моделі температурного стану злитку, дозволяє стабілізувати рівень температур вже у перших секціях ЗВО. В результаті в останніх секціях, де великий вплив на якість злитку мають величини температурних градієнтів, вдається підтримувати заданий тепловий режим, не виходячи при цьому на обмеження керуючих впливів. Слід також зазначити стабільну роботу алгоритму при похибках на даних про швидкість витягування злитку.

Зміни параметрів технологічного процесу призводять до виникнення різного роду перехідних процесів і, як результат, до відхилень від необхідного температурного режиму. Для визначення ймовірнісних характеристик і оцінки точності керування за допомогою розглянутих алгоритмів було розроблено програмний комплекс імітаційного моделювання і вирішені задачі аналізу

статистичної динаміки процесу охолодження безперервного злитку методом статистичних випробувань. Результати обчислень показують, що при прогнозованому керуванні з використанням математичної моделі для оперативної оцінки теплового стану злитку досягаються істотно кращі результати: максимальні відхилення від необхідних температур і середньоквадратичні відхилення істотно менше, ніж при розімкненому керуванні.

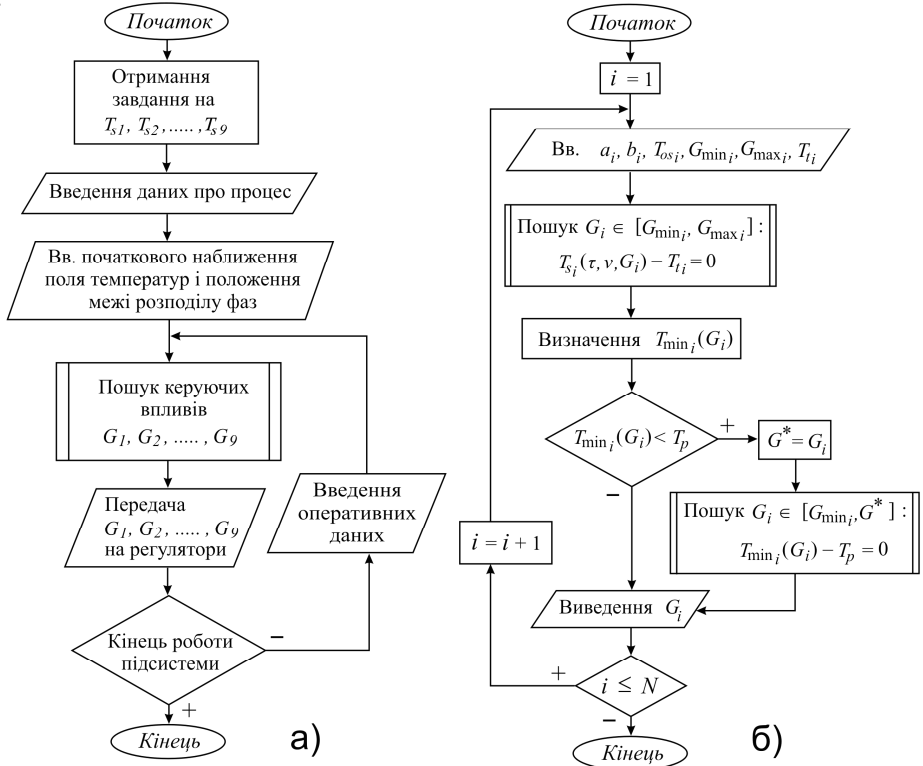


Рис. 3. Блок-схеми алгоритмів а) роботи підсистеми прогнозного керування режимами охолодження у ЗВО; б) пошуку керуючих впливів.

ВИСНОВКИ

В ході дисертаційних досліджень була вирішена актуальна задача синтезу системи автоматичного керування режимами охолодження сталевих злитку в процесі безперервного розливання, що дозволяє з великим ступенем точності контролювати тепловий стан металу, і в такий спосіб забезпечувати високу якість виробленої продукції.

Основні наукові висновки й результати роботи містяться в наступному:

1. Розроблено математичні моделі квазістаціонарного й нестаціонарного процесів тепло-масоперенесення в безперервному злитку й теплообміну в стінках кристалізатора МБЛЗ, в яких враховується комплекс параметрів, необхідний для розробки системи автоматичного керування охолодженням. Для оперативної оцінки температурного стану безперервного злитку розроблені чисельні методи й алгоритми рішення нелінійних граничних задач із вільною межею. Запропоновані способи чисельного рішення задач тепло-масоперенесення з вільною межею можуть бути використані для рішення інших задач, що включають умови Стефана. Розроблені математичні моделі й засноване на них програмне забезпечення дозволяють в режимі реального часу спостерігати теплові процеси, що відбуваються в безперервному злитку й у стінках кристалізатора, вивчати чутливість різних керованих параметрів процесу до змін керуючих параметрів, робити оперативну оцінку теплового стану злитку і використовувати отриману інформацію як на етапі проектування, так і під час роботи САК МБЛЗ.

2. Розроблено нові алгоритми ідентифікації розподілених параметрів зовнішнього теплообміну, що дозволяють під час пуско-налагоджувальних робіт визначати параметри тепловіддачі на поверхні злитку у вигляді сплайн-апроксимації, одержуваної за допомогою метода найменших квадратів. Для адаптації параметрів моделі в режимі реального часу розроблені алгоритми оперативного налаштування, засновані на методі стохастичної апроксимації.

3. Для режимів вторинного охолодження ЗВО розроблені й програмно реалізовані алгоритми прогностного керування на основі математичної моделі, що дає оперативну оцінку температурного стану безперервного злитку, які забезпечують стабілізацію необхідного температурного режиму, що у свою чергу дозволяє більш строго дотримувати критеріїв якості безперервного злитку.

4. Розроблено програмний комплекс імітаційного моделювання процесу керування вторинним охолодженням, що дозволяє оцінювати точність керування на етапі розробки САК МБЛЗ.

5. Розроблені алгоритми чисельного рішення задач тепло-масоперенесення з урахуванням фазового переходу, ідентифікації розподілених параметрів і прогностного керування, а також засновані на них програмні засоби, були використані для рішення задач математичного моделювання, параметричної ідентифікації й синтезу алгоритмів керування нестаціонарними процесами тепло-масоперенесення в безперервному злитку ГНПК «Київський інститут автоматики», м. Київ.

6. Результати досліджень, що стосуються впливів різних технологічних параметрів на тепловий стан злитку, використані при розробці раціональних режимів охолодження й при проектуванні систем керування технологічними процесами МБЛЗ на Нижньотагільському металургійному комбінаті ВАТ «НТМК», м. Нижній Тагіл, Російської Федерації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Иванова А.А. Математическая модель процесса затвердевания непрерывного слитка в кристаллизаторе / А.А. Иванова // Труды ИПММ НАН Украины. – Вып.9. – Донецк, ИПММ. – 2004. – С.81-88.
2. Ткаченко В.Н. Основные функции компьютерной системы управления процессом непрерывной разливки стали / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, О.С. Волуева // Наукові праці Донецького національного Технічного Університету. - Серія "Обчислювальна техніка та автоматизація." - Вип. 88. - Донецьк: ДонНТУ, - 2005 - С.63-69.
3. Ткаченко В.Н. Разработка многоуровневой иерархической системы управления технологическим процессом непрерывной разливки стали / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, О.С. Волуева // Академический вестник - №17-18. - Кривой Рог: КрТО МАКНС, - 2006 – С.27-31.
4. Иванова А.А. Математическая модель процесса затвердевания непрерывного слитка в зоне вторичного охлаждения / А.А. Иванова // Труды ИПММ НАН Украины. – Вып.12. – Донецк, ИПММ. – 2006. – С.76-84.
5. Ткаченко В.Н. Анализ температурных полей криволинейной МНЛЗ на основе математического моделирования / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова // Матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції “Прогресивні технології у металургії сталі: ХХІ сторіччя”. – Донецьк: ДонНТУ. – 2007. – С. 242-249.
6. Ткаченко В. Н. Идентификация параметров внешнего теплообмена в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, Г. Р. Василян // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2007. – № 39. – С. 168-177.
7. Ткаченко В.Н. Методы и алгоритмы идентификации параметров внешнего теплообмена процессов тепломассопереноса / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, О.В. Шуба // Известия Саратовского университета. 2008. Т.8. Сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 1. – Саратов: СГУ. – С. 58 – 64.
8. Ткаченко В.Н. Моделирование и анализ теплового поля непрерывного слитка криволинейной машины непрерывного литья заготовок / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова // Электронное моделирование. – 2008. – Т.30, – №3. – С.87-103.
9. Иванова А.А. Исследование температурных градиентов непрерывного слитка / А.А. Иванова // Труды ИПММ НАН Украины. – Вып.16. – Донецк, ИПММ. – 2008. – С.93-102.
10. Иванова А.А. Управление режимами вторичного охлаждения МНЛЗ / А.А. Иванова Доклады XV международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика – 2008», Одесса, – 2008. – С.221-224.
11. Иванова А.А. Управление режимами вторичного охлаждения МНЛЗ / А.А. Иванова // Металлургические процессы и оборудование. – №4(14) – 2008. – С.17-21.

12. Ткаченко В.Н. Метод наименьших квадратов для задачи идентификации параметров внешнего теплообмена процесса непрерывной разливки стали / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – №1(119) – 2008. – С.167-173.

13. Ivanova G.O. Identification of Convection Heat Transfer Coefficient of Secondary Cooling Zone of Based on Least Squares Method and Stochastic Approximation Method / G.O. Ivanova // Труды ИПММ НАН Украины. 2008. Т.17. С.61-73.

14. Иванова А.А. Динамика температурных градиентов непрерывнолитого слитка / А.А. Иванова // Металлургические процессы и оборудование. – №2(16) – июнь 2009. – С.7-12.

15. Иванова Г.О. Математична модель теплового поля кристалізатора МНЛЗ / Г.О. Иванова // Тези доповідей. Конференція молодих учених із сучасних проблем механіки і математики ім. акад. Я.С. Підстригача. – Львів, 2005. – С. 286-287.

16. Иванова А.А. Математическая модель теплового поля зоны вторичного охлаждения МНЛЗ / А.А. Иванова // Тези доповідей. Одинадцята міжнародна наукова конференція ім. акад. М. Кравчука. – Київ, 2006. – С.110.

17. Ткаченко В.Н. Методы и алгоритмы идентификации параметров внешнего теплообмена процессов тепломассопереноса / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, О.В. Шуба // Тезисы докладов Международной научной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии», посв. памяти профессора А.М. Богомолова. – Саратов, 2007. – С.121 –123.

18. Иванова А.А. Идентификация коэффициента конвективной теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ с помощью метода наименьших квадратов / А.А. Иванова // Сборник тезисов Десятой Международной научно-технической конференции «Моделирование, идентификация, синтез систем управления» – Москва – Донецк, 2007. – С. 115-116.

19. Иванова А.А. Анализ температурных напряжений внутри непрерывного слитка на основе математического моделирования / А.А. Иванова // Сборник материалов международной научной школы-конференции «Тараповские чтения» – Харьков, 2008. – С. 228-229.

20. G. Ivanova. Stochastic approximation for identification of convection heat transfer coefficient in the secondary cooling zone of steel continuous casting process. // Book of abstracts of The 16th Conference on Applied and Industrial Mathematics CAIM 2008 (Romania, Oradea, 2008) 16-я Конференция по Прикладной и Индустриальной Математики CAIM 2008 (Румыния, Орадея, 2008) р. 35-36.

21. Иванова А.А. Математическая модель нестационарного теплового поля в кристаллизаторе МНЛЗ / А.А. Иванова // Материалы XVII международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики и механики» – Севастополь, 14-18 сентября 2009г. – С.269-271.

22. Ткаченко В.Н. Идентификация параметров внешнего теплообмена задач тепломассопереноса / В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, О.В. Шуба // Сборник тезисов двенадцатой международной научно-технической конференции

«Моделирование, идентификация, синтез систем управления» – Москва – Донецк, 16 – 23 сентября 2009г. – С. 181-182.

АНОТАЦІЯ

Іванова Г.О. Система автоматичного керування режимами охолодження металу машини безперервного лиття заготовок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2010.

Дисертація присвячена задачам розробки системи автоматичного керування режимами охолодження безперервного злитку на основі адаптивної математичної моделі теплових процесів, що відбуваються всередині злитку і в стінках кристалізатора МБЛЗ. Особлива увага приділена математичному моделюванню квазістаціонарного й нестационарного процесів теплопередачі й тепло-масоперенесення з урахуванням фазового переходу, що дозволяє в режимі реального часу спостерігати теплові процеси, які відбуваються в безперервному злитку і в стінках кристалізатора, вивчати чутливість різних керованих параметрів процесу до змін керуючих параметрів, робити оперативну оцінку теплового стану злитку. Розроблено способи ідентифікації розподілених параметрів зовнішнього теплообміну для початкового й адаптивного настроювання коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні безперервнолитої заготовки. На основі математичної моделі, що дає оперативну оцінку температурного стану безперервного злитку, запропоновані й програмно реалізовані нові алгоритми прогнозного керування охолодженням злитку, які забезпечують стабілізацію необхідного температурного режиму, що в свою чергу дозволяє підвищити якість виробленого металу.

Ключові слова: кристалізація злитку, безперервне розливання, математичне моделювання процесів тепло-масоперенесення, чисельне рішення задач із невідомою межею, параметрична ідентифікація, адаптивне настроювання коефіцієнтів тепловіддачі, керування охолодженням безперервного злитку.

АННОТАЦИЯ

Иванова А.А. Система автоматического управления режимами охлаждения металла машины непрерывного литья заготовок. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - Автоматизация процессов управления. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2010.

Диссертация посвящена задачам разработки системы автоматического управления режимами охлаждения непрерывного слитка на основе адаптивной математической модели тепловых процессов, происходящих внутри слитка и в стенках кристаллизатора МНЛЗ. Особое внимание уделено математическому моделированию квазистационарного и нестационарного процессов

теплопередачи и тепло-массопереноса с учетом наличия фазового перехода и сложных условий теплообмена на различных участках границы. Изложены численные методы и алгоритмы, разработанные для решения поставленных квазистационарной и нестационарной нелинейных задач теплообмена и тепломассопереноса с неизвестной границей. Разработанное на их основе программное обеспечение позволяет в режиме реального времени наблюдать тепловые процессы, происходящие в непрерывном слитке и в стенках кристаллизатора, изучать чувствительность различных управляемых параметров процесса к изменениям управляющих параметров, производить оперативную оценку теплового состояния слитка. Результаты численных расчетов представлены в виде графиков.

Рассмотрены вопросы идентификации распределённых параметров внешнего теплообмена, в частности коэффициентов конвективной теплоотдачи на поверхности непрерывного слитка в двух различных ситуациях: 1) когда во время пуско-наладочных работ производятся измерения температуры поверхности слитка во многих точках; 2) когда в производственных условиях данные о тепловом состоянии слитка ограничиваются показаниями температуры в небольшом количестве точек. Предложен метод начальной настройки параметров внешнего теплообмена с применением метода наименьших квадратов. Для оперативной настройки коэффициентов теплоотдачи на поверхности непрерывнолитой заготовки разработан и программно реализован алгоритм идентификации параметров внешнего теплообмена на основе метода стохастической аппроксимации. Рассмотрено и проанализировано несколько различных модификаций этого алгоритма.

Рассмотрен один из вариантов построения иерархической структуры системы автоматического управления процессом непрерывной разливки. Дано краткое описание и систематизация основных функций компьютерной системы управления технологическим процессом. Выполнена постановка основных задач управления тепловыми процессами в кристаллизаторе и в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Проанализированы существующие подходы к оцениванию различных параметров теплового состояния, а также критерии качества непрерывного слитка, с целью установления связи между параметрами на входе рассматриваемой системы и характеристиками качества готовой продукции на выходе. Отдельно рассмотрены две подсистемы: оперативной оценки теплового состояния непрерывного слитка и управления режимами вторичного охлаждения. Для подсистемы управления режимами вторичного охлаждения решены задачи динамического терминального управления по конечному температурному состоянию слитка на выходе из ЗВО. На основе математической модели, дающей оперативную оценку температурного состояния непрерывного слитка, предложены и программно реализованы новые алгоритмы прогнозного управления охлаждением слитка, которые обеспечивают стабилизацию требуемого температурного режима, что в свою очередь позволяет повысить качество выпускаемого металла. Для определения вероятностных характеристик и оценки качества управления с помощью рассматриваемых алгоритмов был

разработан программный комплекс имитационного моделирования процессов управления вторичным охлаждением и решены задачи анализа статистической динамики процесса затвердевания непрерывного слитка, из результатов которых следует, что прогнозное управление обеспечивает существенно более высокую точность управления.

Ключевые слова: кристаллизация слитка, непрерывная разливка, математическое моделирование процессов тепломассопереноса, численное решение задач с неизвестной границей, параметрическая идентификация, адаптивная настройка коэффициентов теплоотдачи, управление охлаждением непрерывного слитка.

ABSTRACT

Ivanova G.O. Automatic control system of metal cooling modes of continuous casting machine. - Manuscript.

Thesis for candidate's degree (Ph.D) in speciality 05.13.07 - Control processes automation. – SHEE “Donetsk National Technical University”, Donetsk, 2010.

The dissertation is devoted to problems of development of the automatic control system of cooling modes of the continuous ingot on the basis of adaptive mathematical model of the thermal processes occurring in the ingot and in mold walls of CCM. The special attention is given to mathematical modeling of quasistationary and non-stationary processes of heat transfer and heat-mass transfer with the phase transition. It allows observing the thermal processes occurring in the continuous ingot and in mold walls in real time, to investigate the sensitivity of various operated parameters of process to changes of operating parameters, to make an operative estimation of the ingot thermal condition. Ways of identification of the distributed parameters of external heat exchange for initial and adaptive adjustment of convection heat transfer coefficient on the ingot surface are developed. On the basis of the mathematical model, that gives the operative estimation of the temperature condition of the continuous ingot, new model based predictive algorithms are offered and programmed. These algorithms support the stabilization of the required temperature mode of cooling ingot and allow raising quality of output metal.

Keywords: ingot crystallization, continuous casting, mathematical modeling of heat-mass transfer processes, the numerical decision of free boundary problems, parametrical identification, adaptive adjustment of convection heat transfer coefficient, control of the continuous ingot cooling.