

На правах рукописи



КИБАРДИН АНТОН НИКОЛАЕВИЧ

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМЕ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА СЛЯБОВ
НА ЛИНИИ «МНЛЗ-НАГРЕВАТЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ»**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление
и обработка информации (в металлургии)**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Череповец – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Череповецкий государственный университет»

Научный руководитель: **Лукин Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Научный консультант: **Кочкин Александр Александрович**
доктор технических наук, доцент,

Официальные оппоненты: **Темлянец Михаил Викторович**
доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе и инновациям,
профессор кафедры теплоэнергетики и экологии
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет»

Кабакова Ирина Юрьевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Математики»
Череповецкого высшего военного
инженерного училища радиозлектроники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

Защита состоится 27 декабря 2017 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.297.02 при Череповецком государственном университете по адресу: 162600, г. Череповец, пр. Луначарского, 5, аудитория 208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Череповецкого государственного университета. Автореферат размещен на сайте ЧГУ www.chsu.ru.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим высылать по адресу: 162600, г. Череповец, пр. Луначарского, 5, диссертационный совет ЧГУ. Тел. (8202)55-65-97, факс: (8202)55-70-49. Копии отзывов можно прислать на e-mail: shestakovni@chsu.ru.

Автореферат разослан «26» октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.297.02



Хархнин Константин Аркадьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Себестоимость производства стального проката в значительной мере определяется энергетическими затратами на всех этапах металлургического производства. Прокатное производство является достаточно энергоемким, поскольку нагревательные печи, где производится нагрев металла перед прокаткой, потребляют большие количества высококачественного топлива (природный газ и т.п.). Потребление топлива в прокатных цехах по теплоте сгорания составляет примерно 15 % от всего количества топлива, сжигаемого на металлургическом комбинате с полным циклом. На мини заводах, где сталь выплавляется в электропечах, прокатное производство является основным потребителем топливных энергоресурсов.

В настоящее время на металлургических комбинатах жидкая сталь разливается преимущественно на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Высокотемпературные стальные слябы, выходящие из машины непрерывного литья заготовок, имеют среднемассовую температуру более 1000 °С и содержат значительное количество физической теплоты. При отсутствии поверхностных дефектов (трещин и т.п.) горячие слябы можно сразу загружать в нагревательные печи прокатного производства, осуществляя так называемый горячий посад, тем самым повышая производительность печей и снижая удельный расход топлива в печах. В последнее время, на некоторых отечественных комбинатах начали применять горячий посад слябов, однако, режимы нагрева таких слябов в печах не отработаны, и далеки от совершенства. В большинстве же случаев горячие слябы после МНЛЗ поступают сначала на холодный склад, где производится диагностика дефектов на поверхности слябов и их зачистка. На складе слябы охлаждаются, часто до температуры окружающей среды, и в методические печи прокатных станов они поступают в холодном состоянии, из которого их нужно нагреть перед прокаткой до среднемассовой температуры 1200÷1250 °С.

В научно-технической литературе имеется большое количество работ, посвященных режимам затвердевания и охлаждения слябов и оценке их теплового состояния в МНЛЗ, например, работы Д.П. Евтеева, А.Д. Акименко, Е.М. Китаева, А.И. Вейника, В.А. Емельянова, Ю.А. Самойловича, Б.Т. Борисова, В.А. Ефимова, В.А. Журавлева, З.К. Кабакова, А.И. Цаплина, Н.И. Шестакова, С.В. Лукина и др. Также имеется много работ, где исследуются режимы нагрева слябов и оценка их теплового состояния в нагревательных печах, например, работы М.А. Глинкова, Б.С. Мастрюкова, В.А. Кривандина, Л.А. Бровкина, В.В. Бухмирова, В.А. Арутюнова, А.Н. Лебедева, В.Л. Гусовского, Бровкина В.А., Е.И. Казанцева, А.К. Соколова, М.Л. Германа, и др.

Чтобы эффективно использовать физическую теплоту слябов, нужно уметь определять их тепловое состояние на выходе из МНЛЗ, и далее, на всех этапах термостатирования и нагрева, вплоть до поступления на прокатный стан. В настоящее время есть методы, позволяющие определять тепловое состояние сляба на отдельных этапах его тепловой обработки, тогда как система оценки теплового состояния сляба на всей технологической линии от МНЛЗ до нагревательной печи отсутствует. Наличие такой системы позволит минимизировать необходимую длительность нагрева сляба в печах, и максимально снизить расход топлива и степень окисления металла в печах.

Разработка моделей оценки и оптимизации технологических параметров на линии «МНЛЗ – нагревательная печь» может дать значительные энергетический, экономический и экологический эффекты в результате значительного (в несколько раз) сокращения расхода топлива в печах прокатного производства. Поэтому, разработка моделей и алгоритмов оценки и оптимизации параметров охлаждения, термостатирования и нагрева слябов, разлитых на МНЛЗ, является актуальной.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертационной работы является

значительное снижение расхода топлива в нагревательных печах прокатного производства и повышение их производительности за счет оценки и оптимизации параметров охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии от МНЛЗ до нагревательной печи.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ методов, моделей и алгоритмов обработки информации при оценке технологических параметров производства стальных слябов в МНЛЗ, термостатах и нагревательных печах.
 2. Разработано математическое обеспечение системы оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».
 3. Разработан метод оценки теплового состояния сляба в криволинейной роликофорсуночной МНЛЗ.
 4. Разработано алгоритмическое обеспечения системы оценки и оптимизации технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».
 5. Проведены экспериментальные исследования моделей и алгоритмов обработки информации в системе оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».
3. **Методы исследования:** для решения поставленных в работе задач использовались методы математического и компьютерного моделирования, теоретические основы металлургической теплотехники, основы теории построения алгоритмов и программ, системного анализа.

Объект исследования: система оценки технологических параметров производства сляба на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».

Предметом исследования являются математические модели, методы и алгоритмы обработки информации в системе оценки параметров теплового состояния слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель охлаждения, термостатирования и нагрева сляба, отличающаяся тем, что позволяет производить оценку технологических параметров производства сляба на всех этапах его тепловой обработки на линии «МНЛЗ – термостат – методическая нагревательная печь».
2. Новый метод оценки теплового состояния сляба в ролико-форсуночной МНЛЗ с водовоздушными форсунками, основанный на экспериментально-расчетном исследовании теплового баланса МНЛЗ, позволяющий определять интенсивность охлаждения сляба в ЗВО с учетом нерегулируемого отвода теплоты роликами.
3. Алгоритмическое обеспечение системы прогнозирования режимов охлаждения, термостатирования и нагрева стальных слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь», включающее алгоритмы:
 - алгоритм расчета температурного поля сляба в криволинейной МНЛЗ, в термостате, в методической нагревательной печи, и оценки теплового состояния сляба на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь»;
 - алгоритм оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева стальных слябов в системе оценки параметров теплового состояния слябов, обеспечивающий поступление сляба на прокатку с заданной среднemasсовой температурой и допустимым градиентом температур по сечению сляба, а также максимальную экономию топлива в нагревательных печах.

Практическая ценность работы. Разработано программное обеспечение, позволяющее численно рассчитывать температурное поле сляба в МНЛЗ, на воздухе, в термостате, в нагревательной печи.

На основе исследования теплового баланса криволинейной МНЛЗ № 3 сталеплавильного производства ЧерМК ПАО «Северсталь» и измерения температуры

поверхности сляба, установлены параметры, определяющие теплообмен на поверхности сляба в кристаллизаторе, зонах вторичного и воздушного охлаждения МНЛЗ.

Установлены оптимальные режимы охлаждения и термостатирования сляба в криволинейной МНЛЗ, и оптимальные режимы нагрева и томления сляба в методической печи. Получена номограмма, позволяющая определять длительности нагрева и томления стального сляба в нагревательных печах при горячем посаде.

При внедрении результатов исследований на металлургических заводах, имеющих непрерывную разливку стали, ожидается значительное (в несколько раз) сокращение расхода топлива в нагревательных печах прокатного производства, увеличение производительности печей.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждена корректным использованием методов математического моделирования теплофизических процессов при затвердевании слябов в МНЛЗ, охлаждении на воздухе и термостате, нагреве в печах, а также сравнением результатов моделирования с данными экспериментов, полученных в промышленных условиях.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась в ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет» с 2010 по 2016 г. Результаты работы использовались при выполнении НИР по теме «Разработка технологии утилизации низкопотенциальной теплоты систем охлаждения промышленных агрегатов», которая выполнялась по государственному заданию Минобрнауки РФ с 01.01.2013 по 31.12.2013 (регистрационный номер НИР: 7.8398.2013). Результаты исследований переданы для внедрения на ЧерМК ПАО «Северсталь». Также результаты работы рекомендуются к внедрению на всех металлургических комбинатах и мини-заводах, где применяется непрерывная разливка стали.

Соответствие паспорту специальности. Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пункту 4 паспорта специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (в металлургии)» (п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации).

Апробация работы. Основные разделы работы докладывались на Всероссийских научно-практических конференциях «Череповецкие научные чтения – 2011», «Череповецкие научные чтения – 2012», (Череповец, 2011, 2012), на X международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2012), на международной научной заочной конференции «Перспективы научного развития теплофизики и теплотехники» (Москва, 2013), на IX-ой Международной научно-технической конференции «Автоматизация машиностроительного производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (Вологда, 2014).

Публикации. Материалы диссертации изложены в 15 работах (из них 9 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для соискателей степени кандидата технических наук).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 166 страниц текста, 33 рисунка, 8 таблиц, список литературы из 127 наименований

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, их научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе на основе изучения литературных источников проанализирована технология получения стального проката и разработана обобщенная функциональная

схема системы оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь», представленная на рис. 1.

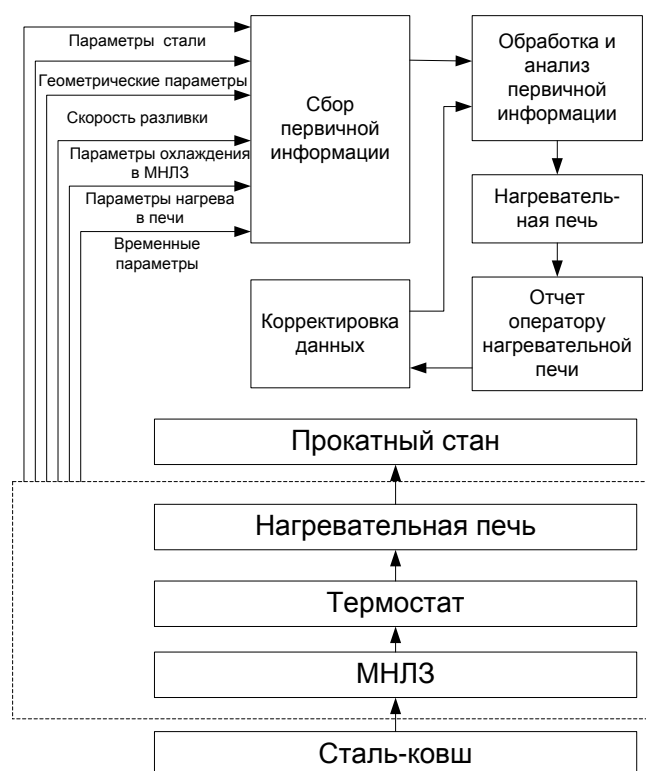


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема системы оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ - нагревательная печь».

Первичная информация включает в себя: параметры стали (температура жидкой стали T_0 , марка и химический состав разливаемой стали M); геометрические параметры Γ (толщина и ширина разливаемых слябов $2B$, $2A$, длины и число зон охлаждения МНЛЗ l_i , $i = 1, 2, \dots, n$); скорость вытягивания сляба в МНЛЗ в зависимости от времени $v(\tau)$; параметры охлаждения в МНЛЗ (расходы $G_{кр}$, $G_{ролj}$, и нагрев $\Delta t_{кр}$, $\Delta t_{ролj}$, охлаждающей воды в кристаллизаторе и роликах; расходы G_i и температура t_b воды на форсунки и др.); параметры нагрева в печи (температурное поле в рабочем пространстве печи T_p , температура металла перед прокаткой T_m ; временные параметры (длительности нахождения сляба в кристаллизаторе и ЗВО МНЛЗ τ_m , нахождения сляба на воздухе, включая зону воздушного охлаждения МНЛЗ τ_b , длительность нахождения в термостате τ_t , длительности нагрева и томления в печи τ_n , τ_{tm}).

Из-за большого количества влияющих параметров тепловое состояние сляба в МНЛЗ, в термостате, в печи наиболее точно и наименее затратно можно определить на основе математического моделирования. В диссертации рассмотрены известные математические модели охлаждения и затвердевания стальных слябов в МНЛЗ, термостатирования и нагревания слябов в печах. Отмечено, что существующие математические модели описывают тепловое состояние сляба по отдельности в МНЛЗ, в термостате, в нагревательной печи, однако отсутствуют математические модели, позволяющие проводить оценку технологических параметров производства сляба на всех этапах его тепловой обработки на линии «МНЛЗ – термостат – методическая нагревательная печь».

Кроме того, существующие математические модели, описывающие охлаждение сляба в криволинейной МНЛЗ, достаточно приближенно учитывают отвод теплоты роликами, несмотря на то, что роликами в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) от сляба отводится более половины теплоты. Для более точного учета неуправляемого теплообмена сляба с роликами необходимо использовать текущие значения расходов и

нагрева охлаждающей воды в роликах, регистрируемые в АСУ МНЛЗ. Кроме того, при расчете охлаждения на поверхности сляба в ЗВО задаются граничные условия III-ого рода, при этом коэффициент теплоотдачи при водовоздушном форсуночном охлаждении определяется в зависимости от удельного расхода воды, температуры поверхности сляба и др. Однако, при форсуночном охлаждении высокотемпературных металлических поверхностей коэффициент теплоотдачи гораздо сильнее зависит от температуры поверхности сляба, чем плотность теплового потока, отводимого от поверхности. Поэтому в качестве граничных условий на поверхности сляба в ЗВО более корректно задавать граничные условия II-ого рода.

Термостатирование горячих слябов после МНЛЗ в настоящее время практически не применяется, несмотря на то, что его относительно несложно организовать. Термостаты в настоящее время нашли применение для сохранения физической теплоты слитков, разлитых в изложницах, на небольших металлургических заводах. В термостатах с хорошей тепловой изоляцией или с подогревом для компенсации потерь теплоты, можно задавать практически адиабатные условия теплообмена на поверхности сляба.

Известные математические модели, описывающие нагрев слябов в методических печах, являются достаточно точными, однако для их корректного применения нужно задавать тепловое состояние слябов на входе в печь, что не представляет сложности при холодном посаде, но при загрузке горячих слябов их тепловое состояние требуется определять. Температурные зоны в печи при горячем посаде также требуют корректировки, поскольку при загрузке горячих слябов теряет смысл методическая зона печи, где значительно снижается температура греющих газов. Для наиболее быстрого нагрева сляба до среднemasсовой температуры прокатки T_m температура в рабочем пространстве печи T_n должна быть больше T_m , и, при возможности постоянной. Обогрев сляба в печи должен быть двусторонним. После нагрева до среднemasсовой температуры T_m сляб должен поступать в томильную зону печи, где должны выполняться практически адиабатные условия, как в термостате, для выравнивания температуры по сечению сляба.

При данных условиях, контроль процесса нагрева сляба в методической печи при известном тепловом состоянии сляба на входе в печь заключается в контроле длительности нагрева τ_n и длительности выдержки в томильной зоне τ_{tm} , обеспечивающих тепловое состояние сляба на выходе из печи, при котором среднemasсовая температура металла равняется T_m , а максимальный градиент температур по сечению сляба не превышает заданного значения ∇T_m .

Тепловое состояние сляба на входе в печь зависит от параметров стали, разливаемой в МНЛЗ, геометрических параметров МНЛЗ и сляба, скорости разлива в МНЛЗ, параметров охлаждения в МНЛЗ, временных параметров, условий термостатирования.

Оптимизация режимов термостатирования и нагрева заключается в определении временных параметров $\tau_{o,опт}$, $\tau_{т,опт}$, $\tau_{n,опт}$, $\tau_{tm,опт}$, обеспечивающих среднemasсовую температуру металла на выходе из печи T_m , и максимально допустимый градиент температур ∇T_m , при наименьшем удельном расходе топлива в нагревательной печи.

Оптимизация может производиться для двух случаев. В первом случае, при заданной технологией разлива длительности нахождения сляба в кристаллизаторе и ЗВО МНЛЗ τ_m , определяются длительности нахождения сляба на воздухе τ_b и в термостате τ_t таким образом, что в момент извлечения из термостата обеспечивается необходимое для прокатки тепловое состояние сляба ($T_m, \nabla T_m$). В этом случае нагрев сляба в печи становится не нужным, и удельный расход топлива в печи равняется нулю.

Во втором случае, при заданных величинах τ_m , τ_o и τ_t , и заданной температуре в печи T_n ($T_n > T_m$) определяются длительности нагрева τ_n и томления сляба в печи τ_{tm} , чтобы обеспечить необходимое для прокатки тепловое состояние сляба ($T_m, \nabla T_m$).

Во втором разделе на основе системного анализа разработана системная модель системы оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь» (рис. 2).

В ходе системного анализа были определены модели и методы, реализация которых необходима для оптимизации технологических режимов получения стального нагретого сляба, направляемого на прокатку. Была определена необходимость разработки математической модели затвердевания и охлаждения сляба в МНЛЗ, охлаждения сляба на воздухе и в термостате, нагрева и томления сляба в печи, метода оптимизации технологических режимов охлаждения, термостатирования и нагрева. Для реализации данной модели выбран численный метод, предусматривающий использование алгоритмического языка программирования и электронно-вычислительной машины (персонального компьютера).

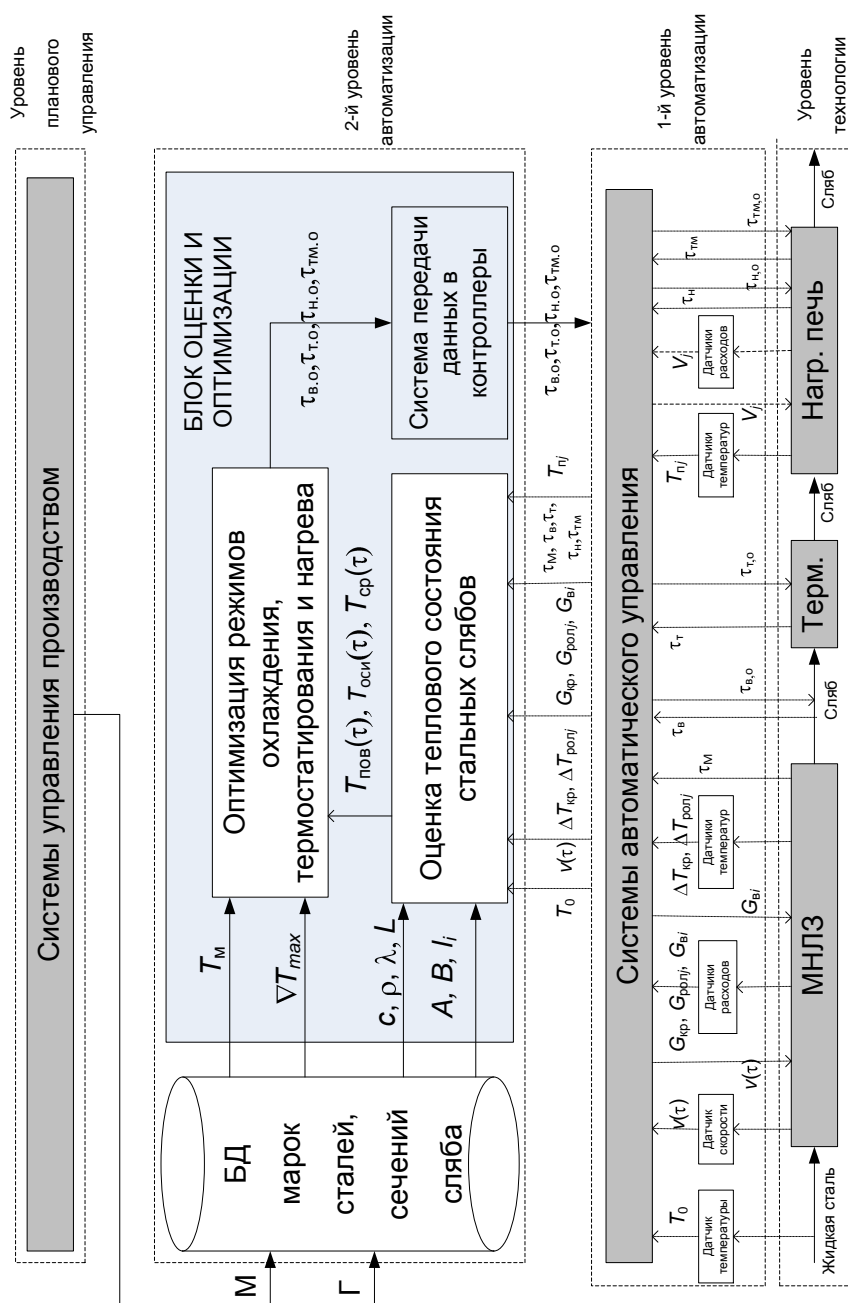


Рис. 2. Системная модель оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ-нагревательная печь»

Была разработана математическая модель, позволяющая последовательно рассчитывать затвердевание сляба в МНЛЗ, охлаждение на воздухе и в термостате, и нагрев в печи.

При скорости разливки v температурное поле сляба сечением $2A \times 2B$ в МНЛЗ описывается дифференциальным уравнением:

$$C_{эф}(T) \cdot \rho \cdot dT/dt = \text{div}(\lambda_{эф}(T) \cdot \nabla T), \quad (1)$$

где $T = T(x, y, \tau)$ – температурное поле сляба; $\tau = z/v$ – время, проведенное данным сечением сляба в МНЛЗ; z – координата технологической оси МНЛЗ, отсчитываемая от мениска жидкого металла в кристаллизаторе; x, y – декартовы координаты; $C_{эф}$, ρ , $\lambda_{эф}$ – эффективная теплоемкость, плотность и эффективный коэффициент теплопроводности стали.

Величина $C_{эф}$ рассчитывается по выражениям:

$$C_{эф} = c(T), T \leq T_s, T \geq T_l; C_{эф} = c(T) + L/(T_l - T_s), T_s < T < T_l, \quad (2)$$

где $c(T)$ – теплоемкость стали в зависимости от температуры; L – теплота затвердевания стали; T_l и T_s – температуры ликвидуса и солидуса стали.

Величина $\lambda_{эф}$ учитывает перенос теплоты конвекцией в жидком ядре сляба и рассчитывается по выражениям:

$$\begin{aligned} \lambda_{эф} &= \lambda(T), T \leq T_s; \\ \lambda_{эф} &= \lambda(T) + (\lambda_{\max} - \lambda(T)) \cdot (T - T_s) / (T_l - T_s), T_l < T < T_s; \\ \lambda_{эф} &= \lambda_{\max}, T \geq T_l, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\lambda(T)$ – молекулярный коэффициент теплопроводности стали в зависимости от температуры; λ_{\max} – коэффициент теплопроводности жидкого расплава:

$$\lambda_{\max} = \max \left\{ (4/\pi^2) \alpha_l \cdot B_l, \lambda(T) \right\},$$

где α_l – коэффициент теплоотдачи от жидкого металла в ядре сляба к затвердевшей оболочке; B_l – полутолщина жидкого ядра.

Начальным условием для уравнения (1) является:

$$T(x, y, \tau)|_{\tau=0} = T_0, 0 \leq x \leq B, 0 \leq y \leq A, \quad (4)$$

где $T_0(\tau)$ – температура жидкой стали в промковше.

В центре сляба задаются условия адиабатности:

$$\partial T / \partial x|_{x=0} = 0; \partial T / \partial y|_{y=0} = 0. \quad (5)$$

В кристаллизаторе на поверхности сляба задается граничное условие:

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial n|_{\text{пов}} = \sigma / \sqrt{\tau}, 0 \leq \tau \leq \tau_{кр} = L_{кр} / v, \quad (6)$$

где n – координата нормали к поверхности сляба; σ – эмпирический коэффициент; $L_{кр}$ – рабочая длина кристаллизатора.

Величина σ определяется по выражению:

$$\sigma = \frac{c_v \cdot G_{кр} \cdot \Delta T_{кр}}{8A \cdot B \cdot \sqrt{L_{кр} \cdot v}},$$

где c_v – теплоемкость воды; $G_{кр}$, $\Delta T_{кр}$ – массовый расход и нагрев воды в кристаллизаторе.

В ЗВО на широкой грани сляба задается граничное условие:

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial x|_{x=\pm B} = \mu_i \cdot g_i + q_{роli}, \tau_{кр} < \tau \leq \tau_m = L_m / v, \quad (7)$$

где $g_i = G_i / (2A \cdot L_i)$ – удельный расход воды из охлаждающих форсунок в i -ой секции ЗВО; $2A$ – ширина сляба; L_i – длина i -ой секции; μ_i – эмпирические коэффициенты, разные для секций с водяным и водовоздушным охлаждением; $q_{роli}$ – плотность теплового потока, отводимого роликами в i -ой секции:

$$q_{роli} = c_v \cdot G_{роli} \cdot \Delta T_{роli} / (2A \cdot L_i),$$

где $G_{роli}$, $\Delta T_{роli}$ – массовый расход и нагрев воды в роликах i -ой секции ЗВО; L_m – длина МНЛЗ, включая ЗВО с кристаллизатором.

В зоне воздушного охлаждения теплообмен описывается выражением:

$$-\lambda \partial T / \partial n|_{\text{пов}} = \varepsilon_{пр} \cdot c_0 \left[(T_{\text{пов}} / 100)^4 - (T_{\text{о.с}} / 100)^4 \right], \tau_m < \tau \leq \tau_m + \tau_b, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $T_{\text{пов}}$, $T_{\text{о.с}}$ – абсолютные температуры поверхности сляба и охлаждающей среды; $\tau_b = L_b / v$ – длительность охлаждения на воздухе; L_b – длина зоны воздушного охлаждения.

После газорезки горячие слябы должны сразу диагностироваться на наличие

(отсутствие) поверхностных дефектов. Слябы с дефектами поверхности направляются на огневую зачистку. Слябы без поверхностных дефектов должны помещаться в термостат, стенки которого должны быть выполнены из огнеупорного материала с низким коэффициентом теплопроводности. В идеальном термостате потери физической теплоты сляба через стенки отсутствуют, в реальном термостате для компенсации потерь теплоты можно подогревать стенки термостата изнутри. В зависимости от конкретных условий термостаты могут туннельного (проходного) типа или представлять из себя транспортабельные закрытые боксы. В частности, при оптимальном использовании физической теплоты слябов, на участке МНЛЗ до газорезки могут быть установлены термостаты туннельного типа.

На поверхности сляба в термостате задается условие:

$$-\lambda \cdot \partial t / \partial n|_{\text{пов}} = q_{\text{терм}}, \quad \tau_{\text{м}} + \tau_{\text{в}} < \tau \leq \tau_{\text{м}} + \tau_{\text{в}} + \tau_{\text{т}}, \quad (9)$$

где $q_{\text{терм}}$ – удельные потери теплоты в термостате; $\tau_{\text{т}}$ – длительность нахождения в термостате. В идеальном термостате величина $q_{\text{терм}} = 0$.

В термостате происходит выравнивание температуры по сечению сляба, и в нагревательную печь поступают слябы со среднемассовой температурой $T_{\text{м0}}$. В оптимальном случае, когда $T_{\text{м0}} = T_{\text{м}}$ (где $T_{\text{м}}$ – требуемая температура металла перед прокаткой), нагрев слябов в печи не требуется.

Если $T_{\text{м0}} < T_{\text{м}}$, то необходим нагрев сляба в печи. Для нагрева и выравнивания температур сляба в трехзонной методической печи предложен режим нагрева и томления, показанный на рис. 3.

В методической и сварочной зонах печи температура в рабочем пространстве изменяется по зависимостям:

$$T_{\text{п}}(\tau) = \begin{cases} T_{\text{п1}} + (T_{\text{п2}} - T_{\text{п1}}) \cdot \tau / \tau_{\text{н1}}, & 0 < \tau < \tau_{\text{н1}}; \\ T_{\text{п2}}, & \tau_{\text{н1}} < \tau < \tau_{\text{н}} = \tau_{\text{н1}} + \tau_{\text{н2}}, \end{cases} \quad (10)$$

где τ – время, проведенное слябом в печи; $\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{н1}} + \tau_{\text{н2}}$ – полная длительность нагрева; $\tau_{\text{н1}}$, $\tau_{\text{н2}}$, $\tau_{\text{тм}}$ – длительности нахождения сляба в методической, сварочной и томильной зонах; $\tau_{\text{н1}} = L_{\text{н1}}/w$; $\tau_{\text{н2}} = L_{\text{н2}}/w$, где $L_{\text{н1}}$, $L_{\text{н2}}$, – длины методической и сварочной зон; w – скорость перемещения слябов в печи; $T_{\text{п1}}$ – температура газов на входе сляба в печь; $T_{\text{п2}}$ – температура в сварочной зоне. В частном случае может выполняться: $T_{\text{п1}} = T_{\text{п2}} = T_{\text{п}}$.

В методической и сварочной зонах происходит двухсторонний нагрев сляба, томильная зона служит для выравнивания температуры в слябе.

Температурное поле сляба в печи описывается уравнением:

$$c(T) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (11)$$

где $T(x, \tau)$ – температурное поле сляба в печи; $\tau = z'/w$ – время нахождения сляба в печи; z' – координата технологической оси методической печи.

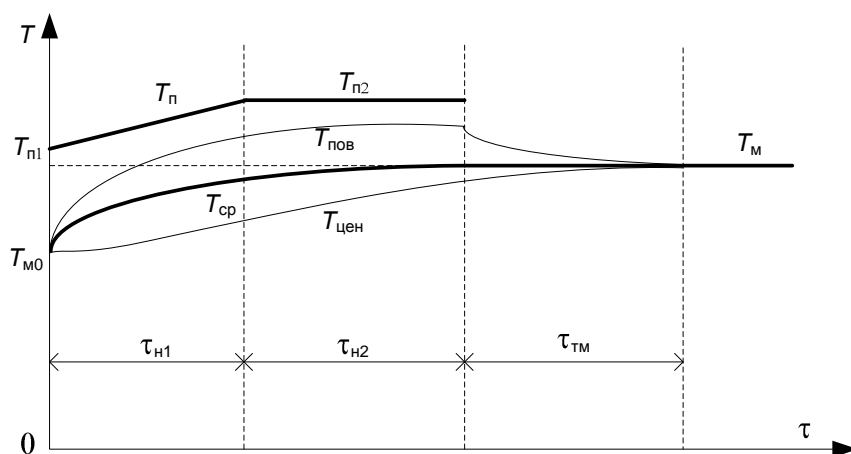


Рис. 3. Режим нагрева и томления сляба в методической печи; T_n – температура в рабочем пространстве печи; $T_{пов}$, $T_{цен}$ – температуры поверхности и центра сляба; $T_{ср}$ – средняя температура сляба; T_m – требуемая температура металла перед прокаткой.

В методической и сварочной зонах печи теплообмен на обеих поверхностях сляба при двухстороннем нагреве описывается выражением

$$\lambda \cdot \partial T / \partial x|_{x=\pm B} = C_{пр} \cdot \left((T_n(\tau)/100)^4 - (T_{пов}/100)^4 \right), \quad (12)$$

где $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения от греющих газов и кладки к нагреваемому металлу, различный для разных зон печи.

В томильной зоне печи на верхней поверхности сляба ($x = B$) и на нижней поверхности ($x = -B$) задается адиабатное условие:

$$\partial T / \partial x|_{x=\pm B} = 0. \quad (13)$$

Средняя энтальпия металла рассчитывается по выражению:

$$h_{ср}(\tau) = (1/(A \cdot B)) \int_0^A \int_0^B h(T(x, \tau)) dx \cdot dy, \quad (14)$$

где $h(T)$ – энтальпия стали, которая рассчитывается по выражениям:

$$h = \begin{cases} \bar{c}(T) \cdot T, & T < T_s; \\ \bar{c}(T) \cdot T + L, & T > T_l; \\ \bar{c}(T) \cdot T + L(T - T_s)/(T_l - T_s), & T_s < T < T_l, \end{cases}$$

где \bar{c} – средняя теплоемкость стали в интервале температур $0 \div T$ °С.

Величине $h_{ср}$ соответствует среднемассовая температура стали $T_{ср}$.

Выражения (1) – (14) составляют математическую модель затвердевания, охлаждения, термостатирования, нагрева и томления сляба, позволяющую последовательно рассчитывать температурное поле сляба на линии «МНЛЗ – термостат - нагревательная печь».

Тепловое состояние сляба определяется температурой поверхности сляба $T_{пов}$ и его центра $T_{цен}$, средними энтальпией $h_{ср}$ и температурой $T_{ср}$, максимальным градиентом температур ∇T_{max} в данном сечении сляба.

Разработан метод оценки теплового состояния сляба в МНЛЗ, основанный на экспериментальном исследовании теплового баланса слябовой ролико-форсуночной МНЛЗ с водовоздушными форсунками при стационарных режимах разлива.

Тепловой поток Q , кВт, подводимый с жидкой сталью с температурой $t_{ж}$, °С, к кристаллизатору МНЛЗ, определяется по выражению:

$$Q = \rho \cdot (v/60) \cdot F \cdot h_0, \quad (15)$$

где ρ – плотность стали, кг/м³; $F = A \cdot B$ – площадь сечения охлажденного сляба, м²; A , B – ширина и толщина сляба, м; v – скорость вытягивания сляба в МНЛЗ (скорость разлива), м/мин; h_0 – энтальпия жидкой стали, кДж/кг, соответствующая температуре T_0 .

Величины v , $t_{ж}$, A , B регистрируются в АСУ МНЛЗ, поэтому определение величины Q по выражению (15) не представляет сложности.

Теплота Q распределяется следующим образом:

$$Q = Q_{кр} + Q_{рол} + Q_{пвс} + Q_{сл} + Q_{пот} + Q_{сляб}, \quad (16)$$

где $Q_{кр}$ – теплота, отводимая водой, охлаждающей изнутри рабочие стенки кристаллизатора МНЛЗ; $Q_{рол}$ – теплота, отводимая водой, охлаждающей изнутри ролики и другое поддерживающее оборудование МНЛЗ; $Q_{пвс}$ – теплота, отводимая паровоздушной смесью (ПВС), удаляемой из бункера ЗВО; $Q_{сл}$ – теплота, отводимая неиспарившееся водой, сливающейся с поверхности сляба в ЗВО; $Q_{пот}$ – потери теплоты рассеянием в разливочный цех; $Q_{сляб}$ – физическая теплота сляба на выходе из МНЛЗ.

Материальные и тепловые потоки в криволинейной МНЛЗ показаны схематично на рис. 4.

На один ручей МНЛЗ приходится один кристаллизатор, где происходит первичное затвердевание сляба, и большое количество поддерживающих и тянущих сляб роликов (до 90 пар и более), между которыми в бункере ЗВО расположены водяные или водовоздушные форсунки, подающие распыленную воду на поверхность широких граней сляба. Также форсунками охлаждаются узкие грани сляба в начале ЗВО. Вода, подаваемая из форсунок, частично превращается в пар, который смешиваясь с воздухом, поступающим в бункер из-за подсосов, образует ПВС. Вода, которая не испарилась, сливается по открытому желобу из бункера.

Из статей теплового баланса в выражении (16) экспериментально проще всего определить величины $Q_{кр}$ и $Q_{рол}$, кВт, на основе выражений:

$$Q_{кр} = c_v \cdot G_{кр} \cdot \Delta t_{кр}; \quad Q_{рол} = c_v \cdot G_{рол} \cdot \Delta t_{рол}, \quad (17)$$

где c_v – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); $G_{кр}$, $G_{рол}$ – суммарные расходы воды, охлаждающей кристаллизатор и ролики, кг/с; $\Delta t_{кр}$, $\Delta t_{рол}$ – средний нагрев воды в кристаллизаторе и в роликах, К. Величины $G_{кр}$, $G_{рол}$, $\Delta t_{кр}$, $\Delta t_{рол}$ регистрируются в АСУ МНЛЗ.

Остальные величины в выражении (16) не определить по данным, регистрируемым в АСУ МНЛЗ. Для этого дополнительно нужно измерить температуру $t_{пв}$, °С, давление $p_{пв}$, Па, и объемный расход $V_{пв}$, м³/с, паровоздушной смеси, удаляемой из бункера ЗВО по специальному паровоздуховоду, среднюю температуру $t_{возд}$ воздуха в цехе, который подсасывается в бункер ЗВО и составляет основную долю в ПВС, а также температуру сливающейся воды $t_{сл}$ на выходе из бункера ЗВО.

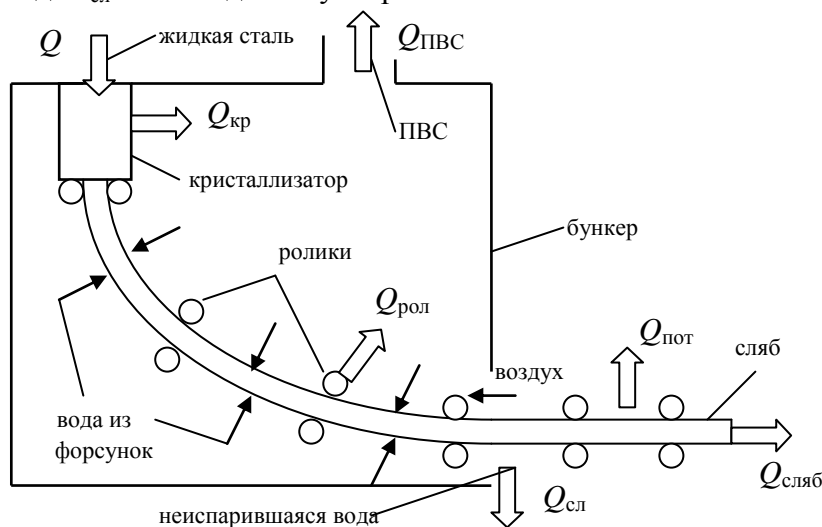


Рис. 4. Схема материальных и тепловых потоков в МНЛЗ.

Из суммарного расхода $\Sigma G_{вод}$ воды, кг/с, подаваемой на все форсунки в ЗВО, получают расходы пара $\Sigma G_{п}$, кг/с, и неиспарившейся воды $\Sigma G_{сл}$, кг/с:

$$\Sigma G_{вод} = \Sigma G_{п} + \Sigma G_{сл}; \quad (18)$$

Долю воды, подаваемой из форсунок данной секции и превращающейся в пар, обозначим как $x_{п}$, и назовем коэффициент выхода пара. Тогда $G_{п} = x_{п} \cdot G_{вод}$, где $G_{вод}$ и $G_{п}$ – расходы воды и пара для данной секции. Суммарный выход пара из всех секций ЗВО (число секций может быть до 10), определяется так:

$$\Sigma G_{п} = \Sigma (x_{п} \cdot G_{вод}) = \bar{x}_{п} \cdot \Sigma G_{вод}, \quad (19)$$

где $\bar{x}_{п}$ – средний коэффициент выхода пара в ЗВО.

При смешении пара с воздухом, поступающим в бункер ЗВО, часть пара превращается в капельки взвешенного конденсата с расходом $G_{к}$. В результате расход ПВС, удаляемой

из бункера, складывается из расхода пара $G'_п = \Sigma G_п - G_к$, неизвестного расхода воздуха $G_{возд}$, поступающего в бункер, и расхода конденсата $G_к$, частично выпадающего на стенки паровоздуховода.

Величина $G_{вод}$ для каждой секции регистрируется в АСУ МНЛЗ, для определения суммарного расхода пара $\Sigma G_п$ получено выражение:

$$\Sigma G_п = \rho_{пв} \cdot V_{пв} / (\beta(1 + d_п)), \quad (20)$$

где $\beta = G_{возд} / \Sigma G_п$, кг/кг, где $G_{возд}$ – расход воздуха в ПВС; $\rho_{пв}$ – плотность ПВС в паровоздуховоде без учета конденсата, кг/м³, и $d_п = G'_п / G_{возд}$ – паросодержание в ПВС, кг/кг. Величины $\rho_{пв}$ и $d_п$ однозначно определяются по известным выражениям по температуре $t_{пв}$ и давлению $p_{пв}$ ПВС.

Объемный расход $V_{пв}$ и давление $p_{пв}$ определялся с помощью трубок Пито, устанавливаемых в паровоздуховоде; температуры $t_{пв}$, $t_{возд}$, $t_{сл}$ – ртутными термометрами. Величина β однозначно определяется параметрами $p_{пв}$, $t_{пв}$, $t_{возд}$.

Тепловой поток, отводимый ПВС, определяется выражением:

$$Q_{пвс} = \Sigma G_п \cdot (h'' - h_{вод}), \quad (22)$$

где $h'' \cong 2676$ – энтальпия сухого насыщенного пара при атмосферном давлении в бункере, кДж/кг; $h_{вод} = c_в \cdot t_{вод}$ – энтальпия воды, подаваемой на форсунки; температура воды $t_{вод}$ регистрируется в АСУ МНЛЗ.

Тепловой поток, отводимый неиспарившейся водой, сливающейся в желоб, определяется выражением:

$$Q_{сл} = \Sigma G_{сл} \cdot c_в \cdot (t_{сл} - t_{вод}), \quad (23)$$

где расход сливающейся воды определяется из (18): $\Sigma G_{сл} = \Sigma G_{вод} - \Sigma G_п$.

Потери теплоты рассеянием $Q_{пот}$ имеют место в основном вне бункера МНЛЗ и эту величину можно включить в физическую теплоту сляба $Q_{сляб}$.

Исследуя тепловой баланс МНЛЗ с помощью выражений (15)-(23), можно определить параметр σ , входящий в выражение (6), и параметры μ_i и $q_{роли}$, входящие в выражение (7), что позволит более корректно задать условия охлаждения сляба в кристаллизаторе и ЗВО, и тем самым более точно оценить тепловое состояние сляба на выходе из МНЛЗ.

В третьем разделе приведена система алгоритмов для прогнозирования и оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева сляба на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь»:

- алгоритм расчета температурного поля сляба в криволинейной ролико-форсуночной МНЛЗ, на воздухе и в термостате, в методической нагревательной печи, и оценки его теплового состояния ($h_{ср}$, $T_{ср}$, ∇T) на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь»;
- алгоритм оптимизации режимов охлаждения, термостатирования, нагрева и томления сляба на линии «МНЛЗ – нагревательная печь», позволяющий определять оптимальные длительности охлаждения на воздухе $\tau_{о.опт}$, нахождения сляба в термостате $\tau_{т.опт}$, нагрева сляба $\tau_{н.опт}$ в методической печи, томления сляба $\tau_{тм.опт}$ в методической печи, обеспечивающие поступление сляба на прокатку с заданной среднemasсовой температурой $T_м$ и допустимым градиент температур по сечению сляба на выходе из термостата $\nabla T_м$.

Входными параметрами в алгоритме расчета температурного поля сляба являются: температура жидкого металла T_0 ; скорость разлива v ; удельные расходы охлаждающей воды на форсунки в ЗВО g_i , теплота, отводимая роликами в секциях ЗВО $q_{роли}$, удельные потери теплоты в термостате $q_{терм}$; длительности затвердевания сляба в МНЛЗ $\tau_м$, охлаждения сляба на воздухе $\tau_в$ и в термостате $\tau_т$; температуры в печи $T_{п1}$, $T_{п2}$; длительности нагрева и томления $\tau_{н1}$, $\tau_{н2}$, $\tau_{тм}$; геометрические условия Γ (сечение сляба, длины зон МНЛЗ и др.); теплофизические параметры ТП ($C_{эф}$, ρ , $\lambda_{эф}$, $c_{пр}$ и др.).

В данном алгоритме численно методом конечных разностей рассчитывается температурное поле сляба последовательно в кристаллизаторе и зоне вторичного

охлаждения МНЛЗ, в зоне охлаждения на воздухе, в термостате, в методической, сварочной и томильной зонах нагревательной печи.

Выходными параметрами являются: изменение температур поверхности сечения сляба $T_{\text{пов}}(\tau)$ и его центра $T_{\text{цен}}(\tau)$ в зависимости от времени τ , прошедшего с момента разливки; среднемассовые энтальпия $h_{\text{cp}}(\tau)$ и температура $T_{\text{cp}}(\tau)$, максимальный градиент температур $\nabla T(\tau)$ в сечении сляба.

На основе алгоритма расчета температурного поля сляба и оценки его теплового состояния разработан алгоритм оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь», показанный на рис. 5, который обеспечивает поступление сляба на прокатку с заданной среднемассовой температурой $T_{\text{м}}$ и допустимым градиентом температур по сечению сляба $\nabla T_{\text{м}}$. Оптимизации подлежат следующие параметры: длительность охлаждения сляба в зоне воздушного охлаждения τ_0 ; длительность термостатирования $\tau_{\text{т}}$; длительность нагрева в нагревательной печи $\tau_{\text{н}}$; длительность томления в печи $\tau_{\text{тм}}$.

Исходными данными для этого алгоритма являются данные по МНЛЗ, термостату и нагревательной печи: геометрические условия (ГУ), технологические параметры (ТП), температурные условия (ТУ), теплофизические параметры (ТФ), расчетные параметры (РП), временные условия (ВУ). Кроме того, задаются средняя температура металла перед прокаткой $T_{\text{м}}$, и допустимый градиент температур по сечению сляба перед прокаткой $\nabla T_{\text{м}}$. Предварительно оптимизируемым параметрам присваиваются нулевые значения: $\tau_0 = \tau_{\text{т}} = \tau_{\text{н}} = \tau_{\text{тм}} = 0$.

При этих исходных данных производится расчет температурного поля в МНЛЗ и термостате, и на выходе из термостата определяются средняя температура сляба T_{cp} и максимальный градиент температур ∇T_{max} . Если величина T_{cp} больше требуемой температуры $T_{\text{м}}$, то длительность охлаждения τ_0 увеличивается до тех пор, пока средняя температура сляба на выходе из термостата T_{cp} не станет равной $T_{\text{м}}$. Если максимальный градиент температур ∇T_{max} на выходе из термостата больше допустимого градиента $\nabla T_{\text{м}}$, то длительность термостатирования $\tau_{\text{т}}$ увеличивается до тех пор, пока величина ∇T_{max} не станет равной $\nabla T_{\text{м}}$. Значения τ_0 и $\tau_{\text{т}}$ принимаются за оптимальные, при этом нагрев и томления сляба в печи не требуется: $\tau_{\text{н.опт}} = \tau_{\text{тм.опт}} = 0$.

Если при исходных данных ($\tau_0 = \tau_{\text{т}} = \tau_{\text{н}} = \tau_{\text{тм}} = 0$) средняя температура сляба на выходе из термостата T_{cp} меньше требуемой температуры $T_{\text{м}}$, то оптимальная длительность охлаждения сляба на воздухе τ_0 принимается равной нулю, а длительность термостатирования $\tau_{\text{т}}$ увеличивается до тех пор, пока величина ∇T_{max} не станет равной или меньше $\nabla T_{\text{м}}$. Производится расчет температурного поля сляба в печи, причем длительность нагрева $\tau_{\text{н}}$ увеличивается до тех пор, пока средняя температура сляба T_{cp} на выходе из печи не станет равной требуемой температуре $T_{\text{м}}$. После этого длительность томления $\tau_{\text{тм}}$ увеличивается до тех пор, пока максимальный градиент температур ∇T_{max} на выходе сляба печи не станет равным или меньше, чем допустимый градиент $\nabla T_{\text{м}}$. Полученные значения τ_0 , $\tau_{\text{т}}$, $\tau_{\text{н}}$, $\tau_{\text{тм}}$ принимаются за оптимальные, причем в данном случае оптимальная длительность охлаждения сляба на воздухе составляет $\tau_{0,\text{опт}} = 0$.

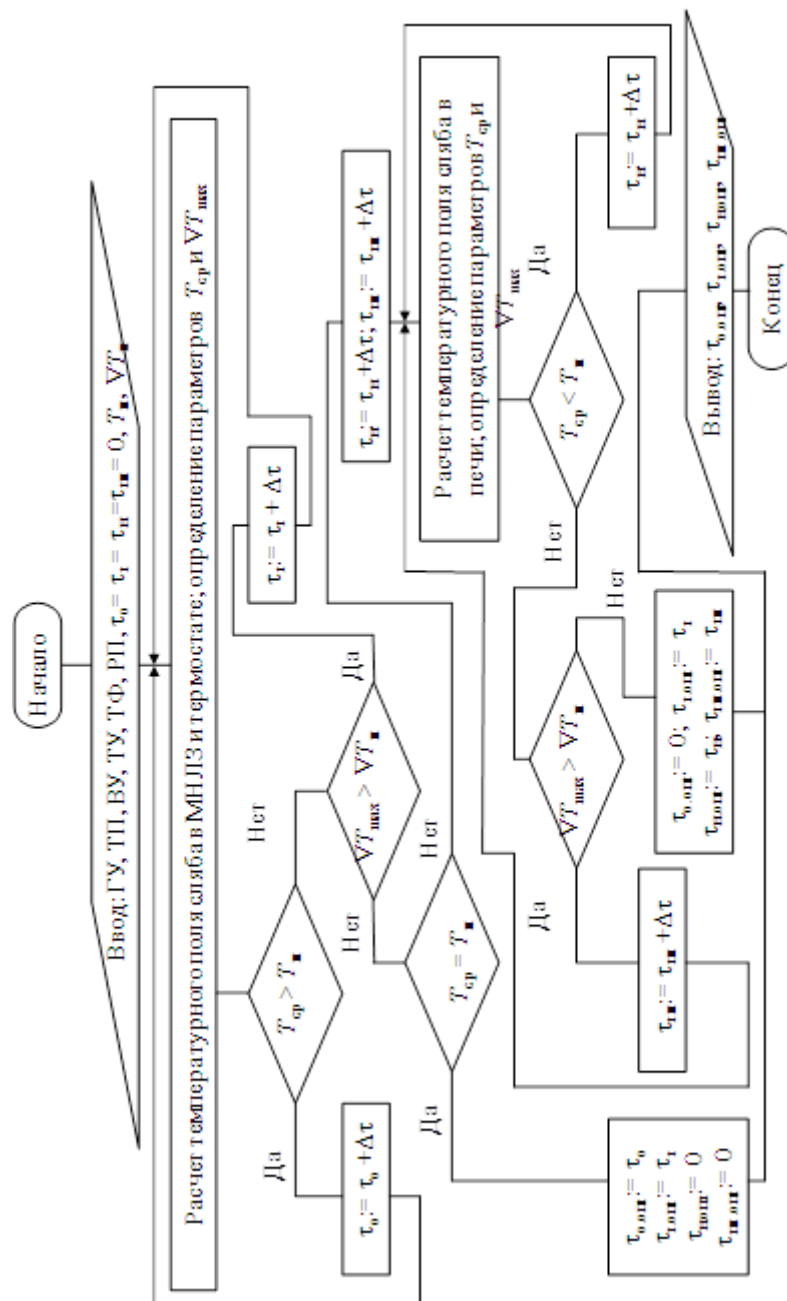


Рис. 5. Алгоритм оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь».

Таким образом, если средняя температура сляба T_{cp} на выходе из зоны вторичного охлаждения МНЛЗ больше требуемой температуры металла перед прокаткой T_m , то за счет оптимизации параметров охлаждения τ_0 и термостатирования τ_T можно обеспечить требуемое тепловое состояние сляба перед прокаткой без дополнительного нагрева в печи. В данном случае обеспечивается максимальная экономия топлива в нагревательных печах прокатного производства.

В случае, когда средняя температура сляба T_{cp} на выходе из зоны вторичного охлаждения МНЛЗ меньше требуемой температуры металла перед прокаткой T_m , требуется нагрев и томление сляба в печи, чтобы обеспечить требуемое тепловое состояние сляба перед прокаткой. В этом случае термостатирование перед печью выполняется для выравнивания температурного поля сляба перед загрузкой в печь. Оптимизация параметров нагрева τ_n и томления τ_{TM} позволяет обеспечить максимально быстрый нагрев сляба до нужного теплового состояния перед прокаткой.

Для реализации разработанных алгоритмов было разработано программное обеспечение на языке программирования Visual Basic. Система дифференциальных

уравнений, описывающих температурное поле сляба, решалась численно методом конечных разностей. В работе проведено тестирование конечно-разностных схем, и установлены величины временного и пространственных шагов, обеспечивающих необходимую точность расчета.

В четвертом разделе разработана функциональная схема системы прогнозирования технологических режимов производства слябов на линии МНЛЗ-нагревательная печь, приведены результаты экспериментального опробования разработанной системы прогнозирования режимов охлаждения и термостатирования слябов, а также результаты расчетных исследований на основе разработанных алгоритмов оптимизации режимов тепловой обработки слябов.

Функциональная схема системы оценки теплового состояния стальных слябов на линии МНЛЗ-нагревательная печь содержит следующие основные блоки:

- блок сбора информации о параметрах технологического процесса разливки (1) представлен базой данных, получаемых с МНЛЗ;
- блок задания параметров процесса (2) представлен нормативной документацией и соответствующими технологическими инструкциями;
- блок получения и обработки информации о химическом составе и теплофизических свойствах стали (3), представленный базой данных о химическом составе сталей и теплофизических свойствах стали;
- блок вычисления параметров разливки (4) представлен программным обеспечением обработки информации на базе промышленного компьютера;
- блок определения длительностей охлаждения сляба на воздухе и в термостате (5) (реализован программно);
- блок вычисления теплового состояния сляба на линии «МНЛЗ-нагревательная печь» (6), реализованный программно;
- блок определения длительностей нагрева и томления в нагревательной печи (7), реализованный программно;
- блок отображения результата операторам нагревательной печи и прокатного стана (9), реализованный программно (интерфейсная часть программы).

Для экспериментальных исследований, расчета и проверки предложенных алгоритмов использовались данные, регистрируемые в АСУ МНЛЗ (скорость разливки, сечение сляба, марка стали, расходы охлаждающей воды на кристаллизатор, ролики и форсунки, температура охлаждающей воды на входе и выходе кристаллизатора и роликов, температура охлаждающей воды на форсунки ЗВО), данные, полученные с помощью специального измерительного оборудования (расход и температура паровоздушной смеси, удаляемой из бункера ЗВО МНЛЗ, температура воздуха в цехе, температура неиспарившейся воды на выходе из бункера ЗВО, и данные, полученные с помощью и программного обеспечения).

Исходные данные для расчета температурного поля сляба и оценки его теплового состояния включают:

- геометрические параметры: толщина $2B$ и ширина $2A$ сляба; рабочая длина кристаллизатора МНЛЗ $L_{кр}$; длины секций зоны вторичного охлаждения МНЛЗ L_i , $i = 1, 2, \dots, n$; длина зоны охлаждения на воздухе L_a ; длины методической $L_{н1}$, сварочной $L_{н2}$, и томильной $L_{тм}$ зон методической нагревательной печи;
- технологические параметры: скорость вытягивания сляба в МНЛЗ v ; расход воды в кристаллизаторе МНЛЗ $G_{кр}$; расходы воды в роликах i -й секции $G_{роли}$, $i = 1, 2, \dots, n$; расходы воды на форсунки i -й секции G_i , $i = 1, 2, \dots, n$; скорость перемещения слябов в методической печи w ;
- температурные параметры: начальная температура жидкой стали T_0 ; температура воды, подаваемой на форсунки $T_в$; нагрев воды в кристаллизаторе $\Delta T_{кр}$; нагрев воды в роликах i -

й секции $\Delta T_{\text{роли}}$; температура окружающей среды воздуха $T_{\text{о.с}}$; температуры в рабочем пространстве печи $T_{\text{п1}}, T_{\text{п2}}$; температура металла перед прокаткой $T_{\text{м}}$;

- временные параметры: длительности нахождения сляба в МНЛЗ $\tau_{\text{м}}$, на воздухе после МНЛЗ $\tau_{\text{о}}$, в термостате $\tau_{\text{т}}$, в методической и сварочной зонах печи $\tau_{\text{н1}}, \tau_{\text{н2}}$, в томильной зоне печи $\tau_{\text{тм}}$;

- постоянные теплофизические параметры: эмпирические коэффициенты μ_i для секций с водяным и водовоздушным охлаждением; степень черноты поверхности сляба ε ; приведенная степень черноты в зоне воздушного охлаждения $\varepsilon_{\text{пр}}$; приведенные коэффициенты излучения от греющих газов и кладки к металлу в методической и сварочных зонах печи $c_{\text{пр1}}, c_{\text{пр2}}$;

В специальном блоке программы рассчитываются переменные теплофизические параметры: коэффициент теплопроводности λ , плотность ρ , эффективная теплоемкость $C_{\text{эф}}$ стали в зависимости от температуры.

Для экспериментальной проверки в качестве объекта была выбрана слябовая МНЛЗ № 3 на ЧМК ПАО «Северсталь». При разливке стального сляба из среднеуглеродистой стали шириной $2A = 1450$ мм и толщиной $2B = 250$ мм на основе исследования теплового баланса кристаллизатора и ЗВО МНЛЗ в натуральных условиях были получены данные по интенсивности охлаждения сляба в кристаллизаторе и ЗВО.

Установлено значение параметра σ в выражении (6), характеризующего интенсивность охлаждения сляба в кристаллизаторе: $\sigma = 4,916 \text{ МВт} \cdot \text{м}^{0,5}$.

Установлены значения параметров μ_i в выражении (7), характеризующие интенсивность охлаждения сляба в ЗВО: для секций с водяным охлаждением $\mu_i = 93,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$; для секций с водовоздушным охлаждением $\mu_i = 317,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$.

На основе измерения пирометром температуры поверхности сляба и сравнения с расчетным значением, были установлена приведенная степень черноты $\varepsilon_{\text{пр}}$ в выражении (8), характеризующая интенсивность охлаждения сляба в зоне воздушного охлаждения: $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,71$.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных, учитывая погрешности измерения, показало, что разработанная модель позволяет с достаточной точностью оценивать тепловое состояние сляба при его охлаждении в МНЛЗ, включающей кристаллизатор, ЗВО и зону воздушного охлаждения.

На основе разработанной математической модели производились расчеты затвердевания сляба в МНЛЗ, охлаждения на воздухе и в термостате, нагрева и томления сляба в методической печи.

Например, на рис. 6 показано изменение температур на поверхности $T_{\text{пов}}$ и в центре сляба $T_{\text{цен}}$ при разливке сляба из углеродистой стали 20 толщиной 250 мм со скоростью 1,08 м/мин при оптимальном использовании физической теплоты сляба после МНЛЗ.

Чтобы получить на выходе из обогреваемого термостата (без потерь теплоты) среднemasсовую температуру сляба $t_{\text{м}} = 1250$ °С, нужно, чтобы в момент $\tau = 23,8$ мин сляб из зоны воздушного охлаждения сляба поступал в термостат, при этом время, проведенное слябом в зоне воздушного охлаждения, составит $\tau_{\text{о.опт}} \cong 7$ мин. После помещения сляба в термостат температура в центре сляба $t_{\text{ц}}$ понижается, а температура на поверхности $t_{\text{п}}$ – увеличивается, стремясь к значению $t_{\text{м}} = 1250$ °С. Градиенту температуры $\nabla T_{\text{м}} = 2 \text{ К}/\text{см}$ соответствует момент $\tau = 37,9$ мин на рис. 6, при этом оптимальная длительность выдержки сляба в термостате составит $\tau_{\text{т.опт}} \cong 14,1$ мин.

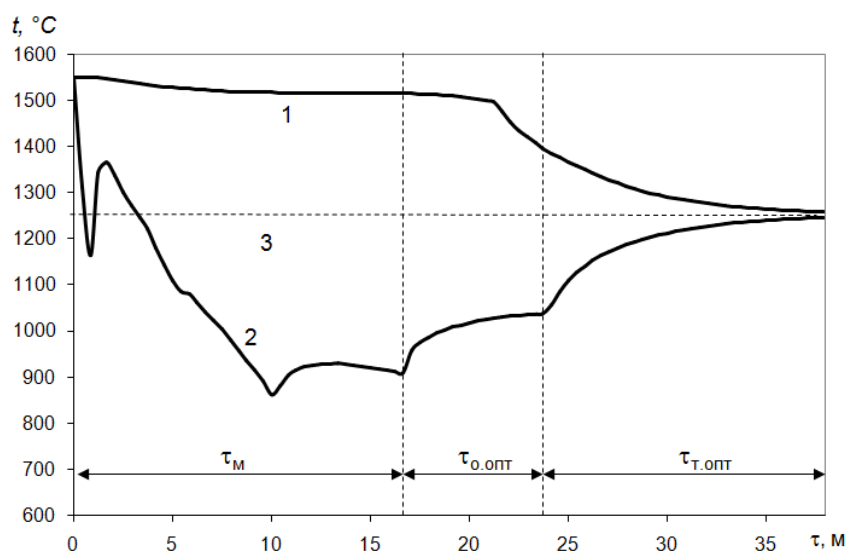


Рис. 6. Оптимальный режим охлаждения и термостатирования сляба в МНЛЗ; 1 – температура в центре сляба; 2 – температура в поверхности в центре широкой грани сляба; 3 – требуемая температура металла перед прокаткой

Рассчитаны оптимальные режимы нагрева и томления слябов в нагревательной печи. Так, на рис. 7 показан оптимальный нагрева и томления сляба толщиной 250 мм с температурой загрузки $T_{M0} = 1000$ °С при температуре в печи $T_{п} = 1350$ °С. Параметры сляба перед прокаткой: $T_M = 1250$ °С, $\nabla T_M = 1$ К/см. Из рис. 7 следует, что после загрузки сляба в печь, температура его поверхности (кривая 1) в нагревательных зонах печи быстро возрастает, стремясь к температуре в печи $t_{п} = 1350$ °С. Температура в центре сляба (кривая 2) также возрастает, но с некоторым запозданием, обусловленным тепловой инерцией. Средняя температура сляба (кривая 3) монотонно возрастает. В момент $\tau = 55$ мин после загрузки в печь среднemasсовая температура $T_{ср} = 1250$ °С. В этот момент $T_{ср} = T_M$, т.е. среднemasсовая температура сляба равняется требуемой температуре металла перед прокаткой. Таким образом, оптимальная длительность нагрева в данном случае составляет $\tau_{н.опт} = 55$ мин.

Далее сляб поступает в томильную зону печи для выравнивания температуры по сечению. Допустимый градиент $\nabla t_M = 100$ К/м обеспечивается в момент $\tau = 64,5$ мин, таким образом, оптимальная длительность выдержки сляба в томильной зоне печи составляет $\tau_{т.опт} = 9,5$ мин.

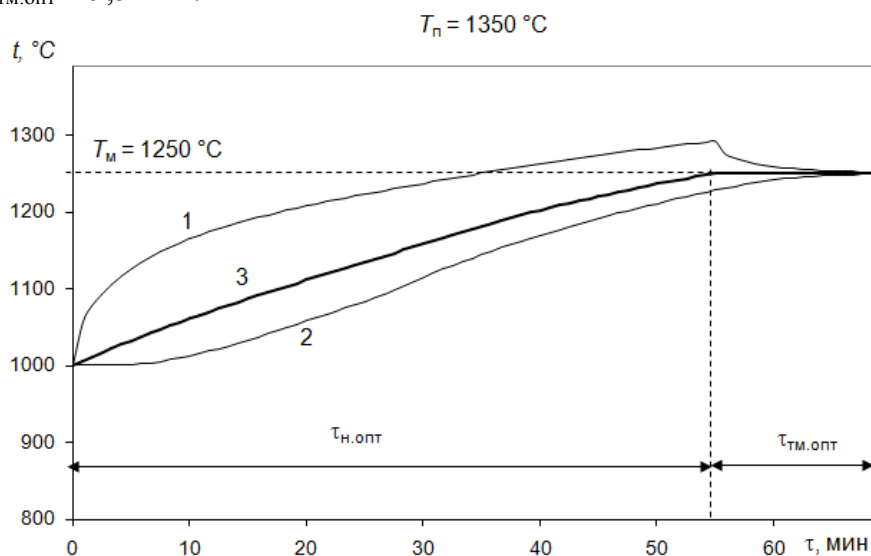


Рис. 7. Оптимальный режим нагрева и томления сляба в печи; 1 – температура на поверхности сляба; 2 – температура в центре сляба; 3 – средняя температура сляба; T_M –

требуемая температура металла перед прокаткой ($T_m = 1250$ °С); T_n – температура в печи ($T_n = 1350$ °С).

Оптимизация режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слябов может дать значительный эффект на металлургических комбинатах. Так, при оптимальном охлаждении и термостатировании сляба в МНЛЗ, когда на выходе из термостата слябы можно сразу подавать на прокатку, отпадает необходимость нагрева слябов в методических печах. При этом, например, на ЧМК ПАО «Северсталь» экономия природного газа может составить примерно 830 млн. м³ в год. При стоимости природного газа 3,6 руб/м³, денежная экономия для ЧМК ОАО «Северсталь» составит 3 млрд. руб. в год.

При загрузке в нагревательные печи слябов с температурой 1000 °С длительность нагрева до средней температуры 1250 °С сокращается примерно в 2,5 раза по сравнению со случаем, когда слябы загружаются в холодном состоянии; удельный расход топлива сокращается примерно в пять раз, потери металла от окисления – в 1,6 раза. Применительно к ЧМК ПАО «Северсталь» экономия газообразного топлива (природного газа) составит в год 700 тыс. тонн условного топлива, что составляет почти 10 % от всего топлива, потребляемого на комбинате в год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе сделано следующее:

1. Разработано математическое обеспечение системы оценки теплового состояния сляба при охлаждении, термостатировании и нагреве на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».
2. Разработан экспериментально-расчетный метод оценки теплового состояния сляба в ролико-форсуночной МНЛЗ с водовоздушными форсунками, основанный на исследовании теплового баланса МНЛЗ.
3. Разработано алгоритмическое обеспечение системы оценки теплового состояния и оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева стальных слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь», позволяющие минимизировать длительность нагрева сляба в печи, и расход топлива, потребляемого печью.
4. Разработано программное обеспечение, позволяющее численно производить оценку теплового состояния сляба и оптимизировать режимы охлаждения, термостатирования, нагрева и томления стальных слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».
5. Проведены экспериментальные исследования моделей и алгоритмов обработки информации в системе оценки технологических параметров производства слябов на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».

При использовании результатов работы на металлургических комбинатах может быть достигнута значительная экономия топлива в нагревательных печах прокатного производства, а также повышение их производительности.

Основное содержание диссертации отражено в **15 работах:**

Публикации в рецензируемых научных журналах по перечню ВАК РФ:

1. Лукин, С.В. Уменьшение теплового загрязнения при разливке стали на машинах непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, В.М. Аленичев, А.Н. Кибардин // Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 5. – С. 48–53.
2. К вопросу оптимизации геометрических размеров охлаждающих каналов рабочей стенки целевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, Ю.А. Калягин, А.Н. Кибардин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 2. Т. 1. – С. 11–14.

3. Лукин, С.В. Утилизация низкопотенциальной теплоты в системе охлаждения машины непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, В.В. Мухин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2012. – № 2. Т. 1. – С. 11–14.
4. Лукин, С.В. Использование теплоты охлаждения стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия / С.В. Лукин, Д.В. Поселюжный, А.Н. Кибардин // Промышленная энергетика. – 2013. – № 5. – С. 7–9.
5. Лукин, С. В. Исследование теплового баланса криволинейной машины непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, А.А. Кочкин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 3 (64). – С. 29–32.
6. Лукин, С.В. Оптимизация режимов нагрева и термостатирования слябов при горячем посяде в нагревательные печи / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, С.Е. Сидоренкова, А.А. Кочкин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 3 (72). – С. 11–14.
7. Лукин, С.В. Оптимальные режимы охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ-прокатный стан» / С.В. Лукин, В.И. Игонин, А.А. Кочкин, А.Н. Кибардин, В.В. Мухин, Ю.В. Антонова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 6 (75). – С. 16–20.
8. Лукин, С.В. Оптимальное использование физической теплоты слябов после машины непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин // Metallurg. – 2016. – № 7. – С. 38–43.
9. Lukin, S.V. Optimal use of physical heat in slabs issuing CCM / S.V. Lukin, A.N. Kibardin // Metallurgist. – November 2016. – Volume 60. Issue 7. – PP. 679–685.
10. Лукин, С.В. Алгоритмы оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ - нагревательная печь стан» / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, А.А. Кочкин, В.В. Мухин, Ю.В. Антонова, В.И. Игонин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – № 2 (77). – С. 23–30.

Публикации в сборниках научно-технических конференций:

11. Лукин, С.В. Утилизация теплоты охлаждения металла при разливке стали на машинах непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, С.В. Яковлев // Череповецкие чтения – 2011: Материалы всероссийской научно-практической конференции. – Череповец: ЧГУ, 2012. – С. 124-126.
12. Кибардин, А.Н. Расчет теплопередачи в рабочей стенке щелевого кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок / А.Н. Кибардин, С.В. Лукин // Технические науки – от теории к практике: Материалы X международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2012. С. 24–25.
13. Лукин, С.В., Поселюжный Д.В., Кибардин А.Н. Расчет теплопередачи от поверхности сляба в зоне вторичного охлаждения криволинейной машины непрерывного литья заготовок / С.В. Лукин, Д.В. Поселюжный, А.Н. Кибардин // Череповецкие научные чтения – 2012: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ч. 3:– Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 156-157.
14. Кибардин, А.Н. Возможность использования теплоты охлаждения стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок / А.Н. Кибардин, С.В. Лукин // Отраслевые аспекты технических наук: Материалы межд. науч. заоч. конф. «Перспективы научного развития теплофизики и теплотехники» – 2013. – № 1. – С. 12–14.
15. Кибардин, А.Н. Комплексное использование теплоты жидкой стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок / А.Н. Кибардин, С.В. Лукин // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы IX межд. науч.-техн. конф. – Вологда: ВГТУ, 2014. – С. 105–107.

КИБАРДИН Антон Николаевич

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
В СИСТЕМЕ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВА
СЛЯБОВ НА ЛИНИИ «МНЛЗ-НАГРЕВАТЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ»**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать __. __. 2017 Формат 60×84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл. печ. л. __, __.

Тираж 100 экз. Заказ № __

ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет»

162600, г. Череповец, пр. Луначарского, 5.

Отпечатано в издательстве ЧГУ