

УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 658

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ СЕКЦИЙ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

Сафонов Д.С.¹, Логунова О.С.²¹ ООО «Компас Плюс», г. Магнитогорск, Россия² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты научного исследования по построению системы автоматизированного проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок. Результаты анализа показали наличие необходимого теоретического аппарата в области математического моделирования теплового состояния тел и недостаточное развитие специализированных систем автоматизированного проектирования в области металлургии. В основу системы положена математическая модель теплового состояния заготовки и выполнено формализованное описание двух требований к поперечному тепловому профилю ее поверхности. Авторы работы предлагают оригинальную постановку задачи оптимизации для поиска множества векторов переменной длины с координатами, определяющими положение форсунок в каждом межроликовом пространстве. Методика решения оптимизационной задачи содержит два основных блока: решение задачи теплопроводности и итерационный выбор наилучшего решения, удовлетворяющего критерию оптимизации. Авторами предлагается структура интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений по выбору схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения, содержащая три сценария взаимодействия «проектировщик – система». В работе приводится анализ одного из полученных проектных решений. Результаты анализа показали, что полученное решение позволяет обеспечить сглаженный поперечный тепловой профиль поверхности заготовки. Получение оптимального решения по выбору координат форсунок в одном межроликовом пространстве требует около 300 итераций. Расчет одной схемы занимает около двух часов.

Ключевые слова: системы компьютерного инжиниринга, прогностическое моделирование, система анализа и синтеза проектных решений, машина непрерывного литья заготовок, конструкция секции вторичного охлаждения, схема расположения форсунок.

Введение

Современное промышленное производство использует технологические агрегаты, которые в своем составе имеют сложноструктурированные технологические узлы. Каждый из узлов вносит вклад в формирование качества производимой продукции или полуфабриката. Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является одним из агрегатов, используемых в металлургическом производстве, и на этапе непрерывной разливки закладываются предпосылки качества стального листа, балок и т.п., передающихся впоследствии в другие отрасли народного хозяйства.

Конструкция МНЛЗ предполагает наличие основных технологических узлов, среди которых наиболее сложными являются секции зоны

вторичного охлаждения (ЗВО). Обоснованность выбора проектных решений для схемы расположения форсунок в секциях является одним из условий обеспечения качества продукции и полуфабриката по требованию потребителя. Современное развитие аппарата математического моделирования теплового состояния заготовки позволяет выполнить разработку специализированных средств для интерактивного синтеза и последующего анализа проектных решений по конструкции секций вторичного охлаждения.

В области теории и практики проектирования и эксплуатации МНЛЗ накоплен значительный положительный опыт. Вопросы проектирования МНЛЗ и исследования температурных полей непрерывнолитых заготовок отражены в трудах зарубежных и российских исследователей. Труды

Ю.А. Самойловича, В. Thomas, Н.И. Шестакова, В.Т. Борисова определили развитие математической теории в области исследования теплового состояния заготовки. В области прогностического моделирования развития внутренних и поверхностных дефектов непрерывнолитой заготовки можно отметить труды J. Lee, J. Risso, B. Thomas, P. Du, J. Brimacombe, F. Pascon и др. В области практического применения и развития технологии непрерывной разливки следует выделить труды Д.П. Евтеева, В.А. Емельянова, В.Г. Лисиенко, В.М. Паршина, Л.В. Буланова, А.В. Куклева и др.

Однако, несмотря на проведенные исследования и значительное число публикаций в области проектирования и исследования работы ЗВО, остаются актуальными следующие проблемы:

- отсутствие комплексных методик синтеза и анализа проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ на основе моделирования теплового состояния заготовки при заданной схеме расположения форсунок;
- отсутствие критерия для оптимизации поперечного температурного профиля на поверхности заготовки, учитывающего условия симметричности и равномерности поля температур;
- отсутствие автоматизированных систем для интерактивного проектирования схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ и анализа теплового состояния заготовки в условиях новых схем расположения форсунок.

1. Цели и задачи исследования

Наличие указанных проблем определило цель научного исследования в области автоматизации проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок: совершенствование процесса проектирования конструкции секций вторичного охлаждения МНЛЗ на основе интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок. Для достижения цели в ходе проведения научных исследований выполнено решение задач:

- проведение теоретико-информационного анализа конструкции ЗВО МНЛЗ, направленного на выявление недостатков схемы расположения форсунок при получении непрерывнолитых заготовок пониженного качества и определение требований к схеме расположения форсунок;
- построение математической модели теплового состояния непрерывнолитой заготовки в ЗВО МНЛЗ, учитывающей влияние схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ на тепловое состояние заготовки, для интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения;

– проектирование и разработка интерактивной автоматизированной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ;

– проведение вычислительного эксперимента на основе интерактивной автоматизированной системы анализа и синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ для построения библиотеки оптимальных проектных решений.

Объектом исследования в работе является конструкция секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок, предметом исследования – процедуры проектирования схемы расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок.

Решение задач выполнялось с использованием методов: теории вероятностей и математической статистики при обработке данных, полученных в ходе пилотажного и специализированного экспериментов; математического моделирования при идентификации теплового поля непрерывнолитой заготовки в процессе ее затвердевания в ЗВО МНЛЗ в зависимости от схемы расположения форсунок и роликов в секциях вторичного охлаждения; численного решения уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода при наличии эмпирических зависимостей для физико-химических характеристик и зонально-секционном построении машин непрерывного литья заготовок; объектно-ориентированного программирования, компьютерной графики при разработке программного продукта для прогностического моделирования теплового состояния непрерывнолитой заготовки в условиях заданной конструкции секций вторичного охлаждения и синтеза оптимальных проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ.

2. Теоретико-информационный анализ конструкций машины непрерывного литья заготовок

В современной металлургической промышленности непрерывная разливка стали является доминирующим способом кристаллизации расплавленного металла в заготовки для последующей обработки. Ключевым звеном технологии непрерывной разливки является МНЛЗ, в которой происходит непосредственное формирование заготовки из подаваемого жидкого металла. Полученные заготовки поступают на последующие этапы передела, в частности в прокатное производство.

Прокат является одним из основных видов конечной продукции, реализуемой металлургическими предприятиями. Сферы его использования включают автомобильную, машинострои-

тельную, судостроительную, нефтяную и многие другие виды промышленности, что делает производство прокатной продукции важнейшей составляющей экономики страны. Непрерывная разливка, в свою очередь, является неотъемлемой частью современного технологического цикла производства прокатной продукции.

Значительные преимущества непрерывной разливки стали по отношению к разливке в изложницы, состоящие в высокой производительности и меньшем количестве технологических отходов, привели к тому, что в настоящее время производство стальных заготовок непрерывным способом составляет около 95%.

В США в течение последних трех лет выпуск стали составлял порядка 85 млн т в год, из них в среднем 98% отливалось методом непрерывной разливки. В Китае в 2013 году из 779 т выпущенной стали непрерывным методом было отлито 767 т, что также составляет около 98%. В России доля непрерывной разливки в выпуске стали несколько ниже - порядка 80% в последние три года, при годовом выпуске около 56 т.

Стремление обеспечить выпуск конкурентной продукции ведет к необходимости проектирования и ввода в эксплуатацию как новых, более совершенных МНЛЗ, участвующих в технологическом цикле, так и совершенствованию и реконструкции уже существующих. Конструкция МНЛЗ должна обеспечивать производство высококачественной продукции при соблюдении ряда часто противоречивых требований. Сложность протекающих в МНЛЗ тепловых, физических и химических процессов затрудняет поиск оптимальных проектных решений по конструкции как МНЛЗ в целом, так и ее отдельных узлов. В результате процесс проектирования новой МНЛЗ либо разработка проекта модернизации уже существующей машины требует значительных матери-

альных и временных затрат. Это делает актуальным вопрос создания новых, наукоемких средств и методов синтеза и анализа проектных решений по конструкции, в том числе разработке научных основ для создания автоматизированных систем проектирования МНЛЗ и ее отдельных узлов.

Теоретический анализ работ [1, 2] позволил выполнить классификацию машин непрерывного литья заготовок (рис. 1).

Построенная классификация позволила определить место проведенных научных исследований с точки зрения конструктивных особенностей машины непрерывного литья заготовок. В работе рассматривается конструкция секций вторичного охлаждения криволинейной машины непрерывного литья заготовок с любым соотношением сторон прямоугольного сечения и количеством ручьев.

Сложноструктурированная конструкция агрегата положила развитие крупным научным направлениям в области исследования работы машины непрерывного литья заготовок. Среди этих направлений наибольшее количество исследований проводится в областях: конструирования и моделирования работы кристаллизатора [3–5], математического моделирования теплового состояния непрерывнолитой заготовки в процессе ее нахождения в кристаллизаторе и зонах вторичного охлаждения [6–10], экспериментального исследования температурного поля поверхности заготовки [11–13], экспериментального исследования работы форсунок, используемых для подачи охладителя на поверхность заготовки [14–19], выбора схемы расстановки форсунок в секциях вторичного охлаждения [20, 21], оценки влияния интенсивности вторичного охлаждения на формирования внутренних и поверхностных дефектов заготовки [22], развития систем интеллектуальной поддержки управления непрерывной разливки стали [23].



Рис. 1. Схема классификации машин непрерывного литья заготовок

Результаты всех указанных направлений направлены на поиск оптимальных конструктивных и технологических решений для получения заготовки с заданным качеством. Несмотря на множество полученных решений, все они носят, как правило, локальный характер и очень редко рассматриваются в полной комплексной задаче, которая должна быть поставлена и решена в процессе проектирования конструкции узлов машины непрерывного литья заготовок.

Базовой составляющей конструкции зоны вторичного охлаждения является роликовая секция (рис. 2). Для обеспечения принудительного охлаждения заготовки в каждой секции между роликами устанавливают форсунки для подачи охладителя в виде водовоздушной смеси. Форсунки устанавливаются по несколько штук в каркасы, называемые коллекторами, которые выполняются в виде соединенных определенным образом труб и одновременно служат для подвода воды и воздуха к форсункам. В одно межроликовое пространство может быть установлено несколько форсунок на заданном проектном удалении друг от друга для охлаждения поверхности заготовки по всей ее ширине. Количество и типы форсунок изменяются от секции к секции, что обусловлено требованиями к режиму охлаждения заготовки. Основными характеристиками схемы расстановки форсунок являются: количество форсунок, тип форсунок, допустимый диапазон регулирования расхода охладителя, плотность орошения каждой форсунки, угол раскрытия факела форсунки.

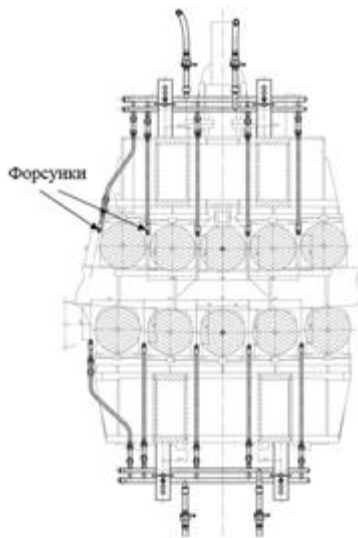


Рис. 2. Фрагмент чертежа роликовой секции

Изготовлением форсунок для МНЛЗ занимается целый ряд производителей, в частности «Lehler», «Spraying Systems», «Корад», «Уралмаш – МО», что привело к появлению на рынке

множества типов форсунок с различными характеристиками.

Одной из проблем, возникающих при проектировании конструкции секций ЗВО, является организация форсуночной системы охлаждения заготовки. Она включает в себя вопросы выбора типов используемых форсунок, их количества, позиций их установки по длине и ширине зоны вторичного охлаждения. В частности, для каждого межроликового пространства определяется: сколько и каких типов форсунки будут в нем установлены; в каких позициях в направлении, перпендикулярном направлению движения заготовки; на каком удалении от поверхности устанавливается форсунка. Разрабатываемое проектное решение должно обеспечивать режимы охлаждения поверхности заготовки для существующего и нового сортамента разливаемых сталей, обладать заданными эксплуатационными характеристиками, которые обеспечивают упрощенную схему монтажа и обслуживания.

В настоящее время известно несколько рекомендаций, полученных опытным и теоретическим путями российскими и зарубежными коллективами, которые учитываются при проектировании системы форсуночного охлаждения.

Первичные решения о количестве и типах устанавливаемых форсунок получены на основе приблизительного анализа количества тепла, которое необходимо отводить от заготовки в ЗВО для получения требуемой температуры на выходе. Основой для такого анализа являются математические модели разной сложности, при помощи которых определяется средний коэффициент теплоотдачи в той или иной секции ЗВО, необходимый для достижения заданной температуры заготовки. После этого при помощи эмпирических зависимостей коэффициента теплоотдачи от объема подачи охладителя можно оценить приблизительное количество форсунок и необходимые расходные характеристики. Вопрос выбора конкретных позиций установки форсунок, однако, требует дополнительных исследований.

Если обратиться к известному опыту, в том числе зарубежному, то в настоящее время авторами работ [1, 25] установлено, что при использовании однорядной схемы расстановки форсунок, чаще всего встречающейся в последних секциях зоны вторичного охлаждения, создается повышенная вероятность образования поперечных поверхностных и угловых трещин, поскольку такая схема расстановки форсунок приводит к различному темпу охлаждения центральной и близкой к углам части заготовки. Для ее устранения используют либо несколько форсунок в одном коллекторе, либо уве-

личивают ширину факела и высоту установки форсунок. Специалисты компании-производителя форсунок Lehler отмечают целесообразность чередования расположения форсунок в следующих друг за другом коллекторах для обеспечения как можно более равномерного теплоотвода с поверхности заготовки.

Задача выбора оптимальных проектных решений по конструкции секций вторичного охлаждения решается, если выполняется:

- проектирование новой машины непрерывного литья заготовок или отдельных секций по требованию крупной металлургической корпорации;
- реконструкция действующих машин непрерывного литья заготовок при изменении потребительских требований к продукции;
- разработка новых режимов функционирования машины непрерывного литья заготовок при расширении сортамента продукции.

Указанные работы являются типовыми для большого числа предприятий, имеющих в своем составе функционирующие машины непрерывного литья заготовок, спроектированные и построенные достаточно давно, которые сталкиваются с необходимостью выпускать высококачественную конкурентоспособную продукцию. Это требует разработки и внедрения новых проектных решений и совершенствования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок.

Изучение существующих CAE-систем (ANSYS, NX CAE, ADAMS, SIMULIA) показало, что они предоставляют универсальные средства для решения расчетно-инженерных задач, в том числе анализа тепловых и напряженных полей в телах заданной формы при заданных граничных условиях [6]. В то же время, их адаптация к решению задачи выбора схемы расположения форсунок влечет за собой обширные трудозатраты, связанные со сложностью перевода исходных данных по конструкции секций вторичного охлаждения, конструкционным особенностям охлаждающих форсунок, а также системы принимаемых допущений в информационные единицы входной информации существующих систем, вероятно, превышающие разработку специализированной системы. Кроме того, для эффективного проведения расчетов по объектам масштабов МНЛЗ в универсальных системах инженерного анализа требуется наличие высокопроизводительного и дорогостоящего аппаратного комплекса, что в совокупности со сложностью формулирования задачи в терминах универсальных систем делает их использование нерациональным.

Опыт проектирования конструкции секций ЗВО предприятия «Уралмаш – Металлургиче-

ское оборудование» основан на использовании индивидуального подхода в каждом конкретном случае с соблюдением ряда общих принципов и использованием специализированных экспериментальных стендов для определения характеристик форсунок, таких как предельные расходы, эффективность охлаждения поверхности заготовки в виде усредненных значений коэффициента теплоотдачи при охлаждении опытных образцов. Полученные сведения в совокупности с такими исходными параметрами, как планируемые сечения разливаемых заготовок, марочный состав, проектная скорость вытягивания, служат основой для определения числа контуров охлаждения, их примерной протяженности.

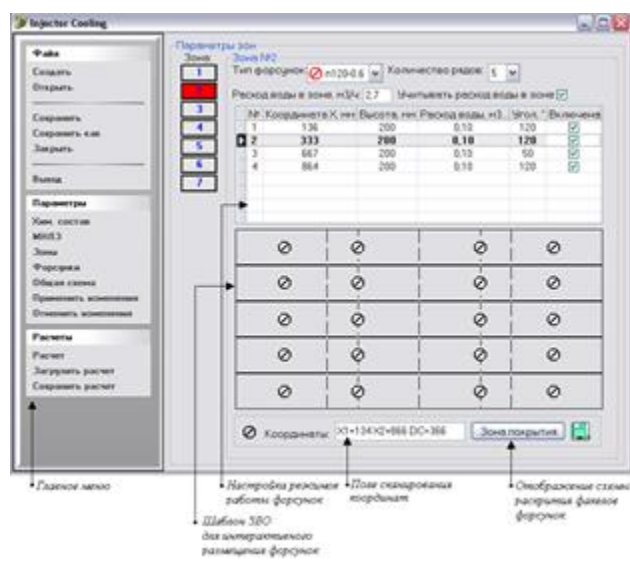
Далее осуществляется планирование точного числа форсунок в каждом контуре и схемы их расположения. На основании математических моделей теплового состояния заготовки определяют диапазоны требуемого значения коэффициента теплоотдачи для каждого контура, после чего осуществляется наполнение контура необходимым числом форсунок.

При определении конкретных позиций форсунок принимают во внимание, что факелы распыляемого охладителя не должны доходить до углов сляба ближе чем на 50 мм, количество форсунок на каждое межроликковое пространство выбирается исходя из ширины сляба, на первых 4-х метрах после выхода из кристаллизатора должно быть обеспечено орошение практически всей поверхности заготовки, далее площадь орошения можно постепенно снижать. Для разливки слябов различной ширины предусматривают возможность дискретного изменения высоты установки форсунок, что позволяет регулировать ширину охлаждаемой поверхности, не меняя горизонтальных позиций форсунок. Данный комплексный подход позволяет получать пригодные к эксплуатации проектные решения, однако остается открытым вопрос об оптимальности точного позиционирования форсунок в межроликковых пространствах.

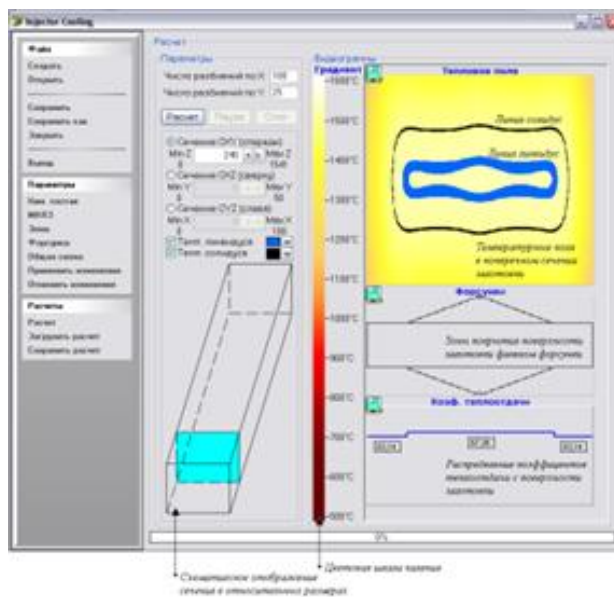
Особый подход к проектированию схемы расположения форсунок в ЗВО предлагает фирма «Siemens-VAI». Разработанная данной фирмой конструкция зоны вторичного охлаждения «SIMETAL 3D Sprays» [27] предусматривает возможность точного позиционирования форсунок по линии, направленной под углом примерно 45° к горизонту, что фактически переносит проблему выбора позиций форсунок с этапа конструирования на этап эксплуатации.

Известны проводившиеся ранее исследования, посвященные вопросам проектирования конструкции секций вторичного охлаждения МНЛЗ [21, 28].

Концепция исследований состояла в объединении двух направлений: моделирования теплового состояния непрерывнолитой заготовки при выбранной схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения. Для автоматизации вычислительных процессов был создан программный продукт Cooling & Steel. Вид окна определения координат расстановки форсунок и результатов моделирования приведен на **рис. 3**.



а



б

Рис. 3. Вид рабочих окон программного продукта Cooling & Steel: а – определение конструкции; б – результаты моделирования

Недостатками разработанной системы являются:

- положение форсунок выполняется в ручном

режиме при условии симметричности схемы, сохраняя высокие трудовые затраты на формирование схемы;

- коэффициент теплоотдачи рассматривается как некоторая усредненная величина на всю выбранную зону вторичного охлаждения, учитывая только вид выбираемых форсунок внутри одной зоны и угол раскрытия факела;

- отсутствие модуля оптимизации, позволяющего в автоматическом режиме скорректировать температурные поля по требованию снижения температурных перепадов на поверхности заготовки и в ее внутреннем сечении.

Разработка специализированных систем проектирования узлов машины непрерывнолитой заготовки остается востребованным до настоящего времени. Это вызвано потребностями проектных организаций в интегрированном использовании универсальных и специализированных систем для формирования библиотеки исходных данных, предварительного моделирования процессов и оценки возможности использования предлагаемого проектного решения.

3. Математическая модель теплового состояния заготовки как ядро системы для автоматизации проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок

Современные системы автоматизации проектирования агрегатов охватывают построение проектных решений на основе результатов математического моделирования и прогнозирования результатов. Современные системы автоматизированного проектирования обладают общностью в структуре построения, которая включает в себя библиотеку исходных данных, библиотеку решений, библиотеку математических моделей для описания процессов, библиотеку алгоритмов для решения математических задач, библиотеку инструментов для графического отображения результатов. Предлагаемая система автоматизации для проектирования конструкций секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок не нарушает принятой структуры построения подобных систем.

Подробный анализ множества научных разработок в области математического моделирования теплового состояния непрерывнолитых заготовок позволил выполнить классификацию моделей, схема которой приведена на **рис. 4**.



Рис. 4. Схема классификация математических моделей для описания теплового состояния заготовок

Согласно приведенной классификации в качестве математической основы построения интерактивной системы автоматизации проектирования конструкции секций вторичного охлаждения использована двумерная математическая модель теплового состояния заготовки в ЗВО МНЛЗ, учитывающая особенности теплопереноса в двухфазной зоне согласно квазиравновесной теории В.Т. Борисова [29], с динамически изменяющейся системой граничных условий для учета изменения условий охлаждения движущегося по технологической линии МНЛЗ двумерного сечения вследствие конструктивных особенностей выполнения МНЛЗ.

Для моделирования теплового состояния заготовки введены допущения, не изменяющие физико-технологической сущности задачи, основными из которых являются: тепловое поле всей заготовки определяется на основе моделирования состояния поперечного двумерного сечения, движущегося по длине ЗВО со скоростью вытягивания заготовки; система координат для моделирования введена согласно схеме, представленной на рис. 5, и температурное поле заготовки описывается уравнением теплопроводности

$$\rho C_s(t) \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где t – температура, °С; ρ – плотность стали, кг/м³; $C_s(t)$ – эффективная теплоемкость стали, Дж/(кг·град); $\lambda_s(t)$ – эффективный коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·град).

Эффективные величины определяются на основании квазиравновесной модели двухфазной зоны согласно теории В.Т. Борисова [29, 30]. Уравнение теплопроводности дополнено динамически изменяющимися граничными условиями:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{y=0} &= \alpha(x, 0, \tau) (t_n(x, 0, \tau) - t_c); \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{y=h} &= \alpha(0, h, \tau) (t_n(0, h, \tau) - t_c); \\ \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha(0, y, \tau) (t_n(0, y, \tau) - t_c); \\ -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=w} &= \alpha(w, y, \tau) (t_n(w, y, \tau) - t_c), \end{aligned} \quad (2)$$

где w, h – ширина и толщина заготовки, м; t_n – температура поверхности заготовки, °С; t_c – температура среды, °С; $\alpha(x, y, \tau)$ – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · град).

Наличие изменяющихся граничных условий третьего рода обусловлено движением сечения заготовки по ЗВО, в процессе чего поверхность сечения переходит между областями с различным видом охлаждения: орошаемыми охладителем, контакта с роликами и воздушного охлаждения (см. рис. 5).

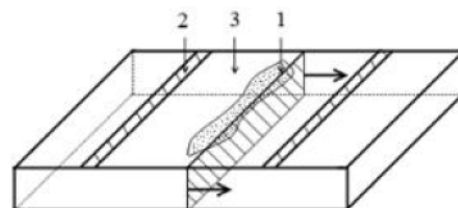


Рис. 5. Области с различным видом охлаждения поверхности заготовки: 1 – орошаемые области; 2 – области контакта с роликами; 3 – области контакта с воздухом

Интенсивность охлаждения заготовки различна между областями и является неоднородной в рамках выбранной области. В орошаемых областях охладитель, поступающий из форсунок, распределяется по поверхности заготовки неравномерно (рис. 6). Это обусловлено особенностями конструкции форсунок и приводит к различиям в плотности орошения отдельных участков поверхности.

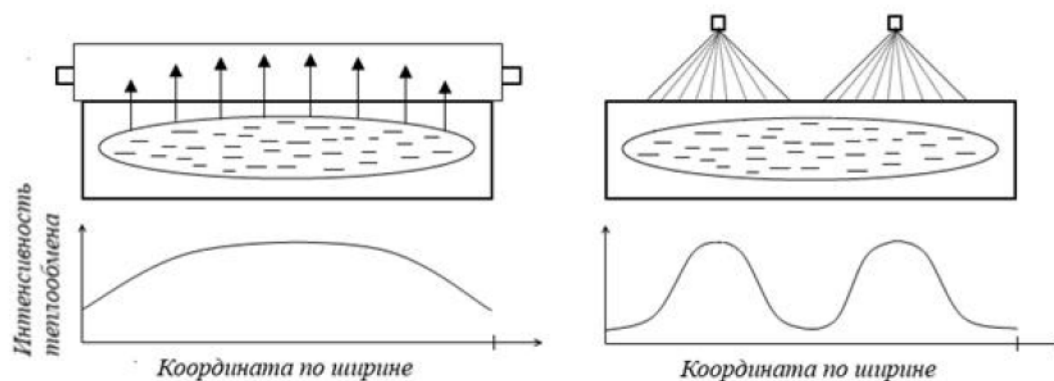


Рис. 6. Различия в интенсивности теплообмена на поверхности заготовки

Участки, находящиеся непосредственно под соплами, охлаждаются интенсивнее. В областях контакта с роликами середина поверхности заготовки под действием ферростатического давления жидкой лунки прижимается к поверхности ролика сильнее, что приводит к более интенсивному теплообмену между поверхностью заготовки и роликом в области их контакта. Временной шаг однозначно определяет позицию расчетного сечения по длине ЗВО, что позволяет определить тип области, в которой находится заданный участок поверхности расчетного сечения на заданном шаге. Отдельные участки поверхности расчетного сечения в выбранный момент времени могут находиться в областях различных типов.

Коэффициент теплоотдачи определяется модифицированными эмпирическими зависимостями Т. Nozaki, В. Thomas, R. Hardin:

$$\begin{aligned} \alpha_{\phi}(x, z) &= k \cdot 1570 \times \\ &\times \left(\sum_{i=0}^n \omega_{xi} (x - x_i) \cdot p_{zi} (z - z_i) \right)^{0.55} \times \\ &\times (1 - 0.0075(t_{\theta})); \\ \alpha_p(x) &= 4 \frac{(\alpha_{p\min} - \alpha_{p\max}) x^2}{w^2} + \alpha_{p\max}; \\ \alpha_{\theta}(x, z) &= P \frac{\varepsilon \sigma_0 (t_{n_abc}(x, z)^4 - t_{c_abc}^4)}{t_{n_abc}(x, z) - t_{c_abc}} + \\ &+ \alpha_{конв} + Q \cdot G(x, z), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\alpha_{\phi}(x, z)$, $\alpha_p(x, z)$, $\alpha_{\theta}(x, z)$ – коэффициенты теплоотдачи в орошаемых областях, контакта с роликами и контакта с воздухом, Вт/(м²·град); w_{xi} – одномерная локальная плотность орошения форсунки i на удалении x' от сопла форсунки по оси x , л/(м·с); p_{zi} – относительная плотность ороше-

ния форсунки i на удалении z от сопла форсунки по оси z , м⁻¹; x_i , z_i – координаты проекции сопла i -й форсунки на поверхность заготовки; $i \in (1 \dots n)$ – индексы форсунок, в область орошения которых попадает точка поверхности с координатами (x, z) ; t_{θ} – температура охлаждающей воды, $t_{n_abc}(x, z)$, t_{c_abc} – абсолютные температуры поверхности и среды, К; ε – приведенный коэффициент черноты тела; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; $G(x, z)$ – средний расход охладителя на поверхность заготовки в секции ЗВО, к которой принадлежит точка (x, z) , л/(м²·с); k , $\alpha_{p\max}$, $\alpha_{p\min}$, $\alpha_{конв}$, P , Q – эмпирические константы.

Решение системы уравнений (1)–(2) реализовано методом переменных направлений по схеме Писмена-Рэкфорда.

Для разработки методики оптимизации схемы расстановки форсунок в ЗВО было введено понятие поперечного теплового профиля грани заготовки и комплексный критерий оптимизации. Пусть по поверхности заготовки перпендикулярно направлению ее движения проведена условная линия. Температуру поверхности заготовки вдоль этой линии определим как поперечный тепловой профиль грани. Рассматриваем поперечный тепловой профиль в дискретном виде как набор температур t_i в точках xi , $i = 1 \dots n$, n – количество расчетных точек на линии.

С технологической точки зрения к поперечному тепловому профилю грани выдвигаются следующие требования: минимальное значение величины абсолютных перепадов температуры на единицу длины поверхности заготовки; симметричность теплового профиля относительно середины грани.

Математическая модель дополнена требованием к температурному профилю поверхности заготовки, которое в формализованной форме имеет вид

$$J = A_1 \cdot \frac{\sum_{i=l}^m \left(t_i - \frac{\sum_{i=l}^m t_i}{m-l+1} \right)^2}{\left(\frac{\sum_{i=l}^m t_i}{m-l+1} \right)^2} + A_2 \cdot \left| \frac{\frac{\sum_{i=1}^n t_i x_i}{\sum_{i=1}^n t_i} - \frac{w}{2}}{w} \right|, \quad (4)$$

где A_1, A_2 – весовые коэффициенты, определяемые экспертом.

Смысл (4) заключается в линейной комбинации двух компонент, первая из которых оценивает вариацию температур относительного среднего значения в точках профиля (из рассмотрения исключаются точки, прилегающие к углам ближе, чем на 5%, отсюда индексы l и m) и характе-

ризует равномерность теплового профиля. Графический смысл первой компоненты представлен на рис. 7.

Вторая компонента выражения (4) характеризует симметричность теплового профиля относительно середины грани путем представления температуры в точках как их массы и вычисления смещения центра «тепловой» массы относительно середины грани (рис. 8).

Преобразование (4) в целевую функцию позволило выполнить постановку задачи оптимизации для поиска положения форсунок в секциях вторичного охлаждения.

Пусть все секции вторичного охлаждения содержат K рядов форсунок, в каждом k -м ряду содержится n_k форсунок и их положение задано вектором координат $X_k(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn_k})$. Обозначим z_k позицию выхода из зоны действия k -го ряда (рис. 9), $T_{z_k}(t_{1z_k}, t_{2z_k}, \dots, t_{mz_k})$ – вектор температур точек поперечного теплового профиля в позиции z_k , m – частота дискретизации по ширине заготовки, w – ширина заготовки.

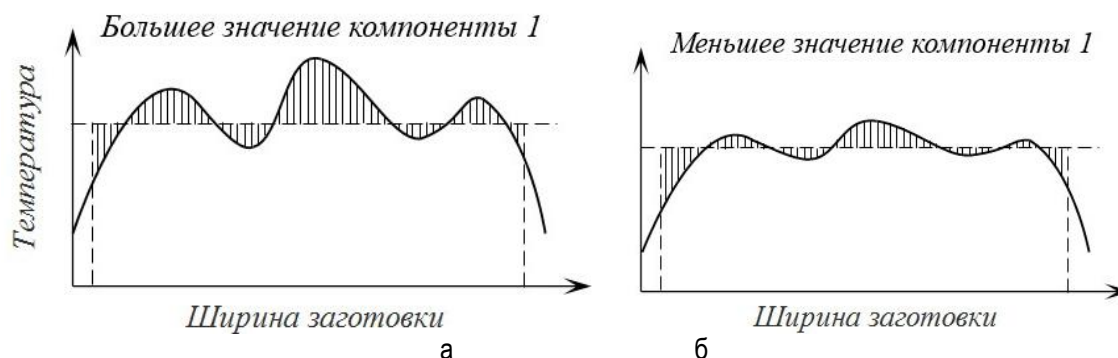


Рис. 7. Графический смысл первой компоненты критерия: а – распределение температуры по ширине заготовки при условии неравномерного охлаждения поверхности заготовки по ширине; б – распределение температуры по ширине заготовки при условии приближенно равномерного охлаждения заготовки по ширине

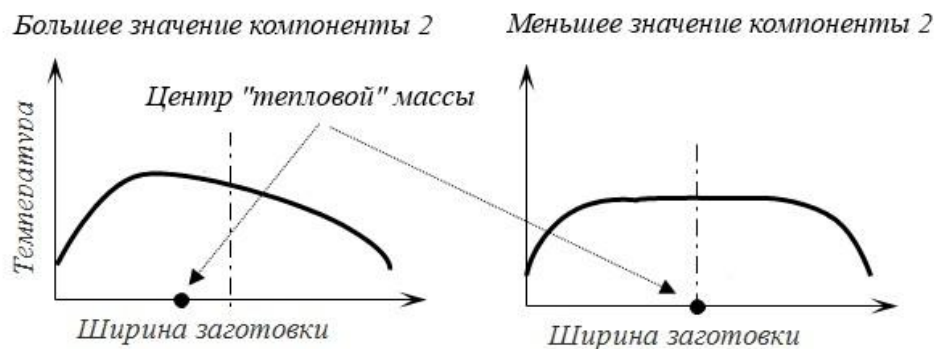


Рис. 8. Графический смысл второй компоненты критерия

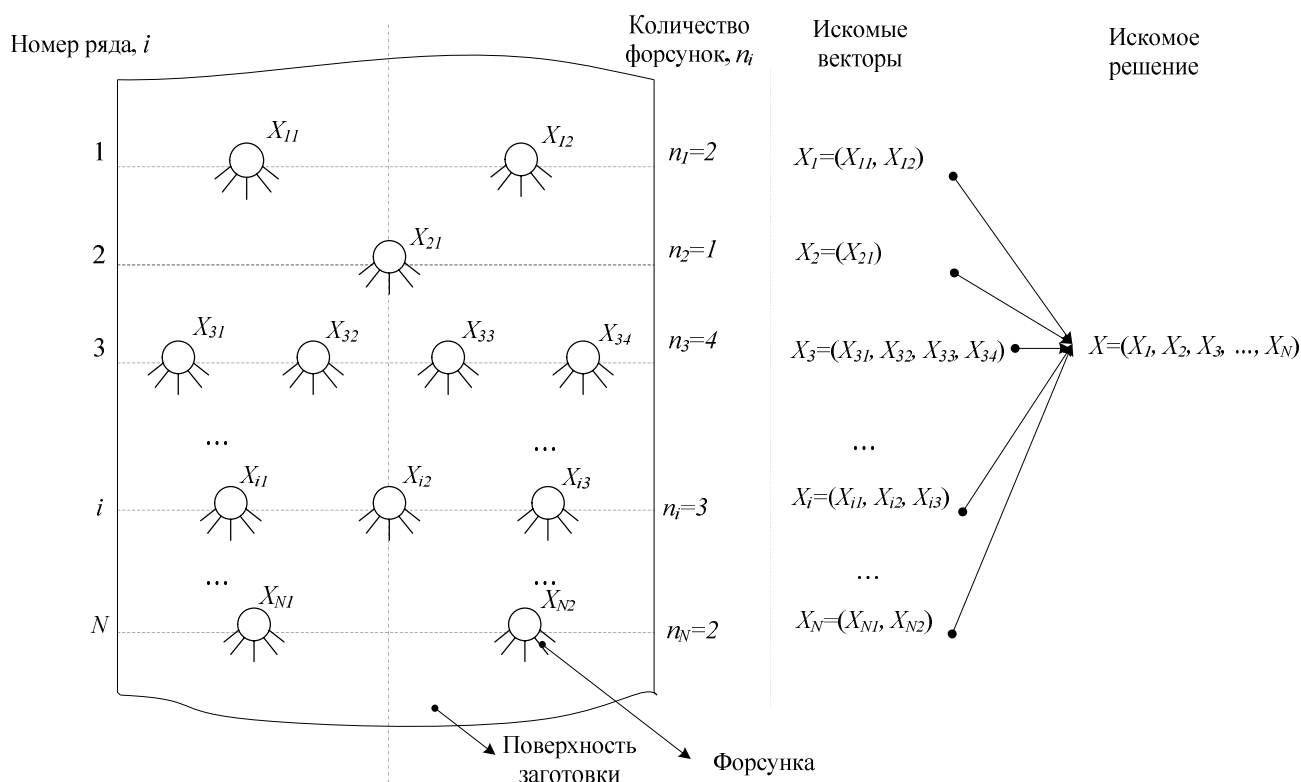


Рис. 9. Схема формирования решения задачи оптимизации конструкции секций вторичного охлаждения

Тогда задача оптимизации принимает вид: требуется найти такое множество векторов $X = \{X_1, \dots, X_k\}$, каждый элемент которого представляет собой вектор координат форсунок в одном межроликовом пространстве, координаты форсунок являются аргументами функции температуры заготовки, удовлетворяющей решению задачи (1)–(3), для которых выполняется комплексный критерий:

$$J(T_{z_k}(X_k)) \rightarrow \min, 1 \leq k \leq K$$

при выполнении ограничений

$$\begin{aligned} x_{ki-1} < x_{ki} < x_{ki+1}, \quad 2 \leq i \leq n_k - 1; \\ 0,05w \leq x_{ki} \leq 0,95w, \quad 1 \leq i \leq n_k; \\ x_{ki} = 0,05p, \quad p \in N \end{aligned}$$

Пусть задана исходная схема расположения форсунок $X_0 = \{X_{10}, \dots, X_{k0}\}$. Процедуру оптимизации выполняем последовательно для каждого ряда. В позиции входа в зону действия очередного ряда считаем известным тепловое состояние сечения заготовки по результатам моделирования. Запоминаем состояние моделирования в этой пози-

ции. Продолжаем моделирование теплового состояния сечения до позиции выхода.

Рассчитываем значение критерия $J(T_{z_k}(X_k))$ на выходе. Данное значение критерия получено при начальных позициях форсунок. Если выполнить откат процесса моделирования до состояния на позиции входа и внести корректировки в позиции форсунок, а затем повторить расчет до позиции выхода, то получим значение критерия $J(T_{z_k}(X'_k))$ при скорректированных позициях форсунок.

Таким образом, расчет теплового поля от позиции входа до позиции выхода является процедурой вычисления критерия $J(T_{z_k}(X_k))$ по произвольным значениям вектора X_k , что позволило воспользоваться методом направленного случайного поиска оптимального значения X_k по алгоритму наилучшей пробы.

Последовательно оптимизируя расположение форсунок в каждом ряду по ходу движения расчетного сечения, получаем оптимальную схему расположения форсунок в ЗВО. Блок-схема алгоритма оптимизации представлена на рис. 10.

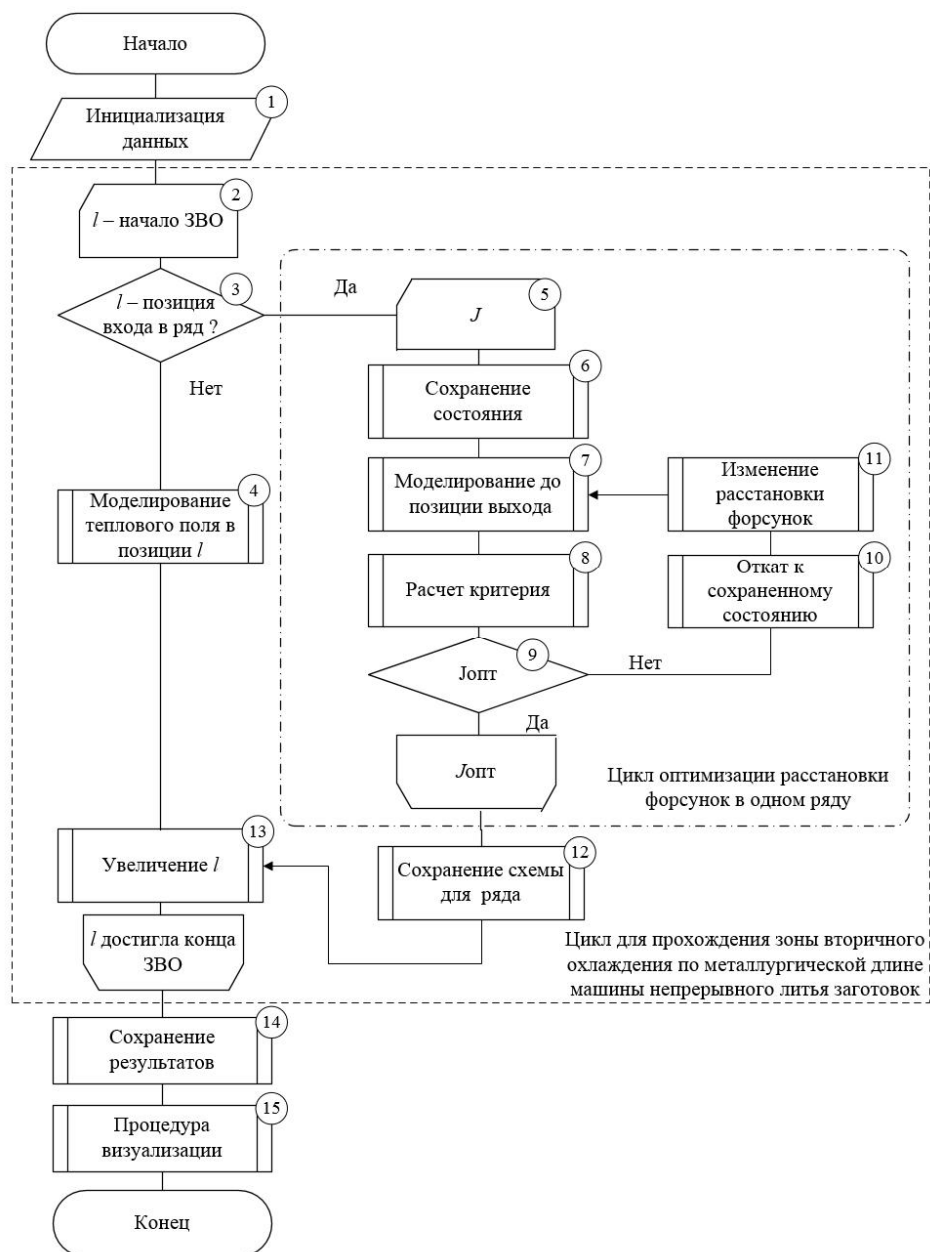


Рис. 10. Блок-схема алгоритма оптимизации схемы расположения форсунок в ЗВО МНЛЗ

На основе алгоритма выполнено проектирование и разработка интерактивной системы синтеза проектных решений по схеме расположения форсунок.

4. Структура автоматизированной системы проектирования конструкции секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок

Интерактивная система анализа и синтеза проектных решений включает три подсистемы (рис. 11):

- подсистема ведения нормативно-

справочной информации, включающая ведение справочника марок сталей с возможностью задания физических свойств и химического состава, ведение справочника исследуемых конструкций ЗВО с возможностью графического просмотра и редактирования параметров конструкции, ведение справочника начальных и калибровочных параметров моделирования;

– подсистема прогностического моделирования и оптимизации, выполняющая поиск оптимальной схемы расположения форсунок для выбранной конструкции ЗВО, формирование запроса на моделирование теплового состояния заго-

товки, непосредственно прогностическое моделирование теплового состояния заготовки с заданными калибровочными параметрами;

– подсистема накопления и визуализации результатов, позволяющая выполнить сохранение сведений о тепловом состоянии заготовки в ЗВО и интенсивности процессов теплообмена на ее поверхности и отобразить двумерные графики температуры поверхности граней заготовки по секциям ЗВО (подмодуль 1), графики поперечного теплового профиля граней заготовки на выходе их секций ЗВО (подмодуль 2), двумерные графики величины коэффициента теплоотдачи на поверхности граней заготовки по секциям ЗВО (подмодуль 3), двумерные графики величины теплового потока на поверхности граней заготовки по секциям ЗВО (подмодуль 4), графики изменения температур отдельных точек расчетного сечения по всей длине ЗВО (подмодуль 5),

накопительные графики количества тепла, отводимого охладителем, роликами или излучением и конвекцией (подмодуль 6).

Интерактивная система синтеза проектных решений предусматривает три основных сценария интерактивного взаимодействия проектировщик-система: заполнение и редактирование справочников конструкций ЗВО, марок сталей, начальных и калибровочных параметров моделирования; запуск процедуры оптимизации схемы расположения форсунок, состоящий из выбора входных данных из справочников и, при необходимости, их корректирования для данного запуска; анализ графически представленных выходных данных, сформированных по итогам завершенных процедур оптимизации. На **рис. 12** приведены основные интерфейсные формы для организации взаимодействия «проектировщик-система».

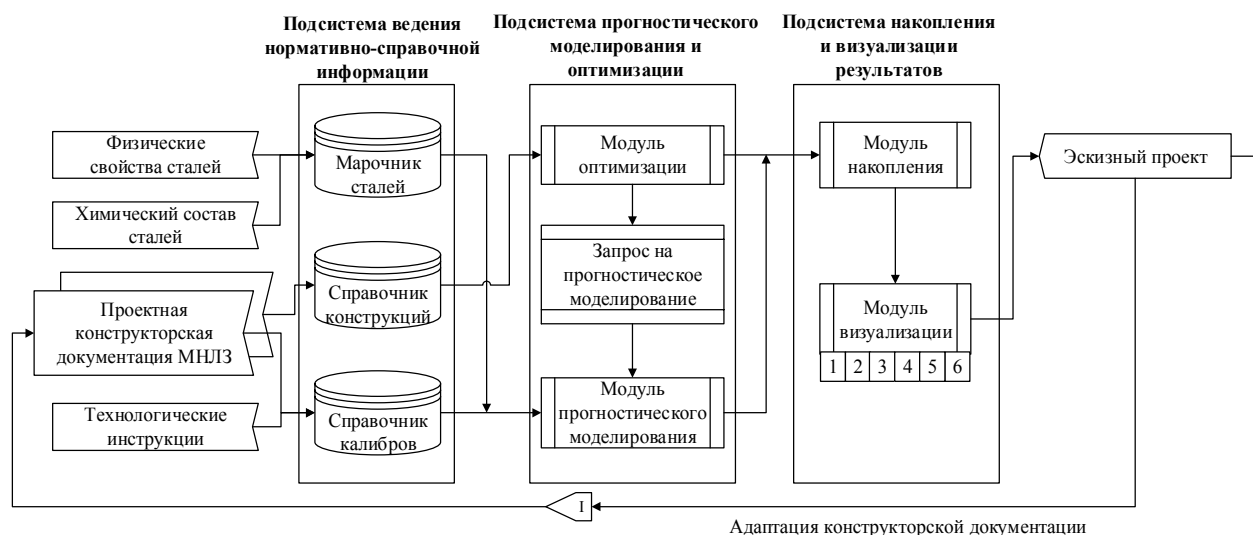


Рис. 11. Структура интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений

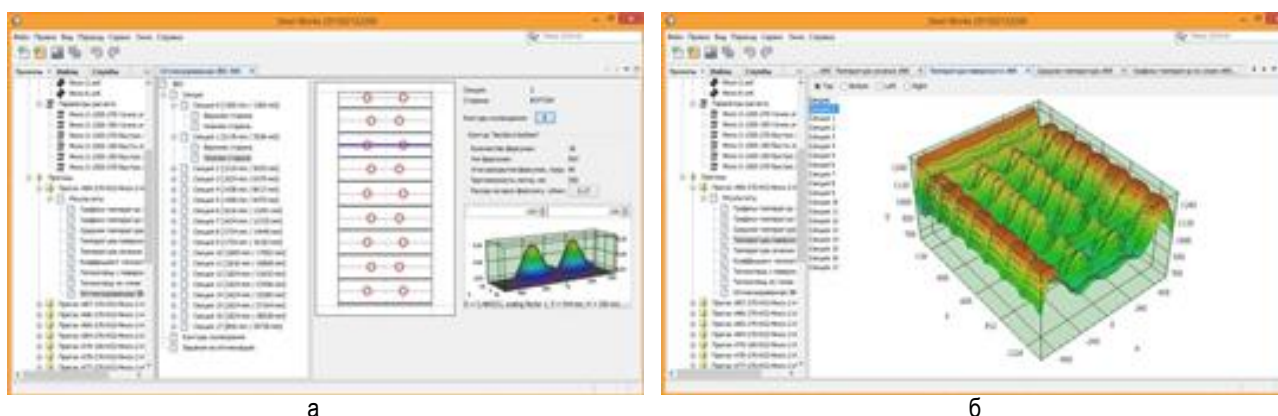


Рис. 12. Экранные формы интерактивной системы синтеза оптимальной схемы расположения форсунок в ЗВО МНЛЗ: а – форма редактирования физических свойств и химического состава стали; б – форма редактирования и просмотра параметров конструкции ЗВО

При разработке интерактивной системы синтеза проектных решений была использована объектно-ориентированная методология программирования с применением языка Java и платформы для построения графических приложений Netbeans Platform.

Разработанная интерактивная система была использована для поиска оптимальной схемы расположения форсунок и исследования тепловой работы МНЛЗ.

5. Результаты синтеза и анализа проектных решений конструкции секций вторичного охлаждения

В условиях ОАО «Уральская Сталь» для настройки прогностической модели проведены пилотажные и специализированные эксперименты для изучения формы распределения охладителя в зонах орошения [19] и температуры поверхности заготовки [31]. Специализированный эксперимент проводился путем установки измерительной планки под действующими форсунками (рис. 13). В пилотажном эксперименте проведены замеры температуры поверхности заготовки в различных точках по схеме, приведенной на рис. 14.



Рис. 13. Измерительная планка для определения распределения охладителя в области орошения форсунок

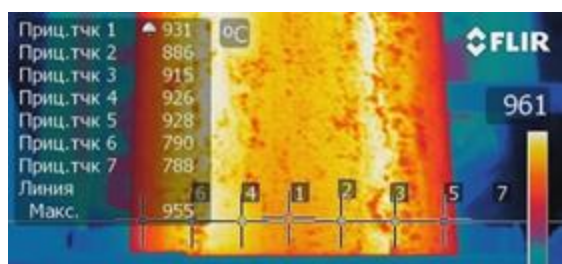


Рис. 14. Результаты измерения температуры поверхности заготовки при помощи пирометра Flir T640

По результатам исследования предложены зависимости для определения плотности орошения при моделировании теплового состояния заготовки. Результаты моделирования при использовании предложенных зависимостей плотности орошения показали отклонение температур на

поверхности заготовки от экспериментальных значений не более 5%, что позволило сделать вывод возможности использования прогностической модели теплового состояния заготовки при построении интерактивной системы анализа и синтеза проектных решений [19].

Вычислительный эксперимент по оптимизации схемы расположения форсунок был проведен для условий непрерывной разливки заготовок сечением 1200×270 мм марок сталей, принадлежащих группе К-52, при скорости вытягивания 0,9 м/мин. На рис. 15 приведены результаты сравнительного анализа теплового поля поверхности заготовки при текущей и оптимальной схемах расположения форсунок, а на рис. 16 – сравнение текущей и оптимальной схемы расположения форсунок в отдельных секциях. На рис. 17 и 18 представлены диаграммы изменения критерия оптимизации в зависимости от позиций форсунок в выделенных рядах.

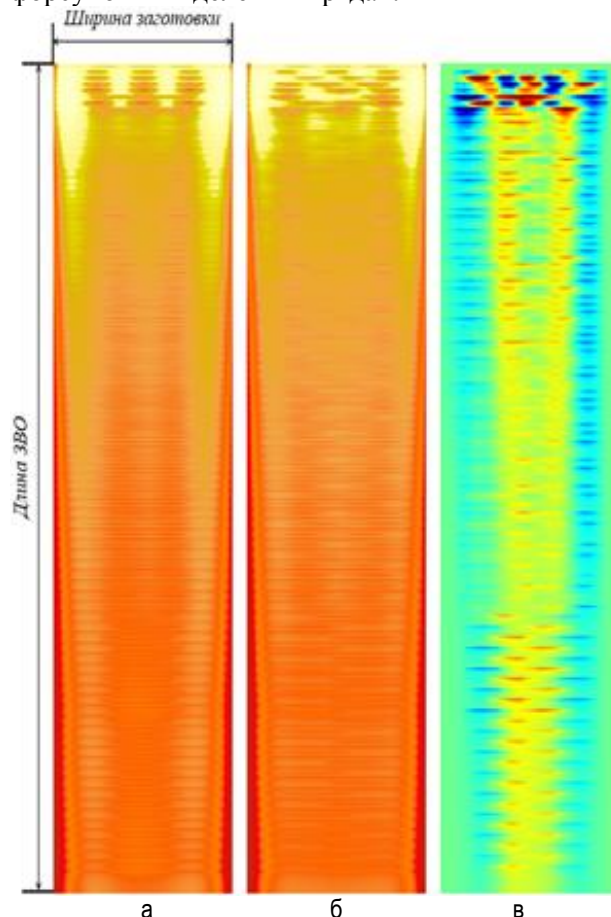


Рис. 15. Распределение температурных полей на поверхности заготовки: а – в условиях использования начальной схемы; б – в условиях оптимальной схемы расположения форсунок; в – изменение значений температуры при переходе к оптимальной схеме

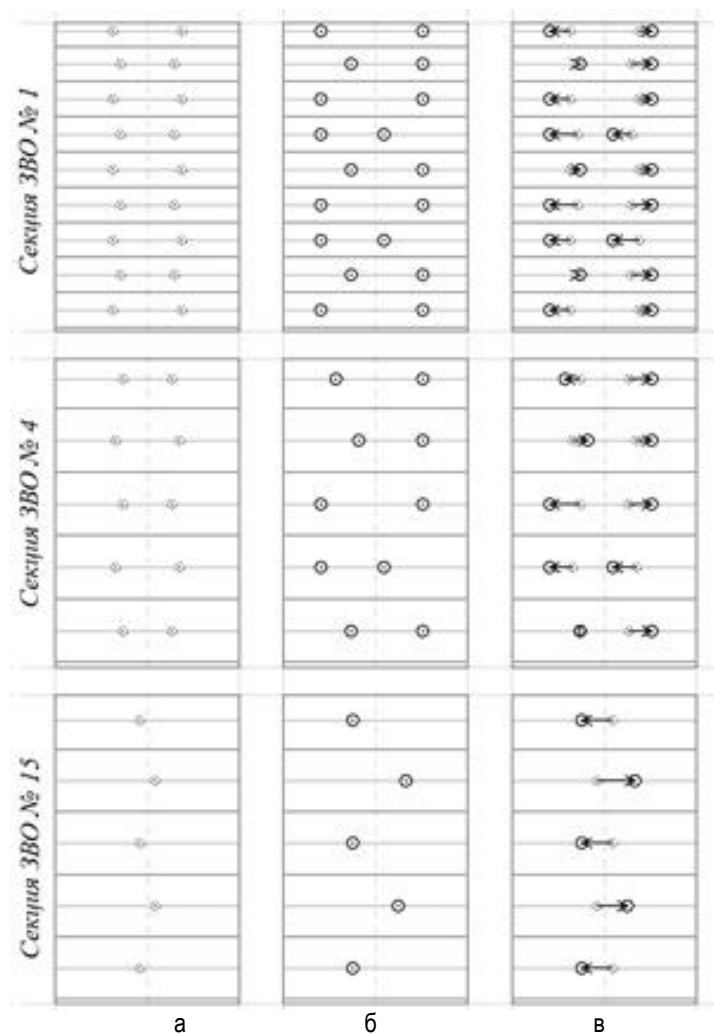


Рис. 16. Изменения в решении задачи оптимизации: а – начальное приближение; б – решение задачи оптимизации; в – значения коррекции в решении

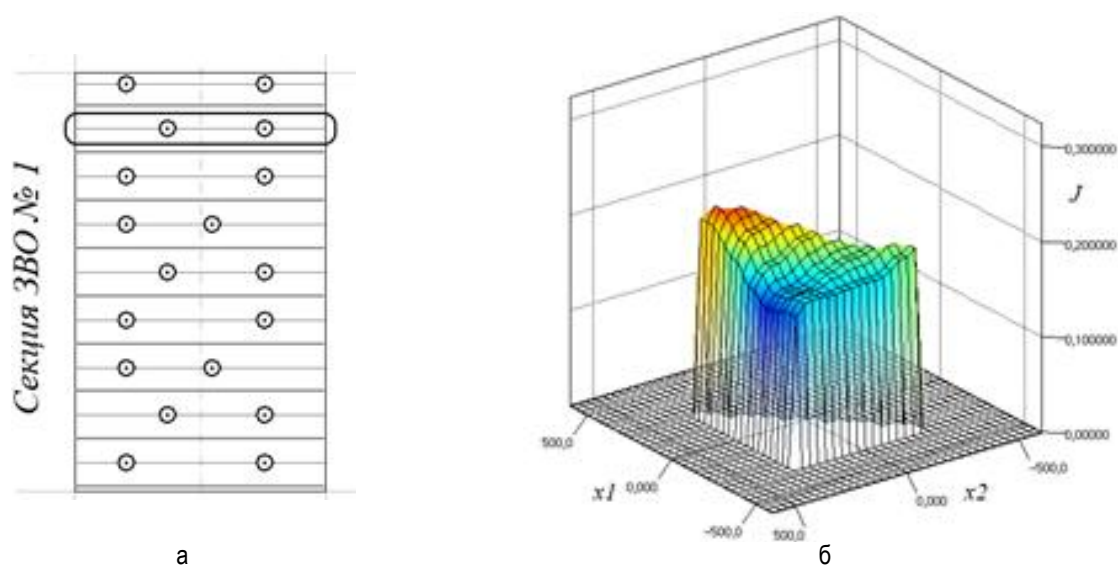


Рис. 17. Результаты оценки поведения критерия оптимальности при получении оптимальной схемы расположения форсунок (см. рис. 16) для ряда с двумя форсунками: а – схема расположения форсунок; б – диаграмма изменения критерия в выделенном ряду

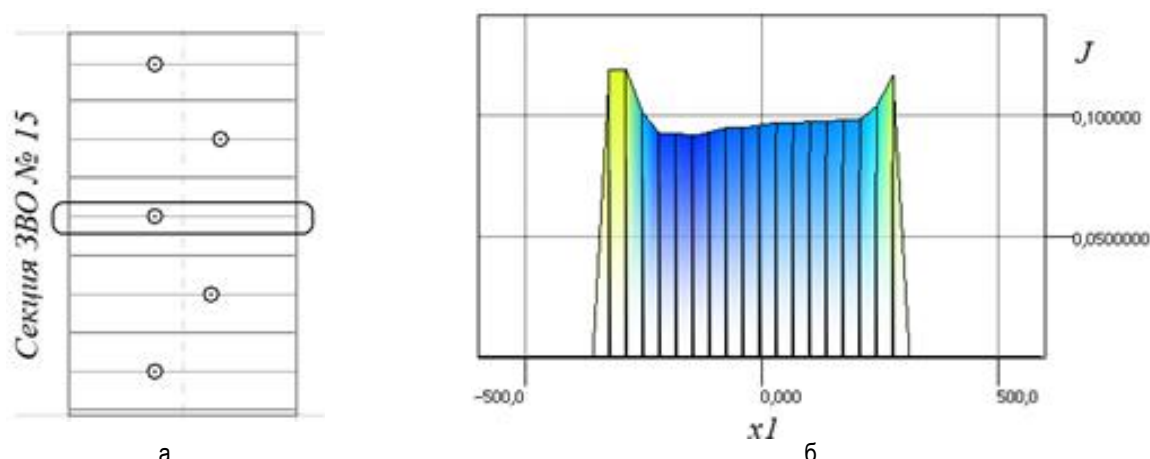


Рис. 18. Результаты оценки поведения критерия оптимальности при получении оптимальной схемы расположения форсунок (см. рис. 16) для ряда с одной форсункой: а – схема расположения форсунок; б – диаграмма изменения критерия в выделенном ряду

На основании проведенных вычислительных экспериментов установлено, что изменение марки стали, изменение скорости вытягивания заготовки в рамках технологически допустимых рабочих скоростей для заданного сечения заготовки не ведет к заметному изменению оптимального решения по схеме расположения форсунок. А существенным фактором, оказывающим влияние на оптимальное решение, является ширина заготовки.

Таким образом, разработанная интерактивная система позволила усовершенствовать процесс проектирования модернизированной конструкции секций вторичного охлаждения путем нахождения оптимальной схемы расположения форсунок средствами вычислительной техники и провести анализ тепловой работы МНЛЗ.

Заключение

Выполненный теоретико-информационный анализ влияния конструктивных особенностей секций вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок позволил определить технологические требования к профилю охлаждения заготовки. В ходе анализа определено назначение математической модели в проектировании МНЛЗ и перспективы построения интерактивной системы анализа и синтеза оптимальных проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ.

Предложена комплексная математическая модель теплового состояния заготовки и критерий оптимизации схемы расположения форсунок, отличающийся возможностью учета усло-

вий симметричности и равномерности поля температур. Предложенная математическая модель и критерий позволили выполнить постановку задачи оптимизации и разработать методику и алгоритм для выбора оптимальной схемы расположения форсунок с целью обеспечения профиля охлаждения заготовки для получения заготовок обычного качества.

Разработана структура и выполнена программная реализация интерактивной системы анализа и синтеза оптимальных проектных решений по схеме расположения форсунок в секциях вторичного охлаждения МНЛЗ, позволяющая усовершенствовать процесс проектирования конструкции секций вторичного охлаждения МНЛЗ за счет поиска оптимальной схемы расположения форсунок ЗВО средствами вычислительной техники.

Проведены комплексные экспериментальные исследования, включающие пилотажный эксперимент по изучению температурного поля на поверхности заготовки в промышленных условиях, специализированный эксперимент по изучению распределения плотности орошения на поверхности заготовки в лабораторных условиях, вычислительный эксперимент-преобразование по синтезу проектных решений по схеме расположения форсунок для построения библиотеки и последующего использования в процессе проектирования новых конструкций, модернизации существующих и освоения новых сортов продукции.

Внедрение разработанных решений позволяет получить предполагаемый экономический эффект за счет проведения проектировочных работ и эксплуатации МНЛЗ в новых условиях в раз-
мере 3,106 млн руб. в год.

Список литературы

1. Буланов Л.В., Корзуни Л.Г. Машины непрерывного литья заготовок. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004.
2. Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Ячиков И.М. Непрерывная разливка стали. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012.
3. Vdovin KN, Pozin AE, Petrov IE, Podosyan AA, Tochilkin VV (2013) Ingot contact with the broad mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation* 43(7): 452–454
4. Huang X, Thomas BG (1993) Modeling of steel grade transition in continuous slab casting processes. *Metallurgical Transactions B* 24(2): 379–393
5. Berdnikov SN, Pozin AE, Podosyan AA, Berdnikov AS, Mokhov VA, Vdovin KN (2012) Improving narrow mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation* 42(2): 180–182
6. Zhou X (2009) Heat transfer during spray water cooling using steady experiment. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign
7. Li C (2004) Thermomechanical Finite-Element Model of Shell Behavior in Continuous Casting of Steel. *Metallurgical and materials transactions* 35B: 57–60
8. Zhang Q (2010) A Heat Transfer and Solidification Model of Continuous Cast. *Advanced Materials Research*: 154–155
9. Horsky J, Raudensky M (2005) Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting, Hradec nad Moravici: 23–31
10. Shen H, Hardin R, MacKenzie R and [et. al] (2002) Simulation Using Realistic Spray Cooling for the Continuous Casting of Multi-component Steel. *Journal of Materials Science and Technology* 18: 123–128
11. Zhang X, Jiang Z, Tieu A and [et al.] (2009) Analysis of surface temperature and thermal stress field of slab continuous casting. *Advanced Materials Research*: 554–559.
12. Tutarovs VD, Logunova OS (2002) Analysis of the surface temperature of continuously cast ingot beyond the zones of air cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45(22): 4381–4399
13. Logunova OS, Matsko II, Safonov DS (2012) Thermal state simulation of the infinite body taking into account dynamic boundary conditions of the third kind. *Bull South-Ural State Univ Math Model Program Ser* 27:74–85
14. Nozaki T (1978) A Secondary Cooling Pattern for Preventing Surface Cracks of Continuous Casting Slab. *Trans. ISIJ* 18: 330–338
15. Boyle R, Frick J (2004) Implementation of modern secondary cooling technology in existing casters. *Materials of the 3rd International conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries*, Beijing
16. Boyle R, Frick J (2012) New Secondary Cooling Systems and Practices: Nozzles and Cooling Solutions for Continuous Casting of Steel, Lehler: 33–44
17. Hardin R, Liu K, Kapoor A and [et. al] (2003) Transient Simulation and Dynamic Spray Cooling Control Model for Continuous Steel Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B* 34B: 297–306
18. El-Bealy M, Leskinen N, Fredriksson H (1995) Simulation of Cooling Conditions in Secondary Cooling Zones in Continuous Casting Process. *Ironmaking and Steelmaking* 3(22): 246–255
19. Tutarova VD, Safonov DS, Shapovalov AN (2012) Density distribution of the spray from flat spray nozzles in the secondary-cooling zone of a continuous caster. *Metallurgist* 56(5-6): 438–442
20. Weizhong DA (1997) Generalized Peaceman–Rachford ADI Scheme for Solving Two-Dimensional Parabolic Differential Equations. *Journal of Scientific Computing* 12: C. 353–360
21. Logunova OS (2009) Программное обеспечение для интерактивного проектирования и оценки работы зон вторичного охлаждения МНЛЗ. *Bull South-Ural State Univ Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics Ser* 9:20–23
22. Logunova OS (2008) Internal-defect formation and the thermal state of continuous-cast billet. *Steel in Translation* 38(10): 849–852
23. Logunova OS, Matsko II, Posohov IA, Luk'ynov SI (2014) Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74(9): 1407–1418.
24. Бойл Р. Повышение качества слэба и производительности УНРС на основе ревизии системы вторичного охлаждения // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2006. №5. С. 35–38.
25. Куисонг С., Гуангуанг Ю., Жиюан Ж. Изучение связи между условиями охлаждения по ширине слэба и осевой ликвацией // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2010. №4. С. 40–42.
26. Карташов Л.П., Зубкова Т.М. Параметрический и структурный синтез технологических объектов на основе системного подхода и математического моделирования. Екатеринбург: УрО РАН, 2009.
27. Решения в области непрерывного литья плоских заготовок: сайт компании Siemens VAI. – 2008 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/metals/simetal/ru/Continuous-Slab-Casting-Solutions-ru.pdf> (дата обращения: 10.08.2014).
28. Логунова О.С. Программное обеспечение исследования новых конструкций зон вторичного охлаждения // *Программные продукты и системы*. 2008. №3. С. 76–79.
29. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. М.: Металлургия, 1987.
30. Борисов В.Т., Колядина Н.Ю., Матвеев Ю.З. Метод определения проницаемости двухфазной зоны затвердевающего сплава // *Заводская лаборатория*. 1980. №10. С. 911–915.
31. Тутарова В.Д., Шаповалов А.Н., Сафонов Д.С. Экспериментальные исследования температуры поверхности непрерывнолитой слэбовой заготовки // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2012. №3. С. 40–42.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

AUTOMATION OF THE DESIGN OF SECONDARY COOLING SECTIONS OF THE CONTINUOUS CASTING MACHINE

Safonov Dmitry Sergeevich – Senior software engineer, Compass Plus, Magnitogorsk, Russia. E-mail: dmitry.s.safonov@gmail.com.

Logunova Oksana Sergeevna – D.Sc. (Eng.), Head of the Chair «Computer Engineering and Programming», Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 22-03-17. E-mail: logunova66@mail.ru

Abstract. The paper is devoted to the results of the scientific research around development of the system for computer-aided design of secondary cooling sections of the continuous casting machine. Results of the theoretical analysis showed the existence of sophisticated mathematical models for describing heat state of bodies which are not fully employed for solving design

tasks in metallurgy. The mathematical model of the slab heat state and formalized description of two requirements to temperature profile across the slab surface form the basis of the developed system. The authors propose the optimization problem formulation for the search of set of variable-length vectors with coordinates that define nozzle positions in each nozzle row.

Solving the optimization problem involves iterative search of the optimal solution by solving heat equation with different input conditions. The paper shows the structure of the computer-aided design system for calculating optimal nozzle layout in the secondary cooling sections and describes three main scenarios of interaction between user and system. Analysis of the particular nozzle layout obtained with help of the system is provided. The results show that this layout provides even heat removal across the slab surface. Search of the optimal placement of nozzles in one nozzle row require around 300 iterations of calculations. Calculation of the whole layout takes about 2 hours.

Keywords: computer-aided design, continuous casting machine, desing of secondary cooling sections, optimal nozzle layout.

References

1. Bulanov L.V., Korzun L.G. Mashiny nepreryvnogo litiya zagotovok [Continuous casting machines]. Ural centre of PR and commercial "Marat", Ekaterinburg, 2004.
2. Vdovin K.N., Tochilkin V.V., Yachikov I.M. Nepreryvnaya razlivka stali [Continuous casting of steel]. Magnitogorsk, Magnitogorsk state technical university, 2012.
3. Vdovin K.N., Pozin A.E., Petrov I.E., Podosyan A.A., Tochilkin V.V. Ingot contact with the broad mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation*, 2012, no 43(7), pp. 452-454.
4. Huang X., Thomas B. Modeling of steel grade transition in continuous slab casting processes. *Metallurgical Transactions B*, no 24(2), pp. 379-393.
5. Berdnikov S.N., Pozin A.E., Podosyan A.A., Berdnikov A.S., Mokhov V.A., Vdovin K.N. (2012) Improving narrow mold walls in continuous slab-casting machines. *Steel in Translation*, 2012, no 42(2), pp. 180-182.
6. Zhou X. Heat transfer during spray water-cooling using steady experiment. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana-Champaign, 2009.
7. Li C. Thermomechanical Finite-Element Model of Shell Behavior in Continuous Casting of Steel. *Metallurgical and materials transactions*, 2004, no 35B, pp. 57-60.
8. Zhang Q. A Heat Transfer and Solidification Model of Continuous Cast. *Advanced Materials Research*, 2010, pp. 154-155.
9. Horsky J, Raudensky M. Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting, Hradec nad Moravici, 2005, pp. 23-31.
10. Shen H, Hardin R, MacKenzie R et al. Simulation Using Realistic Spray Cooling for the Continuous Casting of Multi-component Steel. *Journal of Materials Science and Technology*, 2002, no. 18, pp. 123-128.
11. Zhang X, Jiang Z, Tieu A et al. Analysis of surface temperature and thermal stress field of slab continuous casting. *Advanced Materials Research*, 2009, pp. 554-559.
12. Tutarova V.D., Logunova O.S. Analysis of the surface temperature of continuously cast ingot beyond the zones of air cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, no. 45(22), pp. 4381-4399.
13. Logunova O.S., Matsko I.I., Safonov D.S. Thermal state simulation of the infinite length body taking into account dynamic boundary conditions of the third kind. *Bull South-Ural State Univ Math Model Program Ser*, 2012, no. 27, pp. 74-85.
14. Nozaki T., Matsuno J., Murata K., Ooi H., Kodama M. A secondary cooling pattern for preventing surface cracks of continuous casting slab. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn*, 1978, no. 18(6), pp. 330-338.
15. Boyle R, Frick J. Implementation of modern secondary cooling technology in existing casters. *Materials of the 3rd International conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries*, Beijing, 2004.
16. Boyle R, Frick J. *New Secondary Cooling Systems and Practices: Nozzles and Cooling Solutions for Continuous Casting of Steel*, Lehler, 2012, pp. 33-44.
17. Hardin R., Liu K., Kapoor A. et. al. Transient Simulation and Dynamic Spray Cooling Control Model for Continuous Steel Casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2003, no. 34B, pp. 297-306.
18. El-Bealy M., Leskinen N., Fredriksson H. Simulation of Cooling Conditions in Secondary Cooling Zones in Continuous Casting Process. *Ironmaking and Steelmaking*, 1995, no. 3(22), pp. 246-255.
19. Tutarova V.D., Safonov D.S., Shapovalov A.N. Density distribution of the spray from flat spray nozzles in the secondary-cooling zone of a continuous caster. *Metallurgist*, 2012, no. 56(5-6), pp. 438-442.
20. Weizhong D.A. Generalized Peaceman-Rachford ADI Scheme for Solving Two-Dimensional Parabolic Differential Equations. *Journal of Scientific Computing*, 1997, no. 12, pp. 353-360.
21. Logunova O.S. Programmnoe obespechenie dlya interaktivnogo proektirovaniya i otsenki raboty zon vtorichnogo okhlazhdeniya MNLZ [Software for interactive design and evaluation of the work of zones secondary cooling sections in continuous casting machines]. *Bull South-Ural State Univ Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2009, no. 9, pp. 20-23.
22. Logunova O.S. Internal-defect formation and the thermal state of continuous-cast billet. *Steel in Translation*, 2008, no. 38(10), pp. 849-852.
23. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, no. 74(9), pp. 1407 - 1418.
24. Boyle R. Audits of secondary cooling systems in existing casters as a method to enhance product quality and productivity. *News of the iron industry abroad*, 2006, no. 5, pp. 35-38.
25. Kuisong S., Guanguang Y., Jiyan Z. Study of the relationship between the cooling condition in width and the centerline segregation of the slab. *News of the iron industry abroad*, 2010, no. 4, pp. 40-42.
26. Kartashov L.P., Zubkova T.M. Parametricheskij i strukturnyj sintez tekhnologicheskikh ob'ektov na osnove sistemnogo podhoda i matematicheskogo modelirovaniya [Parametrical and structural synthesis of technological objects on the basis of system approach and mathematical modeling]. UrO RAN, Ekaterinburg, 2009.
27. Resheniya v oblasti nepreryvnogo litiya ploskih zagotovok [Solutions in the field of continuous molding of flat slabs]: - URL: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industry/solutions/metals/simetal/ru/Continuous-Slab-Casting-Solutions-ru.pdf>
28. Logunova O.S. Programmnoe obespechenie issledovaniya novykh konstruksij zon vtorichnogo okhlazhdeniya [Software for research of the new constructions or secondary cooling]. *Programmnye produkty i sistemy [Software products and systems]*, 2008, no. 3: 76 - 79.
29. Borisov V.T. Teoriya dvukhfaznoi zony metallicheskogo slitka [Theory of a two-phase zone of a metal slab]. Moscow: Metallurgiya [Metallurgy], 1987.
30. Borisov V.T., Kolyadina N.Y., Matveev Y.Z. (1980) Metod opredeleniya pronitsaemosti dvukhfaznoi zony zatverdevayushchego splava [Method of determination of permeability of a two-phase zone in the hardening alloy] *Zavodskaya laboratoriya [Plant laboratory]*, 1980, no. 10, pp. 911 - 915.
31. Tutarova V.D., Shapovalov A.N., Safonov D.S. Eksperimentalnye issledovaniya temperatury poverkhnosti nepreryvnoi slyabovoi zagotovki [Experimental researches of the surface temperature of the continuous casting slab]. *Isvestiya VUSov. Chemaya metallurgiya [News of higher institutions. Iron industry]*, 2012, no. 3, pp. 40-42.