

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донецкий национальный университет»

На правах рукописи



Бондаренко Виталий Иванович

**ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ
ПРОИЗВОДСТВЕ ВЫСОКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ
СЛИТКОВ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Донецк – 2018

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет», г. Донецк.

Научный руководитель: **Белюсов Вячеслав Владимирович**,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Дремов Владимир Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия архитектуры и строительства» (г. Донецк), профессор кафедры физики, математики и материаловедения.

Гридин Сергей Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк), доцент кафедры промышленной теплоэнергетики.

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Луганской Народной республики «**Луганский национальный университет имени Владимира Даля**» (г. Луганск).

Защита состоится 23 ноября 2018 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет» по адресу: 283001, г. Донецк, пр. Театральный, 13, аудитория 264. Тел., факс: +38(062)302-06-00, e-mail: d0101603-donnu@ya.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке организации по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, <http://science.donnu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.016.03
доктор технических наук, профессор



В.К. Толстых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Производство круглых слитков для получения колес или труб является важной народнохозяйственной задачей. Вместе с тем, непрерывное литье затруднено при получении круглых слитков диаметром до 50 см., поэтому основное производство основано на разливке слитков в изложнице.

При этом даже незначительные изменения в технологии приводит к изменению формы слитка, массы, относительного объема металла в прибыльной части слитка, к изменению условий кристаллизации головной части слитка, его теплового баланса. Это отразится на перераспределении внутренних дефектов в слитке, в том числе усадочного происхождения. Актуальной является возможность уменьшения времени освобождения слитка из изложницы - "раздевание", что позволит увеличить количество плавов, не повлияв на качество слитка, и тем самым, повысить ресурсо- и энергосбережение при производстве колесной стали.

Гидродинамические и теплофизические явления при разливке и формировании слитка в изложнице в настоящее время недостаточно изучены. Незнание всего комплекса физических процессов и факторов, влияющих на формирование слитка, не позволяет решать вопросы производства высококачественных слитков и создания технологических процессов с оптимальными параметрами выплавки, разливки и охлаждения слитка, и, как следствие, ведет к излишним затратам энергоресурсов, не эффективному использованию оборудования. Следовательно, актуальной задачей разработки рациональной технологии производства слитков, в том числе, колесной стали, является всестороннее исследование работы системы слиток – изложница – окружающая среда.

В связи с возникновением значительных трудностей при теоретическом исследовании вышеописанных процессов, а также технологическими и экономическими проблемами, связанными с горячим и холодным моделированием в металлургии, наиболее приемлемым методом исследования является математическое моделирование с использованием современной вычислительной техники. Кроме того, математическое моделирование позволяет комплексно изучить тепловые и гидродинамические явления в неотъемлемом их единстве и получить поля температур и скоростей в любой точке расплава для каждого момента времени.

Также, кроме обоснованного математического аппарата и вычислительного алгоритма, необходимо разрабатывать пакеты прикладных программ (ППП) с удобным для пользователя интерфейсом. В связи с тем, что большинство решаемых в металлургии задач не имеют инженерных решений в связи с многофакторностью процессов, интерфейс для технолога должен иметь удобные входной и выходной потоки данных. Другой, не менее важной задачей является возможность изменения входных параметров без вмешательства в математическую модель и вычислительный алгоритм программного продукта.

Данная работа посвящена построению математической модели кристаллизации слитков колесной и трубной стали, моделированию влияния температуры металла и линейной скорости разливки стали на образование дефектов поверхности в виде горячих и холодных трещин и распределение в слитке дефектов усадочного происхождения, оптимизации утепления головной части слитков, выбору наиболее рационального типа изложницы (чугунной или стальной). Это позволит найти рациональные тепловые режимы энергосбережения. Также существенной частью работы является создание пакета прикладных программ, позволяющего технологу прогнозировать величину физической неоднородности (усадочной раковины, горячих трещин) на основании моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов при производстве металлургических изделий.

Исходя из этого, тема диссертационного исследования является актуальной и своевременной.

Связь с научными программами, планами, темами. Основные результаты, полученные в исследовании, нашли отражение в госбюджетных научно-исследовательских работах, проводимых Донецким национальным университетом: 10-ВВ/26 «Разработка рациональных режимов разливки и формирования слитков трубной и колесной стали», 12-ВВ/26 «Энергосбережение при разливке стали», 15-1ВВ/26 «Энергоресурсосбережение при производстве стали в агрегате ковш-печь», 17-1ВВ/26 «Математическое моделирование гидродинамических и тепломассообменных процессов в агрегате ковш-печь». Результаты исследований внедрены на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе «ИНТЕРПАЙП НТЗ», в ООО «Институт новых технологий и материалов» (г. Днепропетровск), в учебном процессе Донецкого национального университета.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка рациональных параметров технологии литья высоких цилиндрических слитков при помощи моделирования влияния температуры металла и скорости разливания стали на образование дефектов поверхности в виде горячих трещин и распределение в слитке дефектов усадочного происхождения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ теплофизических и гидродинамических процессов разливки колесной или трубной стали для высоких круглых слитков;
- адаптировать математическую модель модели гидродинамики и тепломассопереноса в затвердевающем слитке для кристаллизации цилиндрических слитков трубной и колесной стали;
- разработать программное обеспечение с удобным, «дружелюбным» для технолога металлургического производства интерфейсом и возможностями графической визуализации процесса затвердевания;
- провести численное моделирование влияния температуры и скорости разливки стали на распределение усадочных дефектов в слитке и образование горячих трещин;
- выполнить моделирование теплофизических процессов при «раздевании» круглых слитков колесной стали;

- разработать рекомендации для совершенствования технологических процессов затвердевания слитков трубной стали и выполнить их проверку в реальных условиях;

- разработать рекомендации для улучшения технологии производства колесных слитков и выполнить их проверку в реальных условиях.

Объект исследования - высокие цилиндрические стальные слитки трубной и колесной стали.

Предмет исследования - теплофизические и гидродинамические процессы при разливке и затвердевании высоких цилиндрических стальных слитков.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы математического моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов в системе расплав – стенка изложницы – окружающая среда, а также расчет усадочной раковины в слитках. Компьютерные программы, реализующие разработанные алгоритмы, созданы в среде программирования Delphi. При этом использовались библиотеки компонентов и инструментальные средства собственной разработки.

Достоверность полученных результатов обеспечивается благодаря корректно поставленной задаче и сравнением результатов численного моделирования с экспериментальными исследованиями. Вычислительный эксперимент показал адекватность математической модели производственным условиям с максимальной погрешностью расчетов не более 6%.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты адаптации математической модели теплофизических и гидродинамических процессов в системе расплав-стенка цилиндрической изложницы-окружающая среда для слитков колесной и трубной стали в период наполнения и формирования;

- программный комплекс для компьютерного моделирования кристаллизации высоких цилиндрических стальных слитков;

- результаты многовариантных расчетов полей температуры, скорости, объема усадочной раковины в слитках круглой и колесной стали;

- рекомендации для совершенствования технологических процессов затвердевания слитков трубной стали;

- рекомендации для улучшения технологии производства колесных слитков;

- внедрение результатов исследований в производство;

Научная новизна:

- для расчета разливки и формирования высоких расширенных книзу бесприбыльных слитков трубной стали и круглых слитков колесной стали, разливаемой в чугунные и стальные изложницы адаптирована математическая модель, разработанная донецкой школой моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических процессах;

- разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать объемы открытой и закрытой усадочной раковины для высоких цилиндрических слитков;

– математическая модель и программный комплекс позволяют прогнозировать и минимизировать размеры УР круглых уширенных книзу (без бокового утепления головной части) слитков путем корректировки технологических параметров их отливки;

– на базе проведенных экспериментальных и численных исследований получили дальнейшее развитие представления об особенностях теплофизических и гидродинамических процессов при разливке и формировании высоких цилиндрических слитков трубной и колесной стали.

Практическая значимость работы состоит в том, что научные положения диссертационной работы доведены до уровня, пригодного для практического внедрения. В частности, разработанное программное обеспечение было использовано для создания технологических процессов затвердевания слитков трубной стали на заводе Ильича (г. Мариуполь) и слитков колесной стали в ОАО «Интерпайп-НТЗ».

Установлено в случае трубных слитков, отливаемых в сквозные, уширенные книзу изложницы без дополнительного бокового утепления прибыльной части, что открытая УР оказывает существенное влияние на качество внутренней поверхности труб. Определено, что глубина УР уширенного книзу заданного слитка без дополнительного бокового утепления при прочих равных условиях зависит от продолжительности его отливки и «подкачки». При этом влияние "подкачки" более существенно, т. к. она уменьшает более чем на 30% объем открытой, но увеличивает на 7-8% объем закрытой усадочной раковины. Опробовано в производственных условиях сокращение времени отливки 8-ми заготовочных слитков с 16–18 мин до 10–16 мин, получены положительные результаты. В ТИ НТЗ-М-02-2006 п.7.3.8 внесены изменения по сокращению длительности отливки слитков до 14–16 мин и указанные рекомендации внедрены в производство. Разработанные рекомендации проверены при изготовлении опытно-промышленных партий слитков марок КП-2 и R-7, R-8, КП-Т в объеме 1440 тонн, результаты опробования подтвердили их состоятельность.

При отливке транспортного металла в 8-ми заготовочные слитки сокращение продолжительности отливки слитка с 18 до 10 минут (повышение скорости разливки) ведёт к уменьшению времени разливки плавки-ковша (четырёх шестиместных поддонов) примерно на 30 минут. При неизменной схеме уборки составов из разливочного пролёта это сокращает занятость разливочной площадки соответственно на 30 минут, которые при интенсивной работе цеха создают резерв времени для выполнения подготовительных операций по разливке стали.

Сокращение времени разливки стали ведет к уменьшению тепловых потерь в процессе разливки. Это является резервом для уменьшения температуры металла, отдаваемого на разливку с комплекса УВОС (установка внепечной обработки стали). Это, в свою очередь, означает возможность снижения температуры металла, передаваемого с печи-ковша на вакууматор, даёт возможность уменьшить время нагрева металла, снизить расходы электроэнергии и, в свою очередь, создаёт более благоприятные условия для службы и стойкости рабочей футеровки вакууматорных ковшей.

Разработанное программное обеспечение обладает удобным, «дружелюбным» для технолога металлургического производства интерфейсом и широкими возможностями графической визуализации процесса затвердевания.

Предложена библиотека модулей и классов для проектирования программного обеспечения моделирования теплофизических и гидродинамических процессов в производстве металлургических изделий, базирующаяся на паттерне проектирования model-view-controller.

Результаты применения созданной технологии для разработки прикладных программ показали ее эффективность, в частности, сокращение трудозатрат. В результате время на создание пакета прикладных программ по заказам металлургических предприятий сокращается во много раз (до одного месяца вместо полугода). Данная технология может быть использована студентами вузов в учебном процессе для выполнения курсовых и дипломных проектов, а также в ходе изучения таких дисциплин как численные методы, моделирование систем, объектно-ориентированное программирование и т.п.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы докладывались на более, чем 30 научных конференциях, из которых можно выделить следующие: научно-методическая конференция «Компьютерное моделирование» (г.Днепродзержинск, 2013 г.); международная научно-методическая конференция «Проблемы математического моделирования» (г. Днепродзержинск, 2010-2012 гг.); региональная научная конференция «Прикладные проблемы аэрогидромеханики и теплопереноса» (Днепропетровск, 2008, 2012 гг.); XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск. 2012 г.); международный научный семинар «Научно-технический прогресс в металлургии - 2012» (Череповец, 2012г.); VII международная конференция «Теплотехника и энергетика в металлургии» (Днепропетровск, 2014 г.); VII Всероссийская конференция с международным участием «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии» (Ижевск, 2016г.); международная конференция «Структурно-фазовые превращения в материалах: теория, компьютерное моделирование, эксперимент» (Екатеринбург, 2017 г.); международная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения» (Луганск, 2016-2017гг.).

Публикации. Основные результаты диссертационных исследований изложены в 16 научных работах [1-16]. 9 работ [1-9] опубликованы в изданиях, утвержденных ВАК ДНР, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук. 8 публикаций [5-12] включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Обобщения результатов исследований по формированию высоких цилиндрических стальных слитков изложены в монографии [15]. По результатам работы разработан и используется в учебном процессе электронный учебник «Математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в стальных слитках», на который получено свидетельство о регистрации авторского права [16].

Личный вклад соискателя. Основные результаты получены автором самостоятельно. В работах [1-13] автору принадлежит участие в разработке

математических моделей, разработка алгоритмов расчетов и программного обеспечения. В работах [3,5,7,9,11] соискателю принадлежит участие в получении и обработке результатов расчетов теплопереноса и гидродинамики при формировании стальных слитков. В монографии [15] соискателю принадлежат главы 3,4,7.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из содержания, введения, четырех разделов, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 190 страниц, из которых текст диссертации занимает 156 страниц, содержит 47 рисунков, 20 таблиц, 3 приложения. Список использованных источников составляет 151 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризованы научная новизна, практическое значение полученных результатов и личный вклад автора в совместные работы, приведены сведения об апробации проведенных исследований и публикации научных статей.

В первом разделе выполнен анализ литературных источников, посвященных гидродинамическим и теплофизическим явлениям при разливке и формировании слитка в изложнице. Делается вывод, что незнание всего комплекса теплофизических и гидродинамических процессов и факторов, влияющих на формирование слитка, не позволяет решать вопросы производства высококачественных слитков и создания технологических процессов с рациональными параметрами выплавки, разливки и охлаждения слитка, и, как следствие, ведет к излишним затратам энергоресурсов, не эффективному использованию оборудования. Следовательно, актуальной задачей разработки рациональной технологии производства слитков, в том числе, колесной стали, является всестороннее исследование работы системы слиток – изложница – окружающая среда.

В связи с возникновением значительных трудностей при теоретическом исследовании вышеописанных процессов, а также технологическими и экономическими проблемами, связанными с горячим и холодным моделированием в металлургии, наиболее приемлемым методом исследования является математическое моделирование с использованием современной вычислительной техники.

Также проводится аналитический обзор современных пакетов, позволяющих рассчитать гидродинамические и теплофизические процессы в период формирования металлургических изделий.

Показана необходимость и своевременность разработки пользовательских интерфейсов, позволяющих проектировать удобные потоки входных и выходных данных для задач разливки и формирования стальных слитков.

На основании аналитического обзора сформулированы цели и задачи исследования.

Второй раздел посвящен формулировке уравнений гидродинамических и тепломассообменных процессов при моделировании процессов разлива и формирования стальных слитков. Предложена систематизация краевых условий, что может существенно облегчит работу проектировщика.

Процессы, происходящие в расплаве и в стенках изложницы, описываются системой уравнений в цилиндрических координатах и краевых условий, состоящих из:

уравнения Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla \vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \nu \nabla \vec{V} + \vec{g} \beta T; \quad (1)$$

уравнения теплопереноса

$$c\rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla T) \right] = \nabla \lambda \nabla T; \quad (2)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial(rV_z)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где:

$\vec{V}$ – вектор скорости, м/с;

t – размерное время, с;

ρ – плотность, кг/м³;

P – давление, н/м²;

ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с;

$\vec{g}$ – ускорение свободного падения, м/с²;

β – коэффициент объемного расширения 1/К;

r, z – текущие координаты, м;

c – коэффициент теплоемкости при постоянном давлении, Дж/кг К;

λ – коэффициент теплопроводности Вт/мК.

На основании анализа гидродинамических, теплофизических и кинетических процессов формирования стальных слитков выбрана модель расчета открытой и закрытой усадочной раковины. В основу кинетики затвердевания теорию квазиравновесной двухфазной зоны, предложенной Борисовым и записанной в виде:

$$\xi = 1 - \left(1 + \frac{c_{жс}}{L} (T_l - T_s) \right) \left[1 - \left(\frac{T_l - T}{T_l - T_s} \right)^{2/3} \right] + \frac{c_{жс}}{L} (T_l - T_s), \quad (4)$$

где T – текущая температура, °С,

c – теплоемкость, Дж/К;

ξ – доля твердой фазы;

L – скрытая теплота кристаллизации, Дж;

T_l, T_s – температуры ликвидус и солидус, К.

Индекс *жс* – соответствует жидкой фазе металла.

С учетом этих предположений краевые условия формируются следующим образом:

$$t = 0: V_r = V_z = 0; \quad T_{\left| \begin{smallmatrix} 0 \leq r \leq l_r \\ 0 \leq z \leq l_z \end{smallmatrix} \right.} = T; \quad T_{\left| \begin{smallmatrix} l_r \leq r \leq l'_r \\ l_z \leq z \leq l'_z \end{smallmatrix} \right.} = T_{изл}, \quad (5)$$

где: V_r и V_z – горизонтальная и вертикальная компоненты скорости;

l_r и l_z – левая и нижняя границы слитка;

l'_r и l'_z – левая и нижняя границы изложницы.

Граничные условия для скорости и температуры в период разливки стали записываются в виде:

$$r = 0: \quad V_r = 0; \quad \frac{\partial V_z}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (6)$$

$$z = H: \quad V_r = 0; \quad V_z = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (7)$$

$$r = L_r: \quad V_r = 0; \quad V_z = 0; \quad \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{ж} = \lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{из}; \quad T_{ж} = T_{из}; \quad (8)$$

$$r = L_z: \quad V_r = 0; \quad V_z = \begin{cases} V_m, & 0 \leq r < R \\ 0, & R \leq r \leq L_z \end{cases}; \quad T = \begin{cases} T_0, & 0 \leq r < R \\ \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{ж} = \lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{из}; T_{ж} = T_{из}, & R \leq r \leq L_z \end{cases}. \quad (9)$$

Индексы m , $ж$, $из$ соответствуют параметрам, относящимся к твердой (m), жидкой фазе металла и изложницы.

На границе изложница – окружающая среда, как для периода разливки, так и для периода затвердевания, работают следующие граничные условия:

на внешней стенке изложницы:

$$\lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{из} = -\alpha_s (T - T_{cp}); \quad (10)$$

на поддоне:

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{из} = 0, \quad (11)$$

где α_s – коэффициент теплообмена с окружающей средой.

R – радиус стакана, м;

$\lambda_{ж}$ и $\lambda_{из}$ – теплопроводность жидкой фазы и изложницы, Вт/м К;

T_{cp} – температура окружающей среды.

В период затвердевания граничные условия (6) – (9) не изменяются, а граничные условия (10) преобразуются к виду:

$$z = L_z: \quad V_r = 0; \quad V_z = 0; \quad T = \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{ж} = \lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{из}; \quad T_{ж} = T_{из}. \quad (12)$$

Подтверждена адекватность математической модели и вычислительного алгоритма на основании сравнения результатов численного моделирования с

классическими исследованиями и моделированием, проведенными другими авторами.

В третьем разделе представлены собственные разработки программных модулей, в которых представлены входные потоки данных, удобные для технолога; выходные потоки, позволяющие визуализировать линии тока в расплаве, изотермы, линии кинетики затвердевания металла, усадочные процессы.

В графической форме схема проектирования программного обеспечения приведена на рис.1.

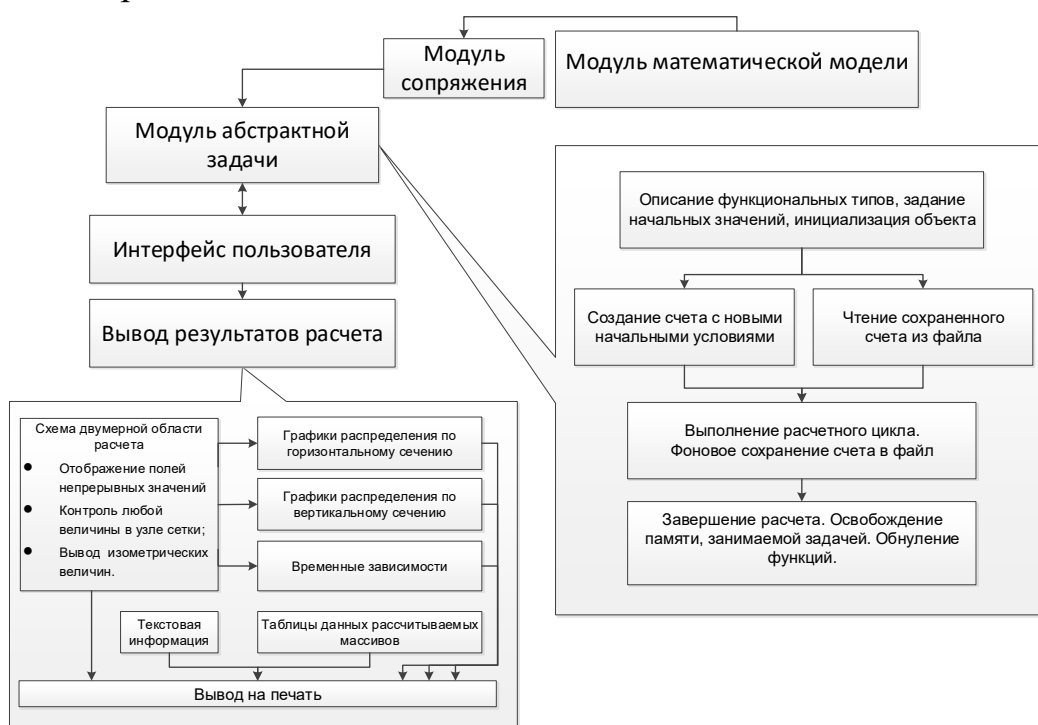


Рисунок 1– Схема проектирования программного обеспечения

В качестве базового языка программирования был принят Delphi.

Была разработана программная система проектирования прикладного программного обеспечения для задач металлургического производства.

Расчетный процесс можно представить следующей блок-схемой (рис.2).

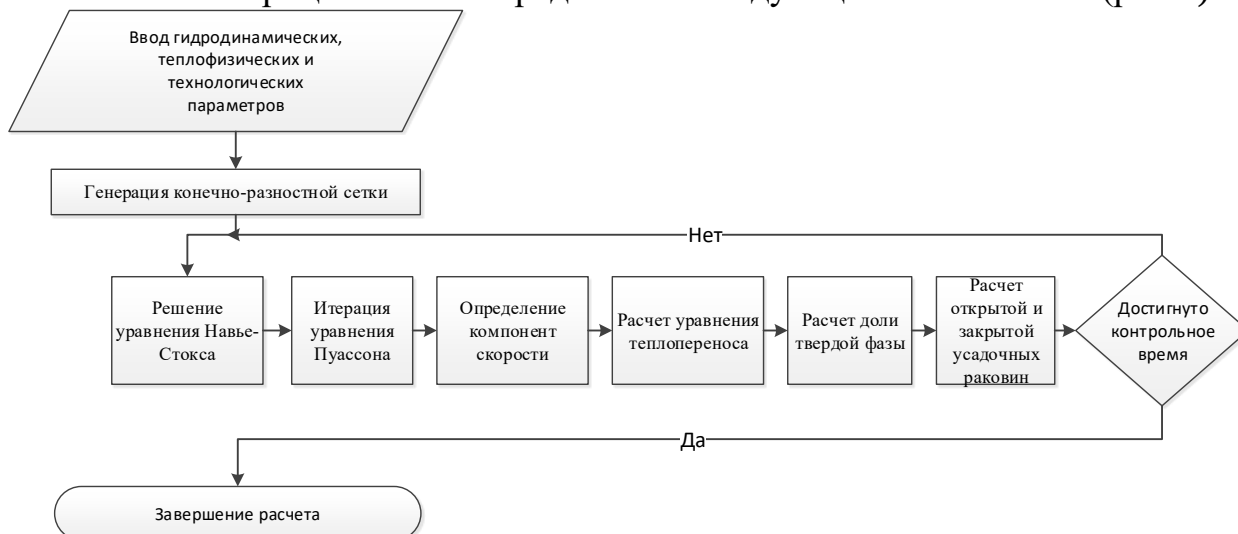


Рисунок 2 – Блок-схема расчета

В основе проектирования пользовательского интерфейса лежит методология Human-Computer Interaction (HCI). Была разработана собственная библиотека графических компонентов для визуализации процесса моделирования.

Центральным звеном является схема двумерной области расчета. Как правило, задачу моделирования металлургических процессов в изложницах можно свести к двумерной осесимметричной модели. Схема области расчета визуализирует данную модель. По умолчанию предусмотрена работа с полями температур, горизонтальной и вертикальной проекций скорости и доли твердой фазы. Но можно добавлять и любые другие поля, представляющие собой двумерные массивы, например, массив локальных термических напряжений и т.п.

Готовое программное приложение (рисунок 3) дает возможность работать в 2-х режимах: расчета и просмотра.

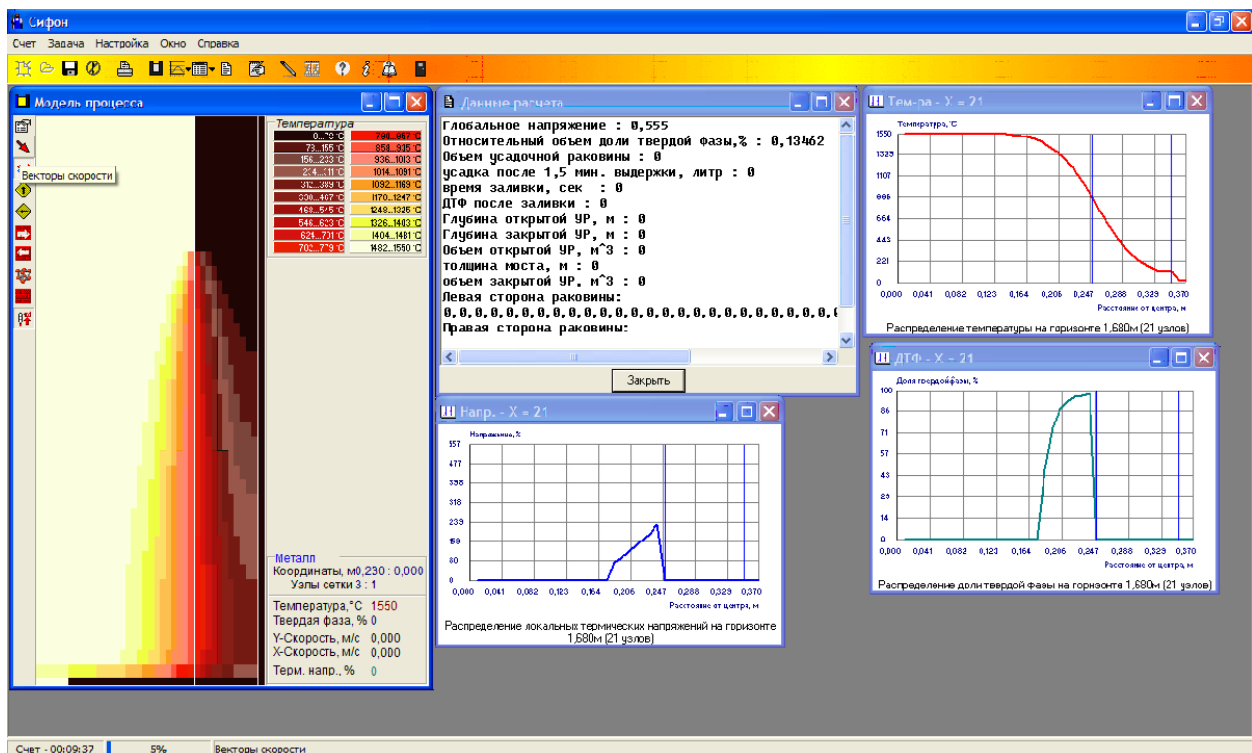


Рисунок 3 – Экран процесса расчета

В четвертом разделе приведены приводятся результаты численных экспериментов, которые были проведены для слитков колесной стали на ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» и для слитков колесной стали на заводе Ильича.

Разливка колесной стали производится сифонным способом в сквозные 8-ми заготовочные изложницы КП-8 круглого сечения, установленные на подвижных сталеразливочных составах, из 120 тонных сталеразливочных ковшей. Ковши оборудованы шибберными затворами (жесткого и модульного типов) и продувочными узлами (фурмами и соплами). Использовано комплексное утепление слитка теплоизолирующими смесями и утепляющими вставками с использованием защиты струи металла аргоном.

Изложницы изготовлены из чугуна марки СЧ 15 и стали марки Ст 20. Для утепления слитков в изложницы после чистки, продувки сжатым воздухом и

осмотра на наличие недопустимых дефектов устанавливали теплоизолирующие вставки МКРВ-340, соответствующие типоразмерам изложниц

Скорость разливки колесной стали зависит, в основном, от температуры металла и регулируется разливщиком в соответствии с технологической инструкцией по принципу: при минимальной для данной марки стали температуре металла скорость разливки максимальна и наоборот.

В начальный период разливка ведётся интенсивно, донная часть изложниц на высоту 80 – 100 мм, должна наполняться в течение 25 – 30 сек, а в дальнейшем - с линейной скоростью 160 – 220 мм/мин. Время наполнения прибыльной части слитков бандажных и трубных марок сталей производится замедленно, в течение 2 – 3 мин., но не менее 2-х мин.

Общая продолжительность наполнения 8-заготовочных изложниц 16 – 18 мин в зависимости от температуры металла. При разливке стали в изложницы с теплоизолирующими вставками при подходе металла на 50 – 100 мм до вставки, скорость разливки уменьшают примерно вдвое, с целью предотвращения подворотов у стенок изложницы утепляющей смеси.

Численный эксперимент проводили для слитков диаметром 500 мм и высотой 3130 мм, отливаемых из стали марок КП-2, КП-Т, R7, R8 в чугунную (чугун марки СЧ 15) (а) и стальную (марка стали Ст 20) (б) изложницы.

Затвердевание осевой зоны слитка оценивали путем погружения металлического стержня в центральную часть слитка и определения глубины его погружения в различные моменты времени.

На рисунке 4 представлены результаты сравнения промышленного и численного экспериментов. Моделирование выполнено для слитков, отлитых в чугунную и стальную изложницы. Эксперимент – для слитков, отлитых в чугунную изложницу. Несмотря на приближенность результатов экспериментального (не всегда можно прутом попасть в наиболее глубокую часть лунки) и численного экспериментов (в расчете глубина лунки принята при доле твердой фазы на фронте кристаллизации равной 0,9), качественно характер кривых совпадает.

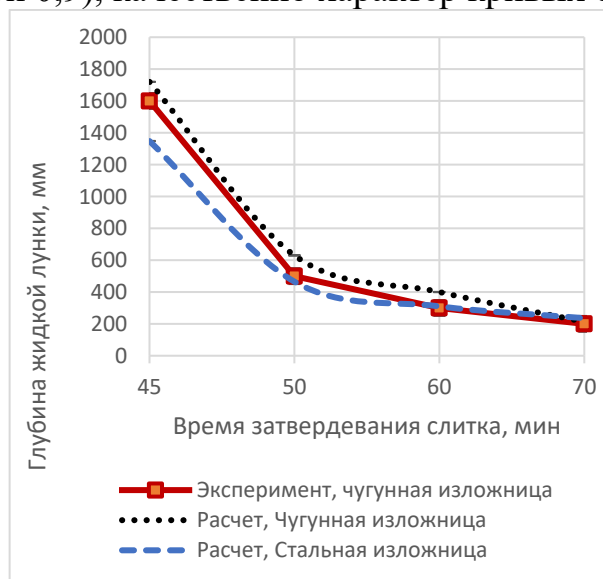


Рисунок 4 – Результаты промышленного и численного экспериментов определения глубины жидкой лунки слитка, отлитого в чугунную и стальную изложницы.

В осевой зоне, как показывают расчеты, расплав затвердевает быстрее в стальной изложнице. Однако, это в определенной степени связано с точностью теплофизических параметров материалов. Тем не менее, применение стальной изложницы не имеет причин для ухудшения качества внутренней зоны колесного слитка. Учитывая высокие значения стойкости стальных изложниц, принятое на заводе решение о замене ими чугунных изложниц является прогрессивным.

Температуру внешней поверхности стальной и чугунной изложницы при разливке стали и формировании слитка измеряли пирометром на расстоянии 0,2 и 1,5 м от поддона. Температура разливки стали 1550°C . Слиток отливали 16 минут. Указанные параметры введены в программу и просчитано изменение температуры поверхности чугунной и стальной изложницы от начала отливки слитка до его затвердевания для проверки адекватности модели производственным условиям.

Расчетные и экспериментальные данные приведены на рисунке 5.

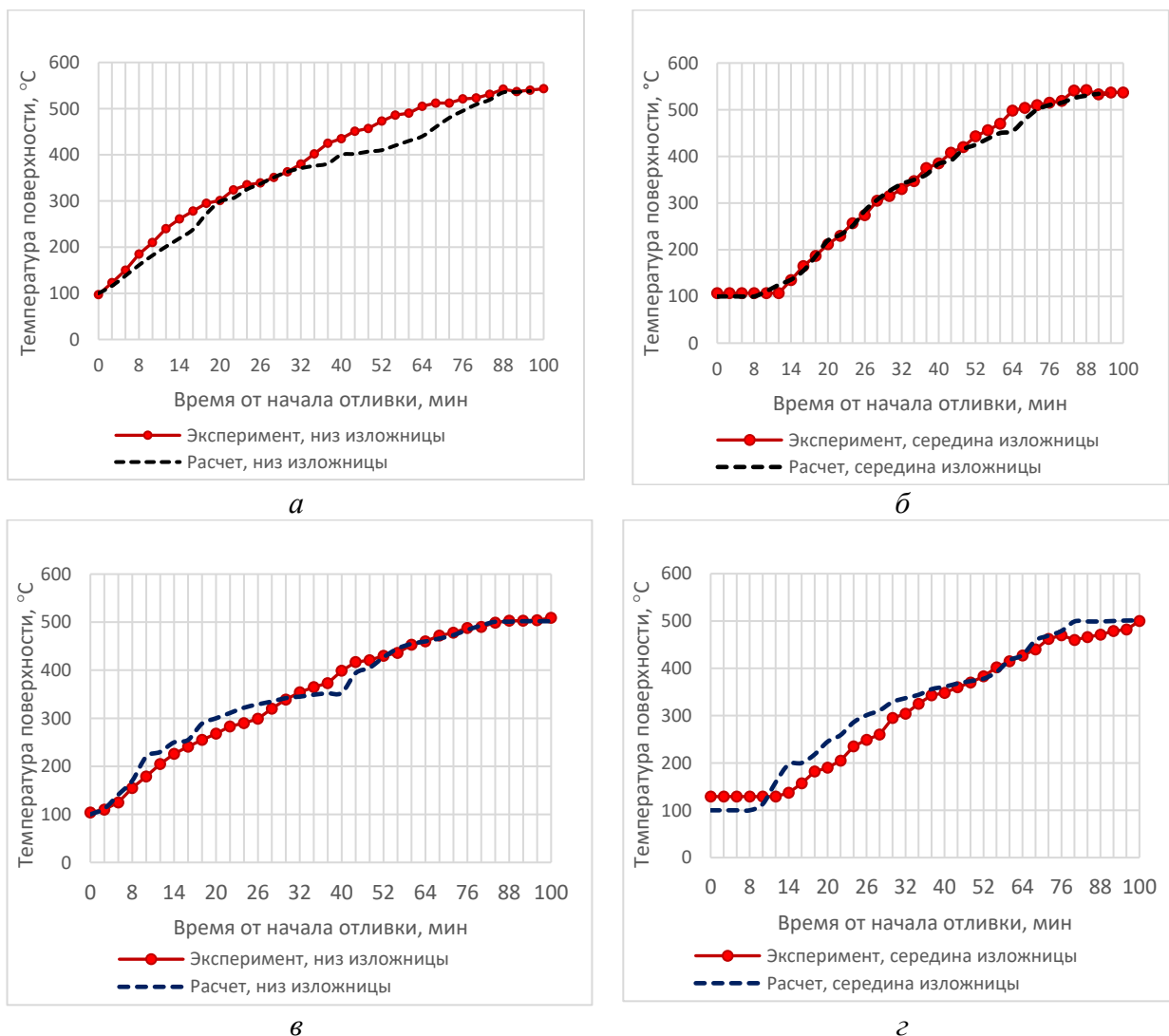


Рисунок 5 – Результаты экспериментального и численного определения динамики температуры поверхности чугунной (а – 200 мм от дна изложницы, б – 1500 мм от дна) и стальной изложницы (в – 200 мм от дна изложницы, г – 1500 мм от дна).

Продолжительность экспериментальных замеров ограничена повышением температуры в месте нахождения экспериментатора. Характер распределения

температур, как для экспериментальных, так и расчетных данных качественно совпадает. Максимальная погрешность расчетов не более 6%, что подтверждает адекватность модели.

Полученные результаты подтверждают, что математическая модель качественно и количественно отражает температурные условия формирования слитка колесной стали, отливаемого в 8-ми заготовочные чугунные и стальные изложницы КП-8.

При общей продолжительности отливки слитка 16 – 18 мин (до проведения настоящей работы) и длительности наполнения теплоизолирующей вставки высотой 220 мм в течение примерно 2 мин линейная скорость наполнения тела слитка находится в пределах 180 – 210 мм/мин соответственно. В модели донная часть изложниц на высоту 80 – 100 мм наполняется в течение 25 – 30 сек с линейной скоростью 160 – 220 мм/мин. В численном эксперименте приняты следующие параметры:

Высота изложницы 3130 ± 15 мм. Внешний диаметр изложницы в нижней части 850_{-2} мм, внутренний диаметр изложницы в нижней части 500^{+2} мм; внешний диаметр изложницы в верхней части 850_{-2} мм, внутренний диаметр в верхней части 506 ± 2 мм. Материал изложницы чугун СЧ 15-32 ГОСТ 1412-70. Изложницы цилиндрические. Конусность на изложнице отсутствует.

На рисунке 6 представлены вектора вертикальной компоненты скорости в расплаве в различные моменты наполнения изложницы (19 сек – а, 10 мин. – б, 15 мин – в, 18 мин – г).

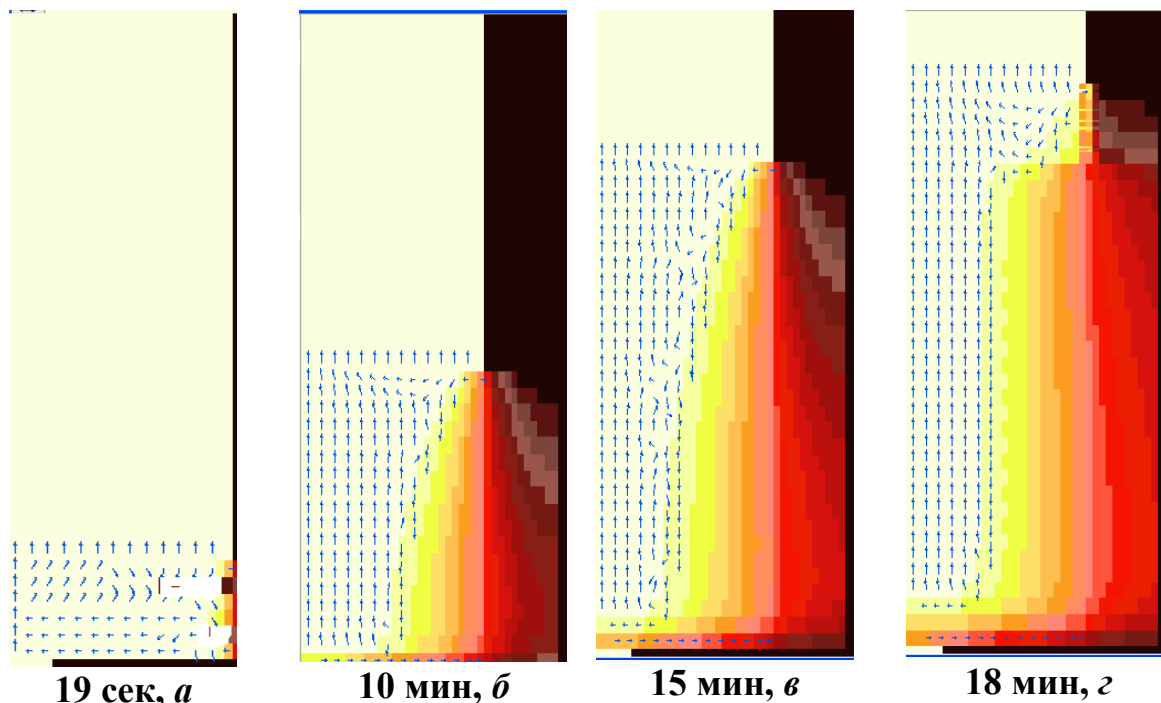


Рисунок 6 – Вектора вертикальной компоненты скорости и кинетика затвердевания слитка в различные моменты времени его наполнения (19 сек – а, 10 мин. – б, 15 мин – в, 18 мин – г).

Уже через 10 мин наблюдается не только струйное течение, индуцируемое струей, но и естественное конвективное вследствие градиента температур. Со временем вклад естественной конвекции возрастает, что подтверждают эпюры скоростей (рисунок 7)

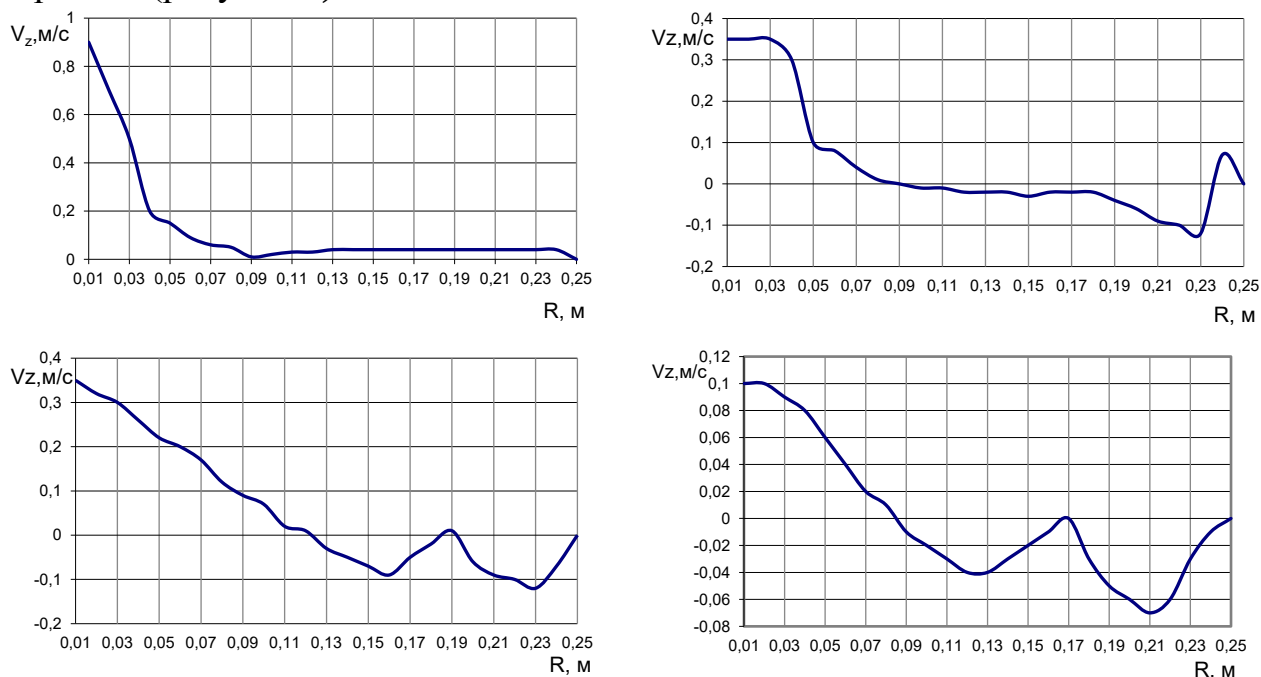


Рисунок 7 – Эпюры вертикальной компоненты скорости по радиусу изложницы на высоте 50 см от дна при разливке слитка в различные моменты времени (19 сек – а, 10 мин. – б, 15 мин – в, 20 мин – г)

Немонотонное изменение кривой, характеризующей вертикальную компоненту скорости на 10, 15 минутах, указывает на наличие вихря в пристеночной области.

С окончанием разливки остаточное влияние струи практически не сказывается на гидродинамической картине в расплаве. Однако наблюдаются две зоны, характеризующиеся различной тепловой обстановкой как в теле слитка, так и в области теплоизолирующего вкладыша. Если в теле слитка движение металла осуществляется по законам конвективного движения: в центре восходящие потоки, а на фронте кристаллизации нисходящие, то горячий расплав из центральной части выносится в головную и, опускаясь вдоль границы фронта кристаллизации, остывает, формируя утолщенную твердую корочку в нижней части слитка, тогда как в головной части, подпитываемой горячими порциями расплава и хорошо теплоизолированной, затвердевание начинается в последнюю очередь.

Выполнено математическое моделирование влияния рассматриваемых факторов на глубину усадочной раковины при исходном перегреве стали над температурой ликвидус 74°C (середина регламентируемого диапазона перегревов для стали марки КП2). Результаты приведены рисунках 8, 9.

Математическое моделирование выявило следующее:

1. Во всех случаях, за исключением высоты вкладыша 190 мм, глубина усадочной раковины меньше высоты теплоизолирующей вставки.

2. Глубина усадочной раковины при отливке слитков в чугунную изложницу несколько больше (на 5 – 10 мм), чем при отливке слитков в стальную изложницу.

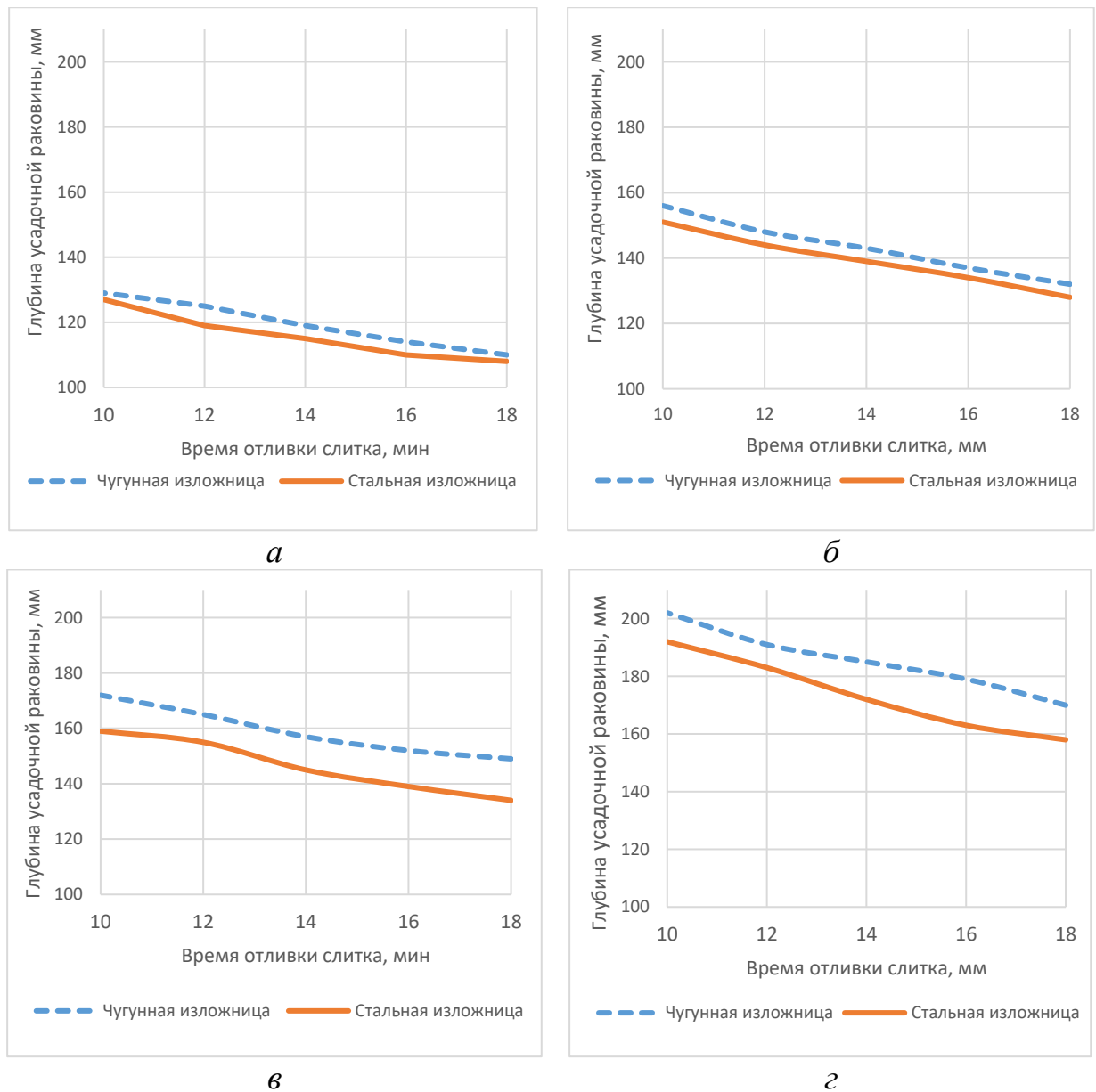


Рисунок 8 – Изменение глубины усадочной раковины от скорости отливки слитка (расчет). Высота вкладыша: *а* - 250 мм, *б* - 220 мм, *в* – 200 мм, *г* – 190 мм.

Это связано с различием теплофизических свойств стальной и чугунной изложниц и свидетельствует о высоких теплоизолирующих свойствах вставок производства Северского завода и весьма высокой эффективности использования физического тепла относительно небольшого объема металла (7-9 %). Этому способствует также правильно подобранные состав, свойства и расход теплоизолирующих смесей для разливки стали, а также покровных смесей для изоляции зеркала металла в ковше после вакуумирования.

По-видимому, по этой причине не было обнаружено изменения величины отбраковки головных заготовок по дефекту «усадочная раковина» при уменьшении высоты вставки с начальных 270 до 220 мм.

3. При решении вопроса устранения потеков металла по телу слитка и улучшения условий работы резцов первого реза целесообразно опробование уменьшения высоты стальных изложниц и соответственно слитка на 50 мм.

Это позволит снизить расходный коэффициент металла на колеса сортамента 957 мм не менее, чем на 1,5%.

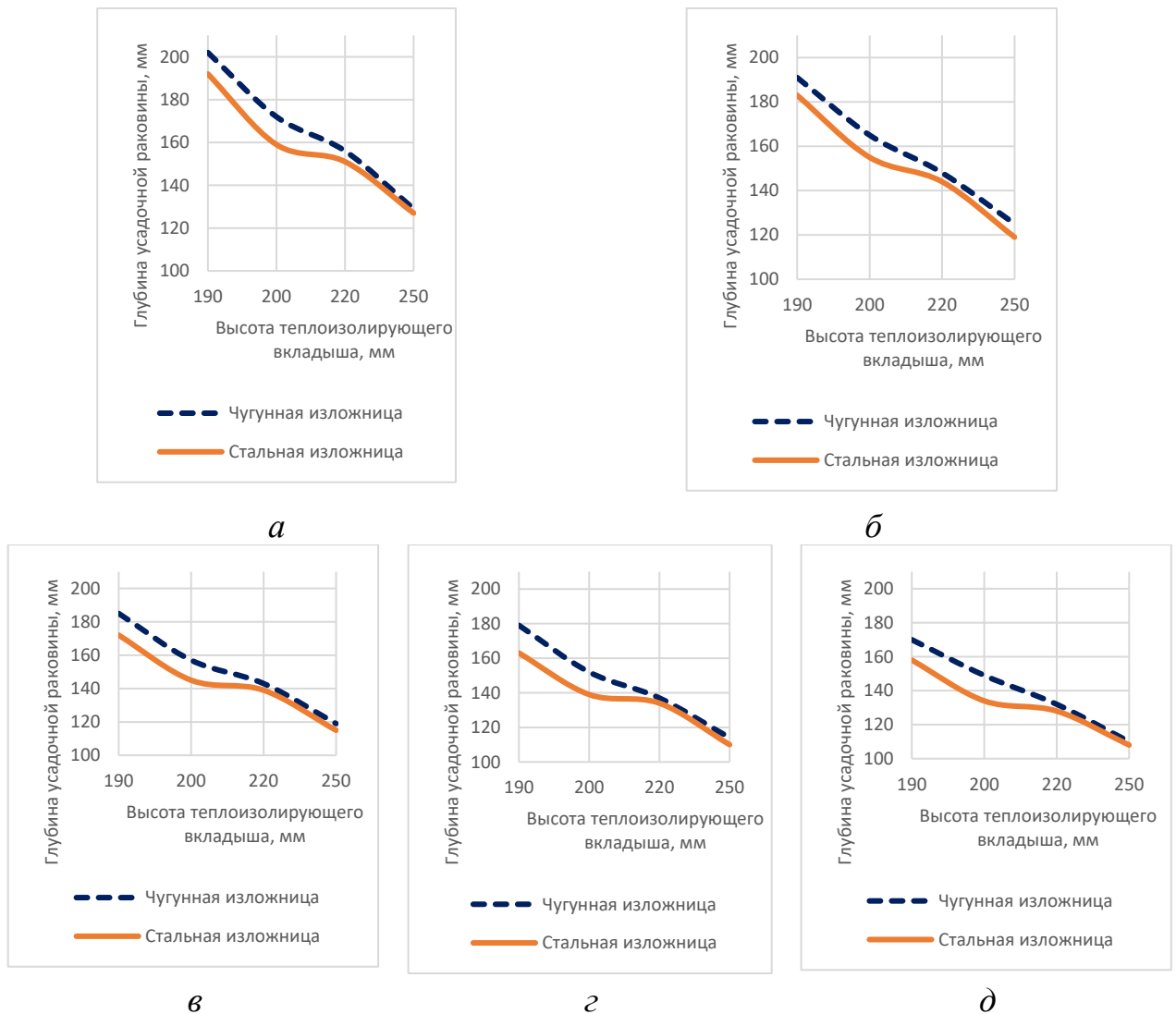


Рисунок 9 – Изменение глубины усадочной раковины от высоты вкладыша (расчет): Общее время отливки слитка: *а* - 10 мин, *б* – 12 мин, *в* – 14 мин, *г* – 16 мин, *д* – 18 мин.

Следует учесть эмпирически то обстоятельство, что в процессе образования усадочной раковины происходит опускание поверхности жидкого металла в прибыльной части слитка примерно на 50 мм и образование «короны» слитка примерно на этой высоте, а также вертикальная усадка всего слитка также примерно на 50 мм. В связи с этим, измеряемые на практике фактические величины глубины усадочной раковины не могут быть достаточно точно соотнесены с

расчетными величинами. Последние могут быть сравниваемы только между собой для оценки влияния, например, высоты теплоизолирующей вставки на глубину распространения в ней усадочной раковины. Такие расчеты были выполнены для четырех вариантов высоты теплоизолирующей вставки: $h = 0,25; 0,22; 0,20$ и $0,19$ м.

Проверочными расчетами контролировалась расчетная глубина усадочной раковины из условия, чтобы эта величина, во избежание ухудшения макроструктуры осевой части слитка, не выходила за пределы высоты теплоизолирующей вставки.

Влияние скорости разливки на глубину усадочной раковины при прочих равных условиях качественно тривиально. Чем больше скорость разливки, тем больше глубина усадочной раковины. Однако, количественно оценить влияние этого фактора в чистом виде возможно лишь с помощью математического моделирования.

Для оценки этого влияния выбрана отливка из стали марки КП-2 в чугунные и стальные изложницы с теплоизолирующей вставкой высотой 250, 220, 200, 190 мм.

При различной длительности разливки стали усадочная раковина в слитках, отливаемых в стальную изложницу, меньше, чем в чугунную. Минимальные значения усадочная раковина имеет при разливке стали в течение 18 мин, максимальные – 10 мин. При выводе из эксплуатации чугунных изложниц и замене их стальными возможно сокращение времени отливки слитков вплоть до 10 мин. Без ущерба для макроструктуры осевой зоны слитка для снижения загруженности разливочного пролета и задолженности разливочных кранов непосредственно на операции разливки.

Технологическими инструкциями по разливке колесных марок стали предусмотрен диапазон температуры 10°C . Выполнено математическое моделирование изменения величины перегрева над температурой ликвидус для колесной стали марки КП-2 в ряде 69, 74, и 79°C .

Результаты численного эксперимента влияния перегрева над температурой ликвидус для стали марки КП2 показывают, как для случая отливки слитка в чугунную, так и в стальную изложницы с увеличением перегрева от 69 до 79 град. глубина усадочной раковины несколько увеличивается (рисунок 10).

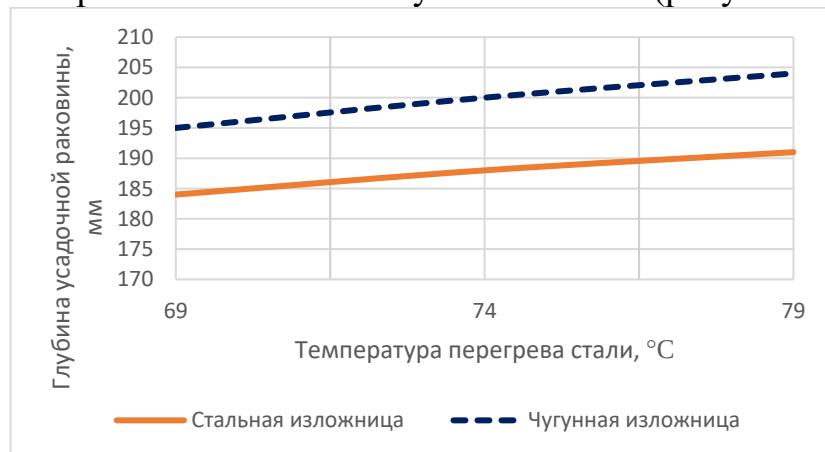


Рисунок 10 - Глубина усадочной раковины в зависимости от начального перегрева стали (численный эксперимент).

Это увеличение для случая чугунной изложницы составляет менее 10 мм (менее 5% или $\pm 2,5\%$ от среднего значения), а для случая стальной изложницы – менее 8 мм (менее 4.4% или $\pm 2,2\%$ от среднего значения). При том, что глубина усадочной раковины находится в пределах объема теплоизолирующей вставки (прибыльной части слитка) это влияние следует признать несущественным. Регламентируемый технологической инструкцией диапазон обеспечивает при его соблюдении требуемое качество слитка.

На основании результатов работы предложены изменения в технологию производства колесных слитков из стали марок КП2, КПТ и других. Совместно с мартеновским цехом, КПЦ и ЦЗЛ произведено в два этапа изменение высоты утеплительных вставок с 270 до 220 мм. Изделия с указанными размерами производятся Северским заводом и внедрены в производство, получен акт внедрения.

Результаты расчета усадочной раковины трубных слитков при различных технологических параметрах разливки слитка. Металлургические заводы, специализирующиеся на отливке трубных (без бокового утепления головной части) слитков, для уменьшения глубины усадочной раковины производят отливку слитков с минимальными линейными скоростями в сочетании с элементом технологии – «подкачка».

Эти технологические параметры отливки слитков преимущественно определены опытным путем, без прогнозирования глубины УР. Для прогнозирования параметров УР необходимо регламентировать продолжительность отливки слитка при заданной температуре металла в сталеразливочном ковше и продолжительность «подкачки» (объем доливаемого металла).

Продолжительность отливки и «подкачки» заданного слитка определяется температурой металла в ковше и маркой стали. «Подкачка» слитка производится в течение 1,0 – 2,0 мин после отливки слитка, т. к. в это время имеет место большая усадка металла до 1,5% от массы слитка.

Для оценки влияния этих факторов на протяженность УР разработана математическая модель гидродинамических и теплофизических процессов в период разливки металла в изложницу и дальнейшего его формирования в ней. Модель также позволяет рассчитать объем открытой и закрытой усадочных раковин в период затвердевания расплава

Были просчитаны несколько вариантов для различного уровня наполнения изложницы (высота слитка 2,05 м и 1,55 м, диаметр основания – 0,455 м) с различным временем наполнения (рисунок 11). После окончания заливки и образования усадочной раковины, доливался расплав равный по объему УР в течение 1,5 мин. В ходе многовариантных расчетов, получены значения открытых и закрытых усадочных раковин, сведенные в таблицу при обычном получении слитка и при доливке расплава.

Приведенные результаты расчета показывают, что глубина УР уширенного книзу заданного слитка без дополнительного бокового утепления при прочих

равных условиях зависит от продолжительности его отливки и «подкачки». Влияние "подкачки" более существенно, т. к. она уменьшает более чем на 30% объем открытой, но увеличивает на 7 – 8% объем закрытой усадочной раковины.

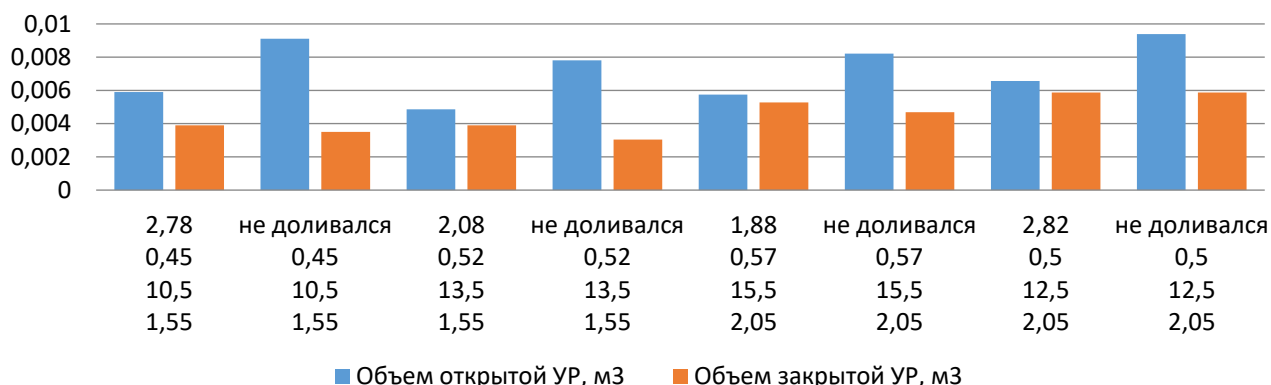


Рисунок 11- Диаграмма расчета усадочной раковины при различных технологических параметрах разливки слитка

Таким образом, математическая модель позволяет прогнозировать размеры УР круглых уширенных книзу (без бокового утепления головной части) слитков путем корректировки технологических параметров их отливки (продолжительности отливки и "подкачки").

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проведен анализ современного состояния проблемы формирования слитков трубной и колесной стали с точки зрения трещиностойкости, величины усадочной раковины, сокращения ресурсо- и энергозатрат.
2. Математическая модель физических процессов, происходящих при расчете гидродинамических и теплофизических процессов при разливке и формировании слитков адаптирована для высоких цилиндрических стальных слитков.
3. Математическая модель и ПО позволяют прогнозировать размеры УР круглых уширенных книзу (без бокового утепления головной части) слитков путем корректировки технологических параметров их отливки (продолжительности отливки и "подкачки").
4. Совместно с мартеновским цехом ОАО «Интерпайп - НТЗ», КПП и ЦЗЛ произведено изменение высоты утеплительных вставок с 270 до 220 мм. Изделия с указанными размерами производятся Северским заводом и внедрены в производство.
5. Опробовано в производственных условиях сокращение времени отливки 8-ми заготовочных слитков с 16 – 18 мин до 10 – 16 мин. Получены положительные результаты. В ТИ НТЗ-М-02-2006 п.7.3.8 внесены изменения по сокращению длительности отливки слитков до 14 – 16 мин и указанные рекомендации внедрены в производство.
6. Сокращение времени разливки стали ведет к уменьшению тепловых потерь в процессе разливки, что является резервом для уменьшения температуры металла, отдаваемого на разливку с комплекса установки внепечной

обработки стали. Это означает возможность снижения температуры металла, передаваемого с печи-ковша на вакууматор, снизить расходы электроэнергии и создаёт более благоприятные условия для службы и стойкости рабочей футеровки вакууматорных ковшей.

7. Разработанные рекомендации проверены при изготовлении опытно-промышленных партий слитков марок КП-2 и R-7, R-8, КП-Т в объеме 1440 тонн. Результаты опробования подтвердили их состоятельность.
8. Разработанный программный комплекс использован для совершенствования технологических, энергоресурсосберегающих процессов при разливке и затвердевании высоких цилиндрических слитков трубной стали на заводе Ильича (г. Мариуполь) и слитков колесной стали на ОАО «Интерпайп - НТЗ».

Публикации по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК ДНР

1. Недопекин Ф.В. Определение оптимальной высоты кристаллизатора в установке непрерывной разливки алюминия / Ф.В. Недопекин, В.В. Бодряга, **В.И. Бондаренко** // Теория и практика металлургии. – 2002. – № 4. – С. 24-27.
2. Белоусов В.В. Информационная система расчета задач тепломассопереноса / В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин, **В.И. Бондаренко**, В.А. Кравец // Математическое моделирование. – 2005. – № 2. – С. 8–14.
3. Анищенко Н.Ф. Расчет гидродинамических и теплофизических процессов в слитках трубной стали / Н.Ф. Анищенко, В.А. Шабловский, **В.И. Бондаренко**, В.В. Белоусов, В.И. Бондаренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 3. – С. 91-93.
4. Белоусов В.В. Математическая модель гидродинамических и тепломассообменных процессов для электронного учебника / В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин, **В.И. Бондаренко** // Математическое моделирование. – 2013. – № 1(28). – С. 44-47.
5. Белоусов В.В. Математическая модель гидродинамических и тепломассообменных процессов в агрегате ковш – печь / В.В. Белоусов, **В.И. Бондаренко**, Ф.В. Недопекин, В.В. Бодряга, Я.В. Павлов, Д.И. Габелая // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – № 1(76). – С. 20-27.
6. Недопекин Ф.В. Математическая модель определения оптимальной высоты кристаллизатора в установке непрерывной разливки стали / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов, В.В. Бодряга, **В.И. Бондаренко**, А.Т. Степанов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – № 1 (76). – С. 74-80.

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК ДНР, включенных в международные наукометрические базы

7. **Bondarenko V.I.** The mathematical model of hydrodynamics and heat and mass transfer at formation of steel ingots and castings / **V.I. Bondarenko**, V. V.

- Bilousov, F. V. Nedopekin, J.I. Shalapko // Archives of Foundry Engineering. – 2015. – Vol. 15. – № 1. – pp. 13-16. (**Scopus**)
8. Bazdyreva Y.A. Hydrodynamics and heat and mass transfer during formation of thin metal glass tape / Y.A. Bazdyreva, V. V Belousov, **V.I. Bondarenko**, V. V Bodryaga, F. V Nedopekin, S.F. Prohorenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 192. – № 1. (**Scopus**)
9. **Bondarenko V.I.** Visualization of Process of Wheel Steel High Ingots Simulation / **V.I. Bondarenko**, V. V Bodryaga, F. V Nedopekin, V. V Belousov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 287. (**Scopus**)

Публикации в других изданиях

10. Баздырева Ю.А. Математическое моделирование процессов образования тонкой металлической стеклянной ленты / Ю.А. Баздырева, В.В. Белоусов, **В.И. Бондаренко**, В.В. Бодряга, Ф.В. Недопекин // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 2(4). – С. 143-147.
11. Белоусов В.В. Математическая модель гидродинамических и тепломассообменных процессов в агрегате печь-ковш / В.В. Белоусов, **В.И. Бондаренко**, Ф.В. Недопекин, В.В. Бодряга // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции. – Том 1. Физико-математические, технические науки и экология / под общей редакцией проф. С. В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 169-172.
12. **Бондаренко В.И.** Обучающая система для моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов в металлургии / **В.И. Бондаренко**, В.В. Бодряга, Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции. – Том 1. Физико-математические, технические науки и экология / под общей редакцией проф. С. В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 172-174.
13. Недопекин Ф.В. Расчетно-интерфейсная оболочка для двумерных задач гидродинамики и тепломассопереноса / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов, **В.И. Бондаренко** // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. Естественные науки. – 2004. – № 1. – С. 209-216.
14. **Бондаренко В.И.** Программная система для моделирования процесса тепломассопереноса при разливке и затвердевании стали / **В.И. Бондаренко** // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. Естественные науки. – 2009. – № 2. – С. 103-110.

Монография

15. **Бондаренко В.И.** Математическое обеспечение и компьютерные технологии для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в металлургии: Монография / **В.И. Бондаренко**, В.Ф. Комаров, Ф.В.

Недопекин, В.М. Мелихов, В.В. Белоусов. – Донецк: Юго-Восток, 2013. – 210 с.

Свидетельство о регистрации авторского права

16. **Бондаренко В.И.** Программный продукт «Математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в стальных слитках» / **В.И. Бондаренко, В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин, В.М. Кондратенко.** – Украина: Свидетельство о регистрации авторского права на произведение №47898, 2013.

АННОТАЦИЯ

Бондаренко В.И. Энергоресурсосберегающие технологии при производстве высоких цилиндрических стальных слитков.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Донецк, 2018.

В работе исследован процесс разливки и затвердевания высоких цилиндрических слитков трубной и колесной стали.

Сформулирована математическая модель гидродинамических и теплофизических процессов, в основе которой лежит система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Разработано математическое и программное обеспечение, позволяющее рассчитывать поля скорости и температуры в различные моменты времени, рассчитывать объем открытой и закрытой усадочных раковин в период затвердевания расплава. Были просчитаны варианты для различного уровня наполнения изложницы с различным временем наполнения. В ходе многовариантных расчетов получены значения открытых и закрытых усадочных раковин, сведенные в таблицу при обычном получении слитка и при доливке расплава.

Разработаны и проверены в реальных условиях рекомендации для совершенствования технологических процессов затвердевания слитков трубной стали.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований формирования слитка, гидродинамики, теплопереноса, исследования глубины усадочной раковины, изменения жидкой фазы в осевом сечении слитка, температуры поверхности 8-ми заготовочного слитка колесной стали и изложницы, проведенные в условиях действующего производства ОАО «Интерпайп - НТЗ» и численный эксперимент, показали адекватность математической модели, вычислительного алгоритма и удовлетворительное согласование полученных результатов. Погрешность моделирования составляет 6 %.

Выполнено моделирование теплофизических процессов при «раздевании» круглых слитков колесной стали.

Разработаны рекомендации для улучшения технологии производства колесных слитков и выполнена их проверка в реальных условиях. Опробовано в производственных условиях сокращение времени отливки 8-ми заготовочных

слитков колесной с 16 – 18 мин до 10 – 16 мин. Указанные рекомендации внедрены в производство.

Ключевые слова: теплофизика, энергосбережение, ресурсосбережение, колёсная сталь, трубная сталь, слиток, усадочная раковина, изложница, численный эксперимент, математическая модель, процессы переноса, тепломассоперенос, программное обеспечение.

ABSTRACT

Bondarenko V.I. Energy-and-resource-saving technologies in the production of high cylindrical steel ingots.

Thesis for the of Candidate of Technical Sciences degree on specialty 05.14.04 - Industrial Heat-and-Power Engineering, Donetsk National University, Donetsk, 2018.

The process of casting and solidification of high cylindrical ingots of pipe and wheel steel was studied.

A mathematical model of hydrodynamic and thermal physical processes is formulated, which is based on a system of nonlinear partial differential equations.

The mathematical and software that allows calculating the velocity and temperature fields at different times are calculated, and the volume of open and closed shrinkage shells during the melt solidification period is calculated. Variants for different levels of mold filling with different filling times were calculated. In the course of multivariate calculations, the values of open and closed shrinkage holes were compiled in the table for the usual ingot production and for melt refining.

Developed and tested in real conditions, recommendations for improving the technological processes of solidification of ingots of tubular steel.

Analysis of theoretical and experimental studies of the formation of ingots, hydrodynamics, heat transfer, study of the depth of the shrink shell, changes in the liquid phase in the axial section of the ingot, surface temperature of the 8 ingot ingot of wheel steel and molds carried out in the operating production of NTRP Interpipe and numerical experiment, showed the adequacy of the mathematical model, the computational algorithm and the satisfactory agreement of the results obtained. The simulation error is 6%.

Simulation of heat-physical processes during "stripping" of round ingots of wheeled steel was performed.

Recommendations for improving the production technology of wheel ingots are developed and tested in real conditions. It has been tried in production conditions to reduce the casting time of 8 bars of cast billets from 16 to 18 minutes to 10-16 minutes. These recommendations have been introduced into production.

Key words: thermal physics, energy-saving, resource-saving, wheel steel, pipe steel, ingot, pipe, mold, numerical experiment, mathematical model, transport processes, heat-and-mass transfer, software.