

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н, профессор  
Белоусов В.В.

Донецк – 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                              | 5  |
| 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА<br>БЕСШОВНЫХ ТРУБ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ<br>ЗАГОТОВОК.....                  | 15 |
| 1.1. Технологии изготовления трубных и колесных заготовок .....                                                                             | 15 |
| 1.2. Прокатка труб .....                                                                                                                    | 27 |
| 1.3. Основные элементы технологии производства железнодорожных колес..                                                                      | 30 |
| 1.4. Требования к программному обеспечению для математического<br>моделирования.....                                                        | 34 |
| 1.5. Анализ пакетов прикладных программ для решения задач аэродинамики и<br>теплообмена .....                                               | 37 |
| 1.6. Сравнительный анализ математического обеспечения для моделирования<br>задач тепломассопереноса при затвердевании слитков .....         | 42 |
| 1.7. Выводы по разделу 1 .....                                                                                                              | 45 |
| 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И<br>ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СЛИТОК – СТЕНКА<br>ИЗЛОЖНИЦЫ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА ..... | 48 |
| 2.1. Математическая модель процессов переноса.....                                                                                          | 49 |
| 2.2. Выбор модели турбулентности .....                                                                                                      | 51 |
| 2.3. Выбор моделей турбулентности для расчета теплофизических и<br>гидродинамических процессов в затвердевающем слитке .....                | 61 |
| 2.4. Выбор границ применимости математической модели турбулентности при<br>формировании стального слитка .....                              | 69 |
| 2.5. Условия на границе .....                                                                                                               | 78 |
| 2.6. Оценка применимости математической модели. ....                                                                                        | 83 |
| 2.7. Адекватность применения предложенной математической модели.....                                                                        | 83 |
| 2.8. Адекватность расчетных и экспериментальных данных .....                                                                                | 88 |
| 2.9. Адаптация математической модели для высоких цилиндрических слитков                                                                     | 91 |
| 2.10. Методы решения уравнений теплопроводности и гидродинамики .....                                                                       | 94 |

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.11. Метод конечных разностей .....                                                                                                                                                                   | 98  |
| 2.12. Метод расчета усадочной раковины.....                                                                                                                                                            | 99  |
| 2.13. Выводы по разделу 2.....                                                                                                                                                                         | 103 |
| 3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО<br>МОДЕЛИРОВАНИЯ .....                                                                                                                             | 104 |
| 3.1. Автоматизация проектирования программного обеспечения .....                                                                                                                                       | 105 |
| 3.2. Базовый класс «Задача» .....                                                                                                                                                                      | 110 |
| 3.3. Библиотека подпрограмм «Математическая модель» .....                                                                                                                                              | 112 |
| 3.4. Модуль сопряжения .....                                                                                                                                                                           | 114 |
| 3.5. Проектирование интерфейса пользователя .....                                                                                                                                                      | 115 |
| 3.6. Общая схема построения пользовательского интерфейса .....                                                                                                                                         | 117 |
| 3.7. Разработка визуальных компонентов .....                                                                                                                                                           | 118 |
| 3.8. Выводы по разделу 3.....                                                                                                                                                                          | 123 |
| 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИРОДИНАМИЧЕСКИХ И<br>ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИВКЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ<br>ВЫСОКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ И СРАВНЕНИЕ С<br>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ..... | 124 |
| 4.1. Анализ технологических процессов производства слитков колесной стали<br>«Интерпайп НТЗ» .....                                                                                                     | 125 |
| 4.2. Подтверждение адекватности математической модели .....                                                                                                                                            | 129 |
| 4.3. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов при<br>разливке и формировании слитка .....                                                                                           | 135 |
| 4.4. Влияние скорости разливки и высоты теплоизолирующей вставки на глубину<br>усадочной раковины.....                                                                                                 | 137 |
| 4.5. Влияние величины перегрева стали на глубину усадочной раковины.....                                                                                                                               | 141 |
| 4.6. Численное моделирование распределения температур в слитке по его<br>сечению при различной выдержке в изложнице до его разделения .....                                                            | 142 |
| 4.7. Производство колесной стали .....                                                                                                                                                                 | 144 |
| 4.8. Разработка рекомендаций по оптимизации технологии отливки колесных<br>слитков.....                                                                                                                | 147 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.9. Обсуждение результатов работы и мероприятий по повышению энергосбережения в мартеновском цехе .....                  | 148 |
| 4.10. Результаты расчета усадочной раковины трубных слитков при различных технологических параметрах разливки слитка..... | 152 |
| 4.11. Выводы по разделу 4.....                                                                                            | 153 |
| ВЫВОДЫ.....                                                                                                               | 155 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....                                                                                    | 157 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А.....                                                                                                         | 173 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....                                                                                                        | 184 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....                                                                                                        | 189 |

## ВВЕДЕНИЕ

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 производство, основанное на разливке цилиндрических слитков в изложнице, остается актуальным.

При этом даже незначительные изменения в технологии (например, переход с шестизаготовочных круглых слитков на восьмизаготовочные) приводит к изменению формы слитка, массы, относительного объема металла в прибыльной части слитка, к изменению условий кристаллизации головной части слитка, его теплового баланса. Это отражается 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 плавок, не повлияв на качество слитка, и тем самым, повысить ресурсо- и энергосбережение при производстве колесной стали.

Современные требования к промышленной продукции требует внедрения новых технологий. Однако промышленное экспериментирование с металлургическими или машиностроительными изделиями является не только дорогостоящим, но и не всегда дает однозначный результат. Последнее связано с взаимообусловленными процессами, например, для металлургии это трудно определяемое в промышленных условиях влияние гидродинамического фактора на тепловую обстановку при формировании слитка.

Лабораторные исследования высокоскоростных и высокотемпературных процессов в металлургии связаны со сложностями, предъявляемыми к выполнению критериев подобия.

Многомерные нелинейные уравнения переноса импульса и энергии не имеют достоверного математического аппарата для их решения.

Поэтому надежным способом исследования является математическое моделирование. Однако кроме обоснованного математического аппарата и вычислительного алгоритма [1, 2] необходимо разрабатывать пакеты прикладных программ (ППП) с удобным для пользователя интерфейсом. В связи с тем, что множество решаемых в металлургии задач не имеют инженерных решений в связи с многофакторностью процессов, программное обеспечение для технолога должно 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 адаптации математической модели гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических процессах [3, 4] для кристаллизации высоких цилиндрических 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 распределению в слитке дефектов усадочного происхождения, оптимизации утепления головной части слитков, выбору наиболее рационального типа изложницы. Это позволяет найти рациональные тепловые режимы энергосбережения. Также рассматривается повышение эффективности разработки пакетов прикладных программ для моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов при производстве металлургических изделий.

Исходя из этого, тема диссертации является актуальной и своевременной.

**Общей целью исследования** является моделирование 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 технологических процессов разливки колесной и трубной стали для высоких круглых слитков;
- провести анализ существующих пакетов прикладных программ и систем автоматизированного моделирования литейных процессов;

- адаптировать математическую модель гидродинамики и тепломассопереноса в затвердевающей слитке для кристаллизации стальных цилиндрических слитков;
- разработать алгоритм гидродинамических и теплообменных процессов литья и кристаллизации цилиндрических слитков с использованием утеплительных материалов;
- 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** – гидродинамические, тепло- и массообменные 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%.

В результате научных исследований:

Проведен анализ современного состояния проблемы формирования слитков трубной и колесной стали с точки зрения трещиностойчивости и величины усадочной раковины (УР).

Для расчета разливки и формирования расширенных книзу бесприбыльных слитков трубной стали и круглых слитков колесной стали, разливаемой в чугунные и стальные изложницы используется адаптированная математическая модель, разработанная донецкой школой моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических процессах[5]. Модель базируется на системе нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики, теплопереноса, описывающих процессы передачи импульса и тепла в расплаве. Тепловые эффекты плавления и кристаллизации учитываются с помощью квазиравновесной двухфазной зоны.

Разработанный пакет прикладных программ позволяет прогнозировать и минимизировать размеры УР круглых уширенных книзу (без бокового утепления головной части) слитков путем корректировки технологических параметров их отливки, что сокращает энерго- и ресурсозатраты на производство.

Проведенные численные эксперименты позволили сократить время отливки круглых слитков колесной стали, рассчитать рациональные геометрические размеры слитка и утеплительной вставки, материала изложницы, что позволяет сократить ресурсо- и энергозатраты при производстве слитков колесной стали.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в том, что научные положения диссертационной работы доведены до уровня, пригодного для практического внедрения. Предложены технология и инструментальные средства для разработки прикладных программ моделирования гидродинамических и тепло-массообменных процессов в металлургическом производстве. Разработан комплекс программ для компьютерного моделирования затвердевания слитков трубной и колесной стали. В частности, разработанное программное обеспечение было использовано для организации 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». 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 и 18 мин до 10 и 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 были 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.

Результаты применения созданного программного комплекса 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).

Разработанный программный комплекс может быть использован 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.

Основные результаты, приведенные в диссертации, нашли отражение в государственных 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» и др.

Результаты исследований внедрены:

- на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе «ИНТЕРПАЙП НТЗ» (акты внедрения от 22.03.2011 и от 25.07.2012);

- в ООО «Институт новых технологий и материалов», г.Днепропетровск (акт внедрения от 04.2012).

#### **Личный вклад соискателя.**

Теоретические и численные исследования, их обработка, а также сопоставление полученных результатов и выводы выполнены автором самостоятельно. Полученные соискателем результаты теплопереноса и гидродинамики при формировании стальных слитков опубликованы в работах [6–12]. Методы численного решения уравнений тепломассопереноса опубликованы в работах [13–20]. В работах [21–40] приведены результаты численных экспериментов на основе разработанного автором программного комплекса. Обобщения результатов исследований по формированию высоких цилиндрических стальных слитков изложены в монографии [1] и в учебном пособии [41]. Также разработан и внедрен в учебный процесс

электронный учебник «Математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в стальных слитках», на который получено свидетельство о регистрации авторского права [14, 42–45].

**Апробация результатов.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались:

- На международной научно-методической конференции «Компьютерное моделирование», г. Днепропетровск в 1997, 1999, 2000, 2001, 2013 гг.

- На международной научно-методической конференции «Проблемы математического моделирования» в 2006-2012 гг.

- На ВУЗовских конференциях проф.-препод. состава по итогам науч.-исслед. и методической работы ДонНУ, 1995-2012гг.

- На международной конференции "Математика и индустрия", 1998г., Таганрог, Россия.

- На международной научно-технической конференции «Производство стали в XXI веке. Прогноз, процессы, технологии, экология» в 2000г., Киев, Днепропетровск.

- На международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век» в 2004г., ДонНТУ, Донецк.

- На региональной научной конференции «Прикладные проблемы аэрогидромеханики и тепломассопереноса» в 2006, 2008 гг., ДНУ, Днепрпетровск.

- На международном научно-практическом семинаре «Гидродинамика и экология» к 100-летию со дня рождения чл.-корр. НАН Украины, профессора И.Л. Повха в 2009г., ДонНУ, Донецк.

- На VI межвузовской научно-практической конференции «Научный потенциал высшей школы» в 2010г., Николаев.

- На первом международном научно-практическом семинаре «Повховские научные чтения» в 2010г., ДонНУ, Донецк.

- На международной научной конференции «Промышленная гидравлика и пневматика» в 2011г., ДонНТУ-ДонНУ, Донецк.

- На XVI международной конференции «Теплотехника та енергетика в металургії», НМетАУ в 2011г., Днепропетровск.
- На международной научной конференции «IV Українсько-Польські Наукові Діалоги» в 2011г., Хмельницький-Яремче.
- На 2-м международном научно-практическом семинаре «Повховские чтения» в 2012г., ДонНУ, Донецк.
- На IV международной конференции «Прикладные проблемы аэрогидромеханики и теплопереноса» в 2012г., ДНУ, Днепропетровск.
- На XIV Минском международном форуме по тепло- и массообмену в 2012г., ИТМ им. А.В. Лыкова, Минск.
- На международном научном семинаре «Научно-технический прогресс в металлургии - 2012» в рамках ежегодной конференции «Череповецкие научные чтения» в 2012г., ЧПУ, Череповец.
- На IV всеукраинской конференции «Состояние и совершенствование безопасности информационно - телекоммуникационных систем» в 2012г., На XVII международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», в 2014г., НМетАУ, Днепропетровск.
- На VII Всероссийской конференции с международным участием «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии» в 2016г., УдГУ, Ижевск.
- На первой международной научной конференции «Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности» в 2016г., ДонНУ, Донецк.
- На международной научно-практической конференции «Открытые физические чтения» в 2016г., ЛНУ им. В. Даля, Луганск.
- На международной конференции «Структурно-фазовые превращения в материалах: теория, компьютерное моделирование, эксперимент» в 2017г., УФУ, Екатеринбург.
- На международной научно-практической конференции «Открытые физические чтения» в 2017г., ЛНУ им. В. Даля, Луганск.

**Публикации.** Основные результаты диссертационных исследований изложены в 16 научных работах [1, 7, 30, 31, 36, 37, 42, 45, 12, 14, 16–18, 20, 28, 29]. 9 из них опубликованы в изданиях, утвержденных ВАК ДНР, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук [7, 12, 14, 16, 18, 20, 28, 30, 37]. 8 публикаций включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Обобщения результатов исследований изложены в монографии [1]. 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 [42].

**Структурный объем диссертации.** В первой главе проводится обзор современных способов производства бесшовных стальных труб и железнодорожных колес. Особое внимание уделяется получению заготовок и их свойствам. Также в первой главе проводится аналитический обзор современных вычислительных пакетов, позволяющих рассчитать гидродинамические и теплофизические процессы в период формирования металлургических изделий. Пакеты разделены на две большие группы. В первой группе рассматриваются специализированные пакеты, разработанные специалистами на территории СНГ. Во второй группе – рассматриваются интегрированные пакеты типа ANSYS, Comsol Multiphysic и др.

На основании аналитического обзора сформулирована задача исследования, в которой показана необходимость и своевременность разработки энергоресурсосберегающих технологий производства высоких цилиндрических стальных слитков, в том числе включающих в себя программные комплексы, позволяющие проектировать удобные потоки входных и выходных данных.

Вторая глава посвящена формулировке обобщенных уравнений гидродинамических и тепломассообменных процессов при моделировании процессов разлива и формирования стальных слитков. Предложена систематизация краевых условий, что может существенно облегчить работу проектировщика. Подтверждена адекватность математической модели и вычислительного алгоритма на основании

сравнения результатов численного моделирования с классическими исследованиями и моделированием, проведенными другими авторами.

В третьей главе представлены собственные разработки программного комплекса, 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 четвертой главе представлены результаты численного моделирования практических задач, которые внедрены на производстве.

# 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕСШОВНЫХ ТРУБ И ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

## 1.1. Технологии изготовления трубных и колесных заготовок

В условиях интенсивного развития машиностроения, энергетики, добывающей промышленности и транспорта, структуры городского хозяйства возрастает потребность в прочных и достаточно легких трубах, технологичных при монтаже в промышленных агрегатах и сооружении трубопроводов.

Промышленное значение имеют различные способы изготовления труб с использованием таких методов обработки конструкционных материалов как литье, обработка давлением, сварка и обработка резанием. Наиболее распространены две технологии производства труб. Первая: сворачивание стального листа в трубу и сваривание по спирали или по прямой линии. Вторая: круглую заготовку нагревают до 1300°C и прошивают в полуу гильзу с толстыми стенками на винтовом стане, а затем раскатывают в длинную бесшовную трубу с требуемой толщиной стенки.

Рассмотрим основные технологии производства заготовок стальных бесшовных труб [46–49]. Технология получения заготовок для железнодорожных колес во многом аналогична трубным [50–53].

Для изготовления бесшовных труб берется заготовка, которая предопределяет качество и себестоимость будущей трубы. Стоимость исходного материала для бесшовных труб составляет до 85% себестоимости [47]. Для успешного ведения технологических процессов в изготовлении бесшовных труб требуются высокие качественные характеристики поверхности исходной заготовки.

Для производства различного сортамента горячекатаных труб используют разные виды заготовок, например, катаную заготовку с круглым или квадратным профилем; слитки с круглым, многогранным сечением; кованую заготовку.

Круглая катаная заготовка диаметром 90-270 мм является превалирующим видом заготовок. При получении коррозионностойких сортов труб, например, для котлов, предпочитают заготовки уже в обточенном виде. Это делается для увеличения качества поверхности труб. В зависимости от целей использования, сорта трубного материала, выполняется дополнительно структурный анализ, проверяется микро- и макроструктуру.

Как правило, при подаче в цех заготовки представляют собой себя штанги 3,5 - 12 м длиной, которые затем кроются на мерные длины.

На агрегатах, оснащенных пилигримовым станом производят трубы среднего и большого диаметра из углеродистой стали и сталей с низким легированием. Для этого используют слитки, полученные методом сифонной разливки. Заготовка, неравномерная по структуре, с большим числом дефектов слитка приводят к низкой пластичности материала и к увеличению количества дефектов трубы. Производство данного сортамента труб из слитков оправдывается их низкой стоимостью по сравнению с аналогами из катаной и других видов заготовки, а также техническими трудностями прокатки заготовок диаметром от 270-300 мм. Максимальный диаметр указанных слитков может достигать 700 мм.

Таким образом, использование слитков - это особенность линий с пилигримовым станом. Объясняется это распределением деформации между прошивкой и раскаткой: относительно малый уровень деформации при прошивке литого металла, большое обжатие предварительно деформированного металла в пилигримовом стане.

Качество будущей трубы определяет также форма поперечного профиля. Форма определяется выбором прошиваемого оборудования: пресс или стан. Круглый профиль обеспечивает прочный захват заготовки валками прошивной линии. Многогранный профиль содействует уменьшению трещинообразования (продольных трещин) при кристаллизации.

Перед прокаткой проводят подготовку слитка, используя проведение контроля и ремонт поверхности. Ремонт включает в себя вырубку, огневую зачистку.

Слитки для труб особо значимого применения, например, котельных, просверливают насквозь, удаляют металл с усадочной рыхлостью и включениями неметаллического характера в центральной части.

Круглая кованая заготовка идёт на производство труб особого применения среднего и большого диаметра, когда нет возможности получить катаную заготовку. Технологические характеристики кованой и катаной заготовок близки друг к другу.

На автоматических линиях раскатки, раскатных станах с 3-я валками используются кованые цельные заготовки из котельных, коррозионно- и жаростойких сталей, сплавов из титана диаметром 150 - 270 мм после обточки. На линиях с пилигримовым станом обрабатывают кованые заготовки после сверления и обточки из котельных сталей с наружным диаметром 380-650 мм и с внутренним – 100-120 мм.

Непрерывнолитые заготовки из углеродистых и легированных сталей идут на трубопрокатные заводы и агрегаты с прессовыми линиями. Обычно на таких агрегатах использовались катаная заготовка, слитки сифонной разливки. Доля непрерывно разлитого металла постоянно увеличивается, в том числе и на трубопрокатных заводах.

Для изготовления труб этим способом отливаются: круглые цельные заготовки диаметром 150-420 мм; с граненым профилем максимальным диаметром 560 мм; квадратным профилем – 170 x 170 – 360 x 360 мм; с прямоугольным профилем – 250 x 500 мм.

При этом наименее предпочтительны для трубопрокатного производства круглые непрерывнолитые заготовки, так как они в момент кристаллизации подвержены трещинообразованию. Тем не менее, они пригодны для формирования гильз с помощью прошивки. Заготовки с прямоугольными профилями предварительно прокатываются на заготовочном стане до диаметра 90-180 мм. Слитки с квадратными профилями прошивают на прессово-валковых станах или прессами.

Исследования в области прокатывания труб из круглых непрерывнолитых цельных и полых заготовок демонстрируют преимущество цельных заготовок. Они

обладают лучшим расходным фактором металла и имеют качественные показатели у большинства видов труб. Исследования касательно выбора вида заготовок при производстве трубной продукции продолжаются. Это обусловлено продолжением разработок по повышению качественных характеристик полых заготовок.

Бесшовные трубы изготавливают из большинства металлических материалов. В трубной индустрии используются стальные и чугунные сплавы железа, легкие, тяжелые цветные и тугоплавкие металлы. Для производства бесшовных труб в марочном сортаменте стальных горячекатаных труб преобладают низкоуглеродистые стали марок 10-45, Ст5, Ст6. Химический состав легированных и высоколегированных сталей имеет важное значение в трубопроизводстве горячекатаных труб: коррозионностойких, кислотостойких, нержавеющих, жаропрочных.

На трубопроизводство идут заготовки из стали, относящейся к категории "качественной", в которой содержится мало компонентов фосфора и серы. Соответствующее качество трубной стали достигается и малым количеством растворенных газов азота, водорода, кислорода. Кроме контроля содержания химических элементов, некоторые трубные марки стали дополнительно подвергают испытаниям на механические свойства, проводят контроль макро- и микроструктуры.

Первичным продуктом при получении бесшовных труб является, в основном, спокойная сталь. Этот вид стали отличается отсутствием пустот под поверхностным слоем заготовки, низким содержанием вредных компонентов. В производстве бесшовных труб менее ответственных функций применяют кипящую и полуспокойную сталь из-за значительной концентрации примесей, относительно большого количества пустот под поверхностным слоем.

Структура стальных слитков показана ниже (рисунок 1.1): спокойная (а) и кипящая (б) сталь.

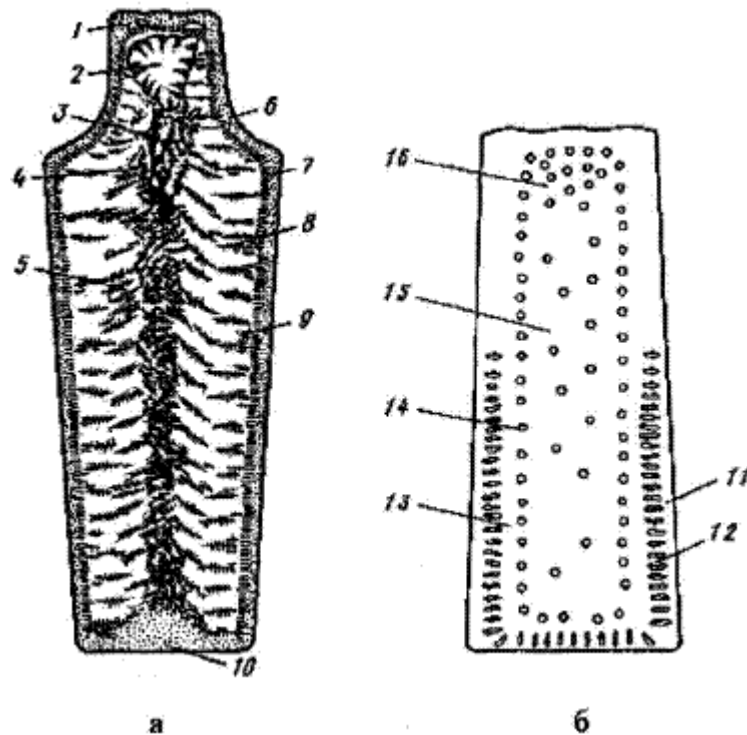


Рисунок 1.1 – Строение слитка спокойной (а) и кипящей (б) стали:

1 - мост металла над раковиной; 2 - усадочная раковина; 3 - усадочные пустоты; 4 - осевая усадочная рыхлость; 5 - зона беспорядочно ориентированных кристаллов; 6 - мелкие равноосные кристаллы; 7, 8- зоны столбчатых кристаллов; 9 - столбчатые кристаллы, направленные к тепловому центру; 10- конус осаждения; 11 - мелкие равноосные кристаллы (плотная корочка); 12 - сотовые пузыри; 13 - зона плотного металла; 14, 15 - вторичные пузыри; 16 - головная рыхлость

По данным литературного источника [46] структура заготовки из спокойной стали формируется следующим образом. При попадании в изложницу жидкой стали, выплавляемой по технологии получения спокойной стали (рисунок 1.1, а), на стенках и основании изложницы быстро образуется слой (толщиной 6-15 мм) мелких, хаотично ориентированных кристаллов, так называемая корочка. В дальнейшем теплоотвод идет медленнее, кристаллы растут перпендикулярно стенкам изложницы, увеличиваясь в размере. Образуется зона кристаллов в виде столбиков крупного размера (дендритов). Кристаллы растут, теплоотвод в центральных зонах слитка ослабевает, что способствует интенсивному росту кристаллов по разным

направлениям. В нижней зоне слитка образуется область разноориентированных кристаллов среднего размера. Эта область образуется при опускании кристаллов, образованных в жидкой стали, вниз, на основание, и при распаде растущих дендритов.

Вверху слитка образуется усадочная раковина, причиной появления которого является усадка стали при затвердевании. Это объясняется разностью плотностей металла в жидком и твердом состояниях. Усадка обычно равна 2-5%. В начальный момент застывания усадка идет в верхнем слое слитка. Образовавшийся верхний слой сжимается, отходит от стенок изложницы, а внутри слитка продолжает находиться жидкий металл. При увеличении толщины верхнего слоя уменьшается объем, что вызывает образование полости в последнем жидком слое металла. При разливке в изложницы с утепляющими надставками в последнюю очередь застывает металл вверху слитка. Там и образуется усадочная раковина, где концентрируются всплывающие неметаллические включения, частички шлака, газовые пузырьки. Прежде, чем прокатывать слиток, усадочная раковина вырезается.

Размер и глубина расположения усадочной раковины зависят от размеров слитка (поперечных и продольных). С нарастанием температуры разливки растет размер усадочной раковины.

Есть разные методики, способствующие сосредоточению усадочной раковины в верхней части слитка, уменьшению его размера, направленные на обогрев верхнего участка слитка. На изложницу ставят утепленные надставки; в верхний участок изложницы вставляют платы из керамзита, картона; засыпают верх слитка экзотермическими компонентами или теплоизоляционными составами в виде порошка. Это позволяет уменьшить верхний срез слитка и увеличить годность металла.

Рассмотрим структуру слитка из кипящей стали. Продольное сечение слитка кипящей стали представлено на рисунке 1.1, б. При контакте стали со стенками изложницы формируется тонкая, довольно плотная корочка (11). Корочка без пузырьков, так как они вытесняются в жидкую фазу металла, толщиной 3-40 мм. При

росте дендритов появляются пузырьки (12). Оси дендритов направлены перпендикулярно стенкам изложницы, между ними располагаются пузырьки СО, образующиеся при кипении стали. Одна их часть успевает всплыть, а образованные в момент формирования дендритов зажаты между их осями в виде вытянутой формы. Зона пузырьков имеет максимальной высоту  $2/3$  высоты слитка. Вверху слитка готовых пузырьков нет, так как газы успели выделиться из металла.

Можно прервать кипение стали в изложнице. Для этого накрывают изложницу массивной крышкой, добавляют в неё сверху раскислители, которые прерывают кипение, облегчают формирование пленки из твердого металла. Верхняя зона слитка «застывает», растет давление внутри него, выделение пузырей СО прекращено, и формируется область плотного металла (13). Металл в жидкой фазе насыщается углеродом и кислородом, и в менее благоприятных условиях начинают выделяться вторичные пузырьки СО. Пузырьки не могут подняться вверх, приобретая сферическую форму (14). Такие же пузырьки формируются в центре слитка (15). На верх слитка из-за загрязненности металла всплывают пузырьки, образуя рыхлый слой (16). Усадочное место слитка в кипящей стали не формируется. Оно распределяется по газовым пузырькам. В слитках из кипящей стали не наблюдается образования крупных кристаллов в виде столбиков, металл постоянно перемешивается поднимающимися пузырями СО. Кристаллическая структура этих слитков довольно однородна.

Важным признаком для получения хорошего качества проката из кипящей стали служит толщина корочки. При прокате корочка должна оставаться целостной, пузырьки не должны вскрываться. В противном случае окислится их внутренняя поверхность. При прокатке эта часть металла не раскатывается и идет в брак. Для того, чтобы увеличить толщину корочки, металл перед разливкой или при разливке окисляют добавлением в изложницу материалов, которые насыщают сталь кислородом. Тогда в начальный момент кипения стали более сильное, что способствует образованию более толстой корочки.

Кратко рассмотрим технологию производства трубных заготовок. Слитки используются для производства труб диаметром более 140 мм на пилигримовых прокатных агрегатах. Некоторые трудности появляются при изготовлении круглой катаной заготовки большого диаметра. Для труб используются слитки сечением круглого или многогранного профиля, с конусностью около 1 %, весом менее 3,5 т.

Разливка спокойной стали идет снизу сифоном или сверху в изложницы. Изложницы кверху расширяются и имеют нагревательные надставки. Кипящую сталь льют в изложницы с уширением книзу (рисунок 1.2).

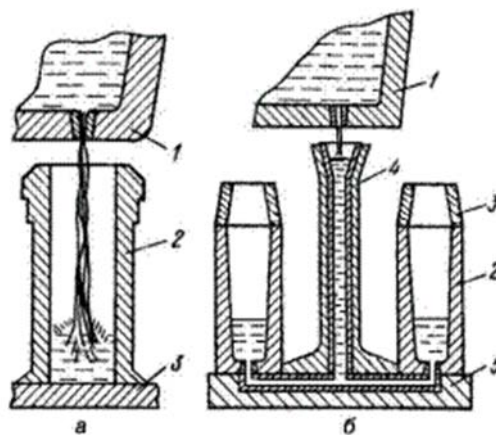


Рисунок 1.2 – Схемы разливки стали сверху (а), сифоном (б):  
1 - ковш; 2 - изложница; 3 - поддон; 4 - «центровая»; 5 - сифонный кирпич

Сверху сталь разливается из сталеразливочного ковша, или через промковш и воронки. При разливке сверху порция металла должна литься точно по центру мульты. В начале процесса металл льют медленно, не открывая стопор разливочного ковша полностью, чтобы металл, ударяясь об основание мульты, не разбрызгивался. Как только сформируется определенный слой жидкого металла («подушка»), разливку продолжают на рабочей скорости. Разливочная скорость связана с диаметром разливочного стакана. Скорость верхней разливки переменная – 0,3 - 1,0 м/мин.

При сифонной разливке основание изложницы также наполняется медленно. Далее скорость разливки увеличивается соответственно специфике поверхности

стали в изложнице. На поверхности металла практически всегда образуется окисленная корка, которая заворачивается по стенкам изложницы, снижая качество слитка.

Чтобы корка не заворачивалась, металл разливают так, чтобы между стенками изложницы и коркой образовывался слой жидкого металла. При разливке стали с повышенным количеством алюминия, титана и хрома избавиться от заворотов корки увеличением разливочной скорости не удастся.

Скорость разливки с помощью сифона обычно равна 0,15 - 0,6 м/мин. Наполнение тела слитков весом 1 - 13 т продолжается от 1,5 до 9 мин. После завершения наполнения слитка из спокойной стали верхний слой металла в утепленной надставке заполняют теплоизолирующими компонентами. Площадки с остывающими слитками выдерживают в разливочном пролете от 40 минут до 2 часов. Время выдержки зависит от сорта стали и веса слитка.

Основные дефекты слитков при разливке в изложницы: усадочные места на слитках спокойной стали, химическая неоднородность слитков, плены на поверхности. На качество слитка влияет ряд дефектов, которые образуются при заполнении сталью изложницы и при затвердевании. Рассмотрим наиболее существенные из них.

*Осевая рыхлость.* В осевой части слитка из спокойной стали обнаруживаются мелкие усадочные пустоты – осевая рыхлость.

При прокатке металла осевые поры завариваются не всегда. Это происходит обычно при производстве заготовок крупного профиля из-за малой степени обжатия. Осевая пористость определяется при контроле макроструктуры слитков. Если выявляется центральная пористость, металл не берут на изготовление деталей ответственного назначения.

Осевая рыхлость приводит к понижению температуры разливаемого металла; увеличению веса слитка; увеличению присутствия в стали компонентов, вызывающих усадку при затвердевании металла (углерода); росту числа элементов, увеличивающих вязкость жидкой стали (хром, титан).

Существует прямая зависимость между осевой рыхлостью и конусностью. Чем больше конусность, тем больше затвердевание верхнего слоя по сравнению с нижним. Поэтому конусность уменьшают до 2 - 4 %.

Можно уменьшить осевую пористость с помощью улучшения обогрева в верхней части слитка.

*Заворачивание корки.* Является наиболее частым дефектом на плоскости заготовки. Причинами дефекта являются окисление, охлаждение открытой поверхности жидкого материала в изложнице.

При сифонной разливке поверхность поднимающегося металла покрыта окислительной пленкой, которая образуется вследствие окисления кислородом составляющих компонентов стали. Металл затвердевает под пленкой, образуя вместе с ней корку. Эта корка поглощает все включения. Признаки формирования и роста корки следующие: заниженная температура при разливке стали; наличие в металле легко окисляющихся элементов; падение разливочной скорости.

Растущая корка покрывает поверхность металла, прикрепляясь к стенкам изложницы. Металл движется вверх, разрушает корку и заворачивает её. При контакте окислов корки с углеродом образуются неметаллические включения и появляются газовые пузырьки. При прокатке мест с завернувшейся коркой возникают разрывы и надломы. При разливке сталей с легкоокисляющимися элементами вся поверхность слитка может быть покрыта заворотами корки.

Плоскость слитков с заворотами корки необходимо зачищать перед прокаткой. В качестве защиты применяются абразивные круги. Защита наносится огневым методом, также может помочь обдирание на токарных станках, вырубка пневматическими молотками. Но такие методы зачисток осложняют производственные процессы, вызывают потери металла. Поэтому широко используются методы, защищающие поверхность жидкого металла в изложнице от окисления.

*Горячие поперечные трещины.* Наружные трещины образуются из-за загиба слитка в изложнице при кристаллизации. Если на стенках изложницы есть выбоины, углубления или между изложницей и надставкой есть зазор, то металл в

жидкой фракции попадает в эти выбоины и там застывает. В затвердевающем состоянии слиток увязает в этих местах, длина слитка становится меньше из-за усадки и под его весом корка может разорваться. Чтобы избежать дефекта, необходимо обеспечить плотное прилегание изложницы с надставкой.

*Продольные горячие трещины.* Если корка затвердевшего металла недостаточно прочная, то в момент кристаллизации слитка она может разрываться, и снаружи образуются продольные горячие трещины. Длина продольных трещин может быть от 1 м и больше, ширина – от 1 до 3 мм. Трещины возникают, когда происходит усадка корки затвердевшего металла, изложница расширяется, между изложницей и слитком возникает зазор. В стенках затвердевшей корки сосредотачивается жидкий металл. Тонкая корка не выдерживает сдавливания, позволяет образовываться трещинкам продольной формы, обычно, по углам слитка.

Продольные трещины могут быть и по краям слитка. Это происходит из-за неправильного распределения по центру потока жидкого металла при разливке сверху. Когда поток металла попадает в изложницу с отклонением от оси, он размывает корку затвердевшего слитка, которая не выдерживает и ломается.

Продольные трещины возникают из-за повышения температуры стали, высокой разливочной скорости. Из-за этого корка формируется и увеличивается медленно. Форма изложницы также влияет на образование корки. Слитки, которые отливают в изложницах круглой формы, имеют большее количество продольных трещин по сравнению со слитками, которые отливают в другие изложницы. Меньше всего продольных трещин образуется на слитках в прямоугольных формах с вогнутыми и волнистыми краями.

*Продольные холодные трещины.* Образование холодных наружных продольных трещин происходит по краям слитка при его охлаждении, когда температура опускается ниже 600 °С. Это случается при очень быстром охлаждении слитков из-за термических и фазовых напряжений. Для предотвращения возникновения трещин нужно медленно охлаждать слитки или помещать их горячими в нагревательные колодцы.

Возникновение холодных трещин более вероятно у сталей, легированных хромом, марганцем, кремнием. При наличии в стали больше 0,4 % углерода образуются холодные трещины.

*Подкорковые газовые пузыри* имеют место почти на самой поверхности в слитках спокойной стали.

Они могут появляться в связи с лишним слоем смазки в изложнице. Жидкий металл подается в изложницу, а смазка до его поступления не успевает выгорать, образующиеся при этом газы сосредотачиваются в затвердевающем металле.

Подкорковые пузырьки могут стать причиной образования во время прокатывания металла мелких тонких трещин – волосовин.

*Рослость слитка и внутренние газовые пузыри* – поражение слитков из спокойной стали. Возникновение дефекта вызывает повышение содержания водорода в стали. При затвердевании металла происходит выделение избыточного водорода, что способствует «росту» металла в изложнице и образованию пузырьков в слитке. Чаще это поражение происходит в слитках из кремнистой стали.

Наиболее характерными и распространенными дефектами заготовок, отлитых непрерывным методом, являются: дефекты поверхности (продольные трещины, шлаковые включения, газовые пузырьки, пояса и раковины); дефекты формы (кривизна и овальность); дефекты макроструктуры (осевая химическая неоднородность, центральная пористость, внутренние трещины и краевое точечное загрязнение).

По своему происхождению дефекты поверхности трубных и колесных заготовок делятся на: сталеплавильные: трещины, волосовины, рванины, неметаллические включения, завороты, плены, образующиеся вследствие неправильного нагрева; прокатные.

Обычно дефекты прокатного происхождения – это 20-30 % от всех дефектов. Таким образом, качество заготовки определяется дефектами слитков или непрерывнолитых заготовок, тщательностью их удаления.

К внутренним дефектам заготовок относятся: усадочная раковина, пористость, ликвационный квадрат, неметаллические включения, расслойка, подкорковые пузырьки, внутренние трещины и завороты корки.

## 1.2. Прокатка труб

Как упоминалось выше, в качестве заготовок для производства бесшовных труб применяются круглые и граненые слитки, а также катаные заготовки. Процесс прокатки состоит из следующих операций: прошивки отверстия в заготовке и прокатки прошитой заготовки[49]. Прошивка осуществляется на прошивочном стане. Прошивные станы по типу рабочих валков делятся на прошивные станы с бочкообразными валками, дисковыми валками и с грибовидными валками.

Валки прошивного стана расположены под углом  $9 - 14^\circ$  друг к другу (рисунок 1.3). Заготовка продавливается через оправку, а из-за растягивающих напряжений, создаваемых вращающимися валками, происходит течение металла от центра слитка и за счет этого происходит прошивка отверстия.

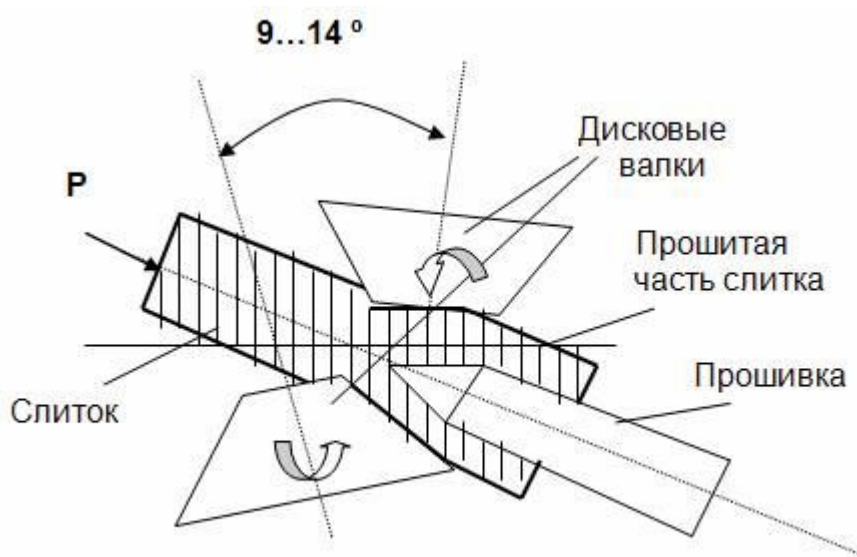


Рисунок 1.3 – Схема прошивки слитка трубной стали

Далее производится прокатка полученной гильзы на оправке, в результате чего уменьшаются внутренний и наружный диаметры и увеличивается длина заготовки (рисунок 1.4). Прокатку выполняют за 2 прохода с поворотом трубы на  $90^\circ$ . Получается труба диаметром свыше 57 мм. На третьем этапе дальнейшее уменьшение диаметров ведут в непрерывных станах уже без оправки.

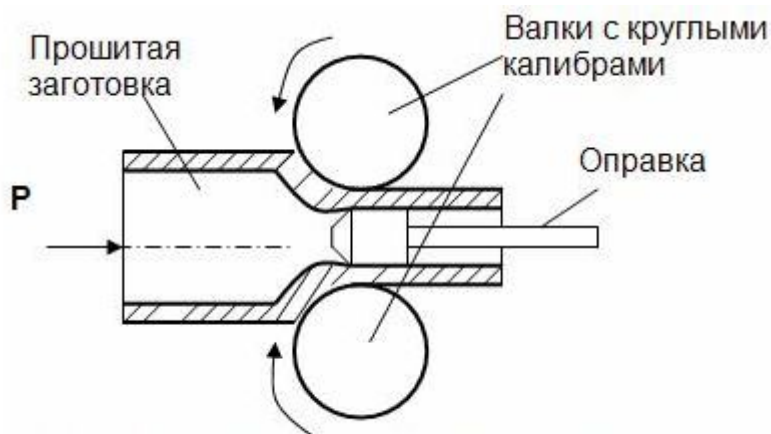


Рисунок 1.4 – Схема прокатки прошитой заготовки на оправке

Для сокращения диаметра труб после раскатных станов применяют продольную прокатку без оправки в редуционных станах, состоящих из ряда последовательно установленных двух-, трех- или четырехвалковых клетей. Станы позволяют изменить не только диаметр трубы, но и толщину стенки. На редуционных станах обычно прокатывают трубы диаметром 25 – 76 мм. Производство бесшовных труб производится на трубопрокатных агрегатах, представляющих собой комплекс машин и механизмов, предназначенных для получения бесшовных труб горячей прокаткой, их транспортирования, горячей и холодной отделки, складирования, упаковки и т. п. (рисунок 1.5). Таким образом, в состав трубопрокатного агрегата кроме прошивных, раскатных, редуционных (расширительных) станов, входят нагревательные печи, обкатные и калибровочные станы, правильные станы, трубообрезные и трубонарезные станки и другое оборудование, необходимое для выполнения предусмотренных технологических операций.

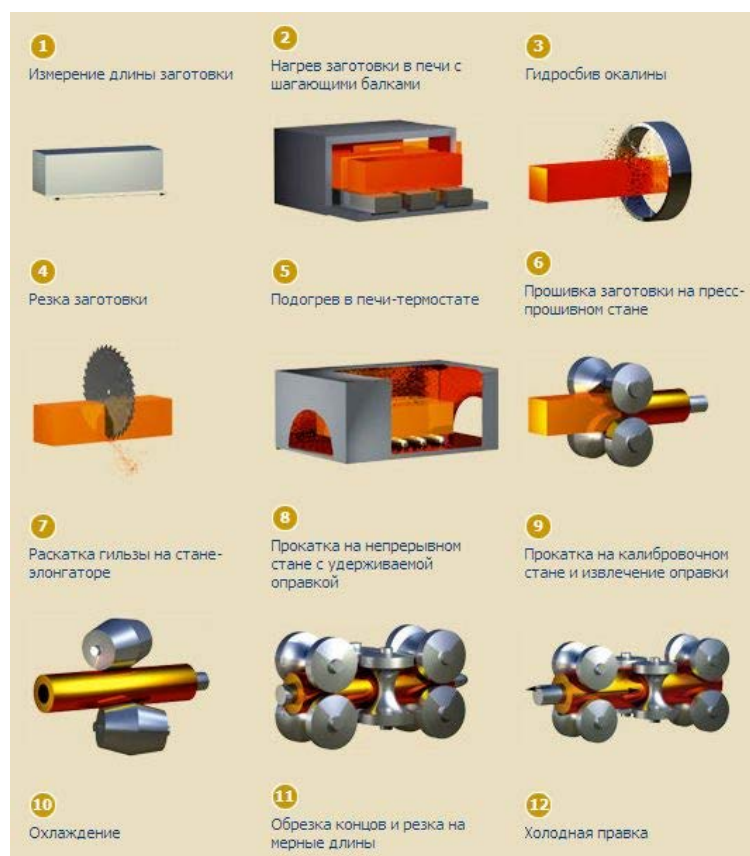


Рисунок 1.5 – Общая схема производства бесшовных труб

Исследования, которые были проведены в ФРГ, США, Японии и СССР, показали, что использование круглой литой заготовки по сравнению с использованием непрерывнолитых блюмов имеет определенные преимущества [54, 55]. Во-первых, поверхность круглой заготовки обладает более высоким качеством, чем квадратной (отсутствуют продольные и угловые трещины). Это непосредственно приводит к более высокому качеству труб, изготовленных из круглой заготовки. Во-вторых, повышенная плотность равноосной структуры в осевой зоне круглых заготовок обеспечивает снижение количества микродефектов, которые обычно образуются на внутренней поверхности трубы из-за наличия осевой пористости у квадратных заготовок.

### 1.3. Основные элементы технологии производства железнодорожных колес

В России производство железнодорожных штампованно-катаных колес организовано на ОАО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) [56] и ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (НТМК), в Украине – на ОАО «Интерпайп Нижнеднепровский трубопрокатный завод» (НТЗ) [57, 58]. На этих предприятиях освоен широкий сортамент цельнокатаных колес, которые отличаются как формой, так и размерами. Диаметры по кругу катания изготавливаемых колес находятся в диапазоне 700...1270 мм.

Наиболее широкое применение в Украине, России и других странах СНГ получили железнодорожные колеса с плоскоконическим диском, имеющие диаметр по кругу катания 957 мм. Конструкция и размеры цельнокатаных колес диаметром 957 мм определены ГОСТ 9036-88.

Колеса изготавливают из спокойной стали, полученной мартеновским, кислородно-конвертерным или электросталеплавильным способом.

На ОАО НТМК колеса изготавливают из непрерывнолитого металла собственного производства. Сталь выплавляют в конвертерах, обрабатывают на установке ковш-печь, подвергают циркуляционному вакуумированию и разливают на криволинейной МНЛЗ в кристаллизатор, имеющий диаметр 430 мм. Чтобы обеспечить замедленное охлаждение литых заготовок, их передают в колесопрокатный цех в вагонах-термосах. На заготовки металл режут пилами холодной резки[53].

Процесс непрерывного литья заготовок обеспечивает более высокую стабильность структурного состояния металла и уровня свойств в колесах одной партии. Практически, все ведущие зарубежные производители колес перешли на использование непрерывнолитых заготовок, имеющих диаметр 380...420 мм. За счет кристаллизации стали при высокой скорости охлаждения гарантируется изотропность материала для производства колес с минимальной неоднородностью физико-химических и эксплуатационных свойств.

Рассмотрим общую технологию производства колес.

Слитки поступают в колесопрокатный цех в открытых железнодорожных вагонах. Их разгрузка производится электромостовым краном, оборудованным электромагнитом. В процессе разгрузки слитки складировются в штабели поплавно.

Каждая поступившая в цех плавка подвергается входному контролю, который предусматривает: проверку наличия и правильности заполнения сертификата; проверку химического состава поступившего металла на соответствие стандарту; контроль геометрических параметров слитков.

Важным фактором, характеризующим полученные заготовки, является отношение высоты (H) исходной заготовки к ее диаметру (D), которое определяет уков и, соответственно, проработку литой структуры металла в процессе его горячей пластической деформации на прессах. У заготовок, которые используются для штамповки и прокатки колес  $\varnothing 957$  мм, это отношение намного меньше единицы ( $H/D=357/475=0,75$ ). Улучшить проработку литой структуры металла, увеличив это отношение, например, до единицы, можно путем перехода на уменьшенный до 420 мм диаметр исходных заготовок. Ведущие зарубежные производители колес широко используют такие заготовки.

Предварительная осадка на прессе силой 20 МН производится с целью уменьшения высоты и увеличения площади поперечного сечения заготовок. Осадку применяют для улучшения структуры и механических свойств металла заготовок, а также для уменьшения неравномерности свойств в осевом и радиальном направлениях.

После осадки заготовка убирается манипулятором из рабочей зоны прессы силой 20 МН. Для предупреждения разогрева и уменьшения износа обжимные плиты после удаления заготовки охлаждаются водой. Окалина с нижней плиты также удаляется водой.

По рольгангу заготовка подается к кантователю, установленному перед прессом силой 50 МН, и кантуется на  $180^\circ$ . Для более полного удаления вторичной окалины торцевые поверхности заготовки перед кантователем и после него подверга-

ются очистке металлическими щетками, после чего заготовка по рольгангу подается к прессу силой 50 МН. Операции деформации на прессе силой 50 МН производятся с целью регламентированного распределения металла между периферийной и центральной частями заготовки.

С пресса силой 50 МН заготовка убирающим переключателем перемещается на отводящий рольганг и транспортируется к формовочному прессу силой 100 МН. При этом она подвергается очистке от окалины металлическими щетками. Деформация заготовки на прессе силой 100 МН производится с целью получения отформованной заготовки с окончательными размерами ступицы и прилегающей к ней части диска, а также подготовки обода и прилегающей к нему части диска для последующей прокатки на колесопркатном стане. Поверхность катаной части диска колеса должна быть ровной, с плавным изменением толщины диска. Переход от штампованной части диска к катаной должен быть плавным. В месте перехода допускается уступ не более 2 мм.

После деформации на прессе силой 35 МН производится проверка основных размеров колес в горячем состоянии и контроль качества их поверхности. Контрольному обмеру подвергаются не менее 10% всех колес. Использование мощных прессов в сочетании с прокаткой обеспечивает высокую точность геометрических параметров колес любых типов.

В дальнейшем колеса по отводящему рольгангу подаются к навешивателям, которыми помещаются на крюки грузонесущей части конвейера камер регулируемого охлаждения колес. При выходе из камер колеса снимаются с крюкового конвейера с помощью снимателя, укладываются на транспортный рольганг и передаются к навешивателям, которыми помещаются на крюки конвейеров изотермических печей. Температура на входе в изотермические печи находится в пределах 400...600°C, а температура в отапливаемых зонах изотермических печей 600...650°C. Время изотермической выдержки при производстве колес Ø957 мм не менее 3 часов.

Колеса, прошедшие противфлоккенную обработку, снимаются с крюкового

конвейера с помощью снимателя, укладываются на транспортный рольганг и передаются к штабелерам. Из штабелеров колеса электромостовым краном стопами транспортируются на промежуточный склад. С промежуточного склада колеса электромостовыми кранами строго поплавно подаются в разборщик стенов черного осмотра и по одному поступают на конвейер.

В процессе продвижения колес по конвейеру стенов контролируются геометрические параметры, и визуально, производится оценка качества поверхности с наружной и внутренней стороны колес. После обмера и осмотра годные, требующие ремонта и отбракованные колеса штабелируются отдельно.

Прошедшие осмотр на черновых стендах и отремонтированные колеса поплавно задаются в линию предварительной механической обработки. После механической обработки колеса подвергаются обмазке специальным раствором для термохимической защиты от образования окалины и подаются на промежуточные стенды для проверки геометрических параметров и наличия дефектов. После осмотра и обмера колеса передаются к штабелерам, где штабелируются стопами и электромостовым краном складываются на промежуточном складе перед кольцевыми нагревательными печами, в которых выполняют нагрев колес под закалку до температуры 840...900°C.

Колесо, нагретое в кольцевой нагревательной печи, выгрузочной машиной укладывается на тележку толкателя, которая подает колесо на приемный стол в зону действия загрузочного манипулятора. Манипулятор, перемещаясь вдоль линии закалочных машин, осуществляет их загрузку в автоматическом режиме. Количество работающих закалочных машин выбирается автоматически в зависимости от продолжительности охлаждения колес и в соответствии с темпом их выдачи из кольцевой нагревательной печи.

После отпуска колеса проходят камеру замедленного охлаждения, затем снимаются с крюков, штабелируются в стопы и электромостовыми кранами укладываются на промежуточном складе. Колеса по мере остывания стопами поплавно со склада передаются электромостовым краном на линию станков для окончательной

механической обработки колес.

После окончательной приемки годные колеса наружной стороной вверх укладываются на стеллажи и с них электромостовым краном передаются на участок дробеструйного упрочнения дисков колес. Колеса загружаются в разборщик стоп и по одному подаются на шаговый конвейер.

После осмотра и приемки на колесо наносится антикоррозийная защита, после чего осуществляется упаковка колес в стопы на складе готовой продукции или же складирование для дальнейшей отгрузки потребителю.

#### 1.4. Требования к программному обеспечению для математического моделирования.

Проведение вычислительного эксперимента в машиностроительных, металлургических и энергетических отраслях промышленности, как правило, связано с решением разнообразных задач математической физики, таких как задачи гидро- или газодинамики, распространения тепла, переноса частиц и др. Формально каждая из таких задач описывается сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (или интегральных, или интегро-дифференциальных уравнений), в которой выражается связь известных и искомых величин (давление, плотность, температура, скорость вещества и др.) в координатах пространство – время.

Важно подчеркнуть, что особенно для такого типа вычислительного эксперимента, всегда существует некоторая возможность варьирования в постановках задач, определяемая множеством переменных значений параметров и конструкций выражений (подвыражений), входящих в запись основной системы уравнений (например, правых частей), множеством уравнений состояния, граничных условий, а также начальных значений основных величин и др.

Существуют различные численные методы решения задач математической физики. Применение того или иного метода приводит к алгоритму решения соот-

ветствующей системы уравнений. И здесь необходимо отметить существование некоторой так называемой вариабельности в конструкциях алгоритмов, которая определяется множеством переменных значений различных факторов, влияющих на алгоритм. Например, для разностных методов – это различные типы расчетных сеток, различные разностные схемы, способы интерполяций, методы решения систем алгебраических уравнений и др.

Множество требований к сервису задачи, идущих от исследователя, производящего вычислительный эксперимент, также образует соответствующую вариабельность. Она определяется в основном многообразием способов, форм и режимов задания исходной и представления результатной информации, т. е. многообразием методов взаимодействия человека и задачи.

Таким образом, при формировании расширенного понятия задачи, связанного с ее решением на ЭВМ (особенно многофакторных задач, которые имеют место в литейных технологиях), существуют факторы, вносящие определенную вариабельность в это понятие. Если каждый фактор связать с координатой и на осях отложить диапазоны вариабельности, то получим пространство вариабельности задачи в расширенном понятии. Очевидно, что каждая точка такого пространства есть полностью конкретизированная задача, которую будем называть вариантом. Таким образом, задача есть множество вариантов.

Перейдем к рассмотрению различных общих подходов к построению программного обеспечения для решения задач математической физики.

Первый подход – это создание единой программы, обеспечивающей полное решение какой-либо одной задачи, т. е. решение любого варианта этой задачи. Это традиционный подход, широко применявшийся ранее и применяющийся в настоящее время. Таким способом создавались в основном большие программы математической физики.

Необходимо заметить, что этот подход реально существует только в пределах определенного ограничения сверху объема пространства вариабельности задачи. Это допустимо, когда объем и сложность программного обеспечения и связанные

с ними объем, и сложность разработки, и познания, эксплуатации, сопровождения и развития, позволяют представить это программное обеспечение в рамках единой программы.

Тенденция к усложнению задач для проведения вычислительного эксперимента, о которой говорилось выше, приводит к превышению допустимого объема пространства вариабельности. При этом объем и сложность программного обеспечения становятся настолько большими, что резко увеличиваются трудности (вплоть до принципиальной невозможности) представления этого программного обеспечения в виде единой программы. В этих условиях применяется другой подход, который состоит в создании множества программ, каждая из которых отвечает какой-то части «пространства вариабельности» задачи, при этом объединение всех подобных частей представляет это пространство. Объем каждой части в этом случае не должен превосходить допустимого предела, тогда разработка программ будет осуществляться в условиях первого пути.

Таким образом, может быть решена проблема сложности при создании программного обеспечения больших задач математической физики.

Описанные подходы к созданию прикладного программного обеспечения вычислительного эксперимента, не предполагают никаких специальных средств системного программного обеспечения, и могут быть реализованы на базе штатных систем общего программного обеспечения ЭВМ.

Дальнейшим развитием подхода к созданию прикладных программ явился подход, основанный на модульном принципе.

Он заключается в следующем:

1. Глубокий и детальный анализ пространства вариабельности задачи (а именно, анализ физико-математического описания задачи, алгоритма ее решения, требований к сервису и др.) для разложения расширенного понятия задачи на базовые части (каждая из которых свободна или почти свободна от вариабельности) такие, чтобы объединение этих частей совпадало со всем пространством вариабельности задачи.

В качестве примеров таких частей, которые будем называть функциональными модулями, можно привести способы вычисления текущего шага по времени, способы вычисления коэффициентов разностных уравнений, методы решения систем алгебраических уравнений, различные уравнения состояния, граничные условия, функции источников, методы интерполяции, вычисления интегралов, трансляторы с языков задания исходных данных, генераторы различных форм выдачи результатов и др.;

2. Реализация каждой полученной части в виде программного модуля, т.е. программы, представленной так, что она могла использоваться в контекстах разных программ;

3. Формирование (конструирование) требуемой программы или множества программ из программных модулей.

Следует подчеркнуть, что модульный подход сочетает в себе возможности первого и второго подходов, описанных выше, т. е. таким путем на основе фиксированной совокупности модулей можно построить как достаточно сложную единую программу, так и множество более простых программ, функционально эквивалентных в сумме этой одной программе.

#### 1.5. Анализ пакетов прикладных программ для решения задач аэродинамики и теплообмена

В настоящее время в различных отраслях, в частности в металлургии, всё чаще применяют системы моделирования, экономичность затрат при использовании которых очевидна по сравнению с опытными исследованиями. Одной из таких систем является система автоматизированного моделирования «ПОЛИГОН» [59–62]. Эта система позволяет провести отработку некоторых наиболее важных технологических параметров не на реальной отливке, а на ее компьютерной модели.

Программа «ПОЛИГОН» предназначена для моделирования литейных процессов. При этом численными методами моделируются: гидродинамические процессы при заливке; тепловые процессы при затвердевании; процессы образования

макро- и микропористости; процессы образования усадочных раковин.

Одним из основных вопросов моделирования литейных процессов является решение задачи литья и затвердевания отливки. Точность решения такой задачи является критерием качества изготавливаемой детали. Программа предназначена для расчета гидродинамических процессов в отливках сложной конфигурации, в которых сложная форма может являться причиной торможения конвективных потоков. Это свидетельствует о незначительном влиянии гидродинамики на теплоперенос и кинетику затвердевания. В тоже время, в слитках, особенно крупных, вклад гидродинамики является определяющим как в период наполнения, так и формирования слитка [63–66].

В настоящее время, к сожалению, приходится констатировать, что в большинстве моделирующих систем задача усадки решается на основе крайне упрощенных моделей, которые не соответствуют современным возможностям численного моделирования. Практически можно считать, что ни в одной системе моделирования ЛП, кроме САМ ЛП “Полигон”, задача усадки не решается на основе современных физических моделей. Чаще всего под расчетом усадочных дефектов в таких системах подразумевают обработку тепловых полей по относительно простым критериям типа критерия Наямы или, в лучшем случае, проводят упрощенный расчет макропористости или раковин без учета фильтрационных процессов и сложной структурированности двухфазной зоны. Таким образом, основной вид литейных дефектов (микро- и макропористость, раковины) большинство современных литейных систем не моделируют. Кроме того, при анализе моделирующих систем большинство авторов сравнительных обзоров даже не упоминают об отсутствии в них адекватного численного моделирования усадочных процессов, предпочитая упомянуть о “тепловом расчете с учетом усадки”, не раскрывая отсутствие моделирования фильтрационно-усадочных процессов при затвердевании. В связи с этим, обсуждение принципов моделирования усадочных процессов представляется необходимым.

При моделировании питания отливки необходимо учитывать, как минимум два различных механизма образования усадочных дефектов. По 1-му механизму образуются макропористость и раковины, по 2-му микропористость [65]. В данном случае эти виды пористости разделены не по величине пористости, а по механизму образования, который, в свою очередь, и определяет предельный уровень пористости. Например, микропористость не может быть много больше объемной усадки при затвердевании, которая обычно составляет 3...5%, а макропористость может достичь 10...30% и в пределе образовать концентрированную раковину (100% пористости). Представим общую характеристику этих механизмов, а затем рассмотрим принципы моделирования каждого механизма.

Макропористость образуется при недостатке питания (отсутствии необходимого объема металла для компенсации усадки) выше зеркала расплава или его условного эквивалента в двухфазной зоне (поскольку объединение условного зеркала в двухфазной зоне и реального зеркала жидкой зоны геометрически может представлять собой единую поверхность, в дальнейшем это объединение будем называть “зеркалом”). Таким образом, для расчета макропористости необходимо решать задачу возникновения и движения зеркал расплава.

Перемещение зеркал обусловлено объемной усадкой, а их возникновение происходит из-за формирования при затвердевании изолированных друг от друга объемов, а также из-за возникающей изоляции от внешней “подпитки”, что характерно для специальных способов литья типа ЛНД. Другими словами, область формирования макропористости – это суммарный объем, который занимают все зеркала в процессе своего движения, законы движения и возникновения которых будут рассмотрены ниже.

В зависимости от доли жидкого металла и “структурированности” той области, которая находится выше зеркала, пористость образуется либо по принципу “вытекания” жидкого металла, либо по принципу усадки при полном отсутствии компенсации. В тех областях, где происходит “вытекание”, пористость может до-

стичь больших значений – вплоть до 100%, то есть образовать раковину. Такая модель – классическая для образования раковины [67–69]. В описанной выше модификации эта модель лишь более подробно рассматривает двухфазную область, предполагая, что между жидкой и твердой фазами есть промежуточные состояния, в которых поведение металла зависит от его “структурированности”, что и позволяет применить ее для образования рыхлости (макропористости).

Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала (то есть в области потенциально достаточного питания). Давление в глубине зоны с формально хорошими условиями питания падает из-за суммарной объемной усадки, фильтрационного (затрудненного) характера движения жидкой части металла в двухфазной зоне, изоляции от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления, где внешнее давление – атмосферное – для обычных способов литья и повышенное или пониженное – для специальных [70].

Наиболее адекватное описание распределения давления, видимо, дает решение дифференциального уравнения фильтрационного течения [71]. При падении давления ниже некоторого критического значения  $p_0$  возникают условия для появления поверхности раздела и формирования “зародыша” микропоры, который далее будет расти в соответствии с объемной усадкой. Очевидно, что окончательный объем микропоры будет равен объемной усадке оставшейся жидкой части, то есть пористость формируется по принципу усадки при полном отсутствии компенсации. Значение такой пористости не может быть больше значения суммарной объемной усадки.

Под критическим давлением  $p_0$  можно подразумевать разные величины. С одной стороны, можно считать, что это парциальное давление растворенных газов. Тогда, при падении давления ниже  $p_0$  газ выделяется в виде газового пузырька, что соответствует, например, водородной пористости в Al-сплавах. С другой стороны, можно принять, что критическое давление – это эффективная прочность жидкого расплава на разрыв, тогда образование пористости формально не связано с газоделиением, и вопрос о том, что в порах – вакуум или газ, остается открытым.

Описанная модель образования микропористости фактически универсальна, и ее можно успешно использовать при разных представлениях о потенциальных причинах формирования микропористости. Таким образом, эту модель в определенной степени также можно считать классической [70, 72, 73].

В настоящее время для разработки литейных технологий нередко применяют различные системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП). Эти системы используют различные численные методы, математические алгоритмы и физические модели, имеющие разную адекватность решения. Однако, зачастую даже специалисты по различным аспектам моделирования очень поверхностно представляют себе особенности физики ЛП и связанную с этим специфику различных численных методов. Можно встретить публикации, где авторы, претендующие на знание основ моделирования ЛП, распространяют странные и даже ложные представления о численных методах и особенностях физики ЛП. Это затрудняет пользователям выбор и эффективное использование СКМ ЛП с учетом их специфики.

Большинство ЛП так или иначе определяется тепловыми процессами. Основными особенностями тепловой задачи в литейной постановке является неравномерное тепловыделение в интервале затвердевания и условия теплопередачи между отливкой и формой [74].

Известна компьютерная система моделирования тепловых и гидродинамических процессов литья, созданная в лаборатории математического моделирования Удмурдского Государственного Университета г. Ижевск – LVMFlow [75].

В основу LVMFlow положен метод контролируемого объема Control Volume (CVM). CVM предполагает точный учет балансовых условий, в результате чего разностная сетка дополняется набором геометрических характеристик, описывающих истинный объем материала в ячейке сетки, который не равен объему просто кубика (как было в конечных разностях) и площади соприкасающихся материалов в каждой ячейке.

За счет введения более плавной (по сравнению с методом конечных элементов) границы, учитывающей геометрию отливки, решается проблема с постановкой граничных условий в гидродинамике и расчете напряжений.

Программа позволяет промоделировать следующие процессы: заполнение формы металлом; расчет температурных полей; расчет поля жидкой фазы; расчет сегрегации (химическая неоднородность); расчет дефектов; расчет напряжений и деформаций; каналы охлаждения; работа фильтров; учет многократного использования формы.

Недостаток перечисленных программ в том, что они не учитывают процессы гидродинамики, которые, особенно в крупных слитках, могут привести к диффузному разливанию разливаемого металла в стенки изложницы. Кроме того, в период затвердевания интенсивные гидродинамические потоки приводят к искажению фронта затвердевания, и его продвижение становится не перпендикулярным стенкам изложницы, а под определенным углом. Это объясняется тем, что вынесенный восходящими потоками из центра расплава горячий металл подплавляет твердую корочку в верхней части изложницы. Опускаясь вниз, поток металла охлаждается и способствует интенсивному нарастанию твердой корочки.

Таким образом, чем интенсивней перемешивание расплава, тем более интенсивно растет твердая корочка в нижней части изложницы [76]. К сожалению, этот чрезвычайно важный эффект, приводящий к неравномерному росту твердой корочки и неоднородности распределения термических напряжений практически не учитывается рассмотренными пакетами.

#### 1.6. Сравнительный анализ математического обеспечения для моделирования задач тепломассопереноса при затвердевании слитков

Следующие классификационные признаки подчеркивают специфику отдельных систем автоматизированного моделирования (таблица 1.1) [77–81].

Таблица 1.1 – Специфика отдельных систем автоматизированного моделирования

| Наименование                  | Назначение  |       | Уровень функциональных возможностей |         | Методы решения уравнений математической физики |                        |                      | Ориентация на моделирование    |                                       |
|-------------------------------|-------------|-------|-------------------------------------|---------|------------------------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
|                               | Специальное | Общее | Средний                             | Высокий | Конечные разности (КР)                         | Конечные элементы (КЭ) | Конечные объемы (КО) | Отдельных физических процессов | Вариантов литейной технологии в целом |
| WinCast (ФРГ) [16]            | +           |       | +                                   |         |                                                | +                      |                      | +                              |                                       |
| MAGMASoft (ФРГ) [19]          | +           |       |                                     | +       | +                                              |                        |                      |                                | +                                     |
| ProCast (США, Швейцария) [20] | +           |       |                                     | +       |                                                | +                      |                      | +                              |                                       |
| Poligon (Россия) [17]         | +           |       | +                                   |         |                                                | +                      |                      | +                              |                                       |
| LVMFlow (Россия) [18]         | +           |       | +                                   |         | +                                              |                        |                      | +                              |                                       |
| FLOW-3D (США) [21]            |             | +     |                                     | +       |                                                |                        | +                    | +                              |                                       |

Некоторые задачи, например, расчет температурных полей в системе «отливка-форма», в САМ ЛП давно и успешно решаются. Некоторые задачи (кинетика кристаллизации, оптимизация и др.) только начинают внедряться. Другие, будучи внедрены ранее (гидродинамика, напряженно-деформированное состояние), имеют высокий потенциал развития из-за сложности самой задачи, недостатка знаний об определенных свойствах материалов и высоких требований к вычислительным системам. В этих направлениях идет наиболее интенсивное развитие САМ ЛП [1].

Следует отметить, что можно использовать вычислительные пакеты общего профиля, которые в том числе позволяют моделировать процессы переноса, – такие как ANSYS и COMSOL Multiphysics.

**ANSYS** представляет собой конечно-элементный пакет, включающий в себя целое семейство специализированных подсистем для решения в единой среде широкого спектра инженерных задач [82, 83].

Решать задачи теплообмена позволяют компоненты ANSYS/Multi physics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Professional и ANSYS /FLOTTRAN. Основой теплового анализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, основанное на законе сохранения энергии.

Конечно-элементное решение, получаемое с помощью ANSYSa, определяет температуры в узлах, которые затем используются для получения других тепловых величин.

Программа ANSYS позволяет рассчитывать все три вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и лучистый теплообмен.

ANSYS поддерживает два типа теплового анализа: стационарный и нестационарный.

**COMSOL Multiphysics** - это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов [84, 85]. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и т.п.

Для решения задач тепломассопереноса предусмотрены три основных физических раздела Heat Transfer [Теплоперенос], Diffusion [Диффузия] и, в составе мультифизической модели, Fluid Dynamics [Гидродинамика]. Раздел Fluid Dynamics использует уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Раздел Heat Transfer включает в себя, кроме подраздела Conduction [Кондукция], подраздел Convection and Conduction [Конвекция и кондукция], который отличается тем, что кроме теплофизических свойств, можно задать поле скоростей теплоносителя.

Раздел Diffusion тоже состоит из двух подразделов: Diffusion [Диффузия] и Convection and Diffusion [Конвекция и диффузия]. Один из модулей расширения General Heat Transfer [Общий теплоперенос] включает в себя объединенные с излучением, конвекцию и кондукцию, а так же такие разделы как Thin Conductive Layer – тонкий теплопроводный слой, Non-Isothermal Flow – неизотермический поток.

Таким образом, мы убедились, что существует достаточное количество расчетных пакетов, позволяющих учитывать процессы переноса и которые можно использовать для моделирования тепломассопереноса в затвердевающей слитке. Однако все описанные системы основаны на определенных шаблонах для моделирования и очень небольшое количество классов задач может похвастаться тем, что хорошо отработаны как разные варианты их постановки, так и методы расчета. Использование универсальных расчетных пакетов также не всегда оправдано, т.к. сложно представить, что среднестатистический инженер будет настолько хорошо подготовлен в вузе и успеет накопить опыт для решения сложнейших задач гидродинамики, где даже у профессионалов инженерного анализа интуиция нарабатывается годами. А сколько времени надо будет потратить на исследования новой области и построение расчетных моделей различной сложности, чтобы подготовить шаблоны для моделирования и на их основе сделать массовый инструмент под конструктора-универсала?

### 1.7. Выводы по разделу 1

Проведенный анализ литературных источников позволяет охарактеризовать современное состояние способов производства стальных труб и железнодорожных колес следующим образом.

Несмотря на то, что доля заготовок, получаемых с помощью непрерывной разливки, постоянно растет, разливка стали в изложницы в ближайшие годы все еще будет осуществляться. Это вызвано необходимостью привлечения существенных капиталовложений для внедрения МНЛЗ и реконструкции сталеразливочных пролетов сталеплавильных цехов, а также существованием достаточно широкого

круга потребителей, нужды которых можно удовлетворить только традиционной разливкой (например, непрерывное литье затруднено при получении круглых слитков диаметром до 50 см.).

Для успешного ведения технологических процессов, применяемых в изготовлении бесшовных труб и железнодорожных колес, требуются весьма высокие качественные характеристики поверхности исходной заготовки. При этом даже незначительные изменения в технологии приводят к изменению формы слитка, массы, относительного объема металла в прибыльной части слитка, к изменению условий кристаллизации головной части слитка, его теплового баланса. Это отражается на перераспределении внутренних дефектов в слитке, в том числе усадочного происхождения. Актуальной является возможность уменьшения времени освобождения слитка из изложницы, что позволит увеличить количество плавов, не повлияв на качество слитка, и тем самым, повысить ресурсо- и энергосбережение при производстве слитков трубной и колесной стали.

На основании аналитического обзора становится ясным, что большинство современных расчетных пакетов требуют специальных знаний в области математического моделирования и компьютерных технологий, выходящих за пределы инженерных знаний специалиста-литейщика.

Остаются востребованными программы, разработанные с помощью традиционных средств программирования, которые обладают удобным для конечного пользователя интерфейсом и не требовательны к ресурсам компьютера. При этом это программное обеспечение для своей работы не должно требовать установки дополнительного программного окружения и может являться составной частью информационной системы предприятия.

Также необходима разработка библиотек-конструкторов, которые позволяют «собрать» пакет прикладных программ в максимально короткие сроки, имеющие удобные и понятные разработчику рекомендации и не требующих углубленных знаний в области программирования.

Таким образом, разработка энергоресурсосберегающих технологий производства высоких цилиндрических стальных слитков, в том числе включающих в себя программные комплексы, позволяющие проектировать удобные потоки входных и выходных данных для технологов на производстве является необходимой и своевременной.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ СЛИТОК – СТЕНКА ИЗЛОЖНИЦЫ – ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

При моделировании процессов разливки, формирования и внепечной обработки металла необходимо учитывать не только теплофизические, но и гидродинамические и массообменные процессы. Выбор той или иной модели, учитывающей как гидродинамику, теплофизику так и массообменные процессы определяются рядом критериев. На этапах разливки металла в большие объемы (ковш, литейная форма, изложница, кристаллизатор) и дальнейшем его затвердевании на качество получаемых слитков и отливок определяющее влияние оказывают гидродинамические процессы. Значения чисел Рейнольдса ( $Re$ ) [86] при этом соответствует турбулентным режимам течения расплава (так при разливке стали в изложницу со скоростью 1-4 м/с число  $Re = 50000 - 200000$  [87]). Кроме того, в период разливки истекающая из ковша струя, захватывает определенное количество газа, что приводит к дополнительной турбулентности потоков. Поэтому в этой ситуации крайне необходим учет турбулентности. Для исследования процессов гидродинамики расплава, заливаемого в изложницу, выбраны две основные схемы движения металла: разливка сифоном и разливка сверху.

Вместе с тем, существуют такие режимы, когда влияние теплофизики не значительное. Например, разливка металла в двухручьевые промковши, размеры которого не способствуют образованию застойных зон, где возможно даже затвердевание металла. Определение аэродинамики воздуха при сливе чугуна из емкости в емкость. При задачах такого плана вязкостные процессы значительно преобладают над тепловыми.

При формировании высоких тонких слитков (слитки трубной и колесной стали) время активного гидродинамического процесса составляет 20 – 30% от времени всего формирования слитка (например, для 5 тонного 3-х метрового слитка

колесной стали КП-2 время формирования от разливки до освобождения от изложницы составляет 3,5 – 4 часа). Таким образом, при исследовании такого объекта сопряженную задачу гидродинамики и теплофизики решают порядка 1,5 часов реального времени. Остальные 2 – 2,5 часа решаются только с помощью уравнения теплопереноса.

## 2.1. Математическая модель процессов переноса

Для описания процессов переноса импульса, тепла и массы в расплаве донецкой школой моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических процессах [3–5] предложена математическая модель, состоящая из уравнений движения, неразрывности, переноса тепла и массы, газовой фазы, турбулентной кинетической энергии ( $k$ ), скорости ее диссипации ( $\varepsilon$ ), а также уравнения для доли твердой фазы  $\xi$  [88]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \nabla \nu_s \nabla \vec{V} + \vec{g} \beta_T (T - T_0) + \vec{g} \beta_D (C - C_0) + f_v + \frac{3}{8} \frac{\beta \xi (V_{zz} - V_{\text{mz}})^2}{R_0} - \frac{1}{\rho} \nabla p; \quad (2.1)$$

$$\rho c \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) T \right] = \nabla \lambda_s \nabla T; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) C = \nabla D_s \nabla C; \quad (2.3)$$

$$\nabla \vec{V} = 0; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{V}_e \cdot \text{grad} \beta = f_\beta; \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) k = \nabla \nu_s \nabla k + G - \vec{g} \beta_T (T - T_0) - \vec{g} \beta_T (C - C_0) - \varepsilon; \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \varepsilon = \nabla \nu_s \nabla \varepsilon + C_1 \nu G - \frac{\varepsilon}{k} \frac{\nu_t}{\sigma_t} \vec{g} \beta_T (T - T_0) - \varepsilon^2 / k; \quad (2.7)$$

$$\xi(y) = 1 - \left( 1 + \frac{c}{W} (T_l - T_s) \right) \left[ 1 - \left( \frac{T_l - T}{T_l - T_s} \right)^{2/3} \right] + \frac{c}{W} (T_l - T_s), \quad (2.8)$$

где  $\vec{V}$  - скорость расплава,  $\nu_3$  - эффективная,  $\nu$  - кинематическая,  $\nu_t = k^2 / \varepsilon$  - турбулентная вязкости;  $\beta_T$ ,  $\beta_D$  - тепловой и диффузионный коэффициенты объемного расширения;  $C$  – концентрация примеси (углерода),  $C_T$  - концентрация газовой фазы:  $\lambda_3 = \lambda + \lambda_t$  - эффективная,  $\lambda$  молекулярная и  $\lambda_t = \nu_t / 0,9$  - турбулентная теплопроводности;  $G$  - диссипативный член;  $T_0$ ,  $T_L$  - температуры начальная и ликвидус;  $k$  - турбулентная энергия,  $\varepsilon$  - скорость диссипации турбулентной энергии,  $\beta$  - содержание газовой фазы.

При определении источникового члена  $f_\beta$  допускается, что, попадая в металл со струей, газ дробится на пузырьки одинакового радиуса и это происходит в области объемом  $V_\beta$ . Тогда в точках, принадлежащих области  $V_\beta$ :

$$f_\beta = \frac{Q_V}{\rho_g \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot V_\beta},$$

здесь  $Q_V$  – объемный расход газа,  $R_0$  – начальный радиус пузырька,  $V_\beta$  - скорость движения газовой фазы. В точках, не принадлежащих  $V_\beta$ ,  $f_\beta = 0$ .

Источниковый член, позволяющий учитывать разность скоростей жидкой  $V_{ма}$  и газовой фаз  $V_{zz}$  в уравнении Навье - Стокса определяется следующим образом [89]:

$$f_v = \frac{3}{8} \frac{\beta \xi (V_{zz} - V_{мz})^2}{R_0}.$$

Математическая модель базируется на принципах макроконтинуальной механики многофазных сред и теории квазиравновесной двухфазной зоны [89, 90]. Модель учитывает турбулентность, газозахват расплавом (в период наполнения изложницы и литейных форм), тепловую и смешанную конвекцию. Система уравнений (2.1- 2.8) дополняется краевыми условиями. Следует отметить, что представленная модель турбулентности не всегда оправдана. Для некоторых видов течения она может существенно упрощаться до алгебраической.

## 2.2. Выбор модели турбулентности

При больших скоростях наполнения объемов (ковшей, изложниц), а также перепадах температур, движение расплава нарушается и приобретает нестационарный пульсационный характер. Численно этот процесс может быть описан уравнением Навье-Стокса. Но, поскольку многие важные свойства турбулентных течений характеризуются очень малыми линейными масштабами, любые методы численного решения уравнения Навье-Стокса будут требовать чрезмерных затрат машинного времени и объемов памяти [91].

Невозможность применения аналитических методов при описании турбулентного движения жидкости оправдывает использование численных методик, построенных на основании полуэмпирических теорий замыкания. Однако можно выделить несколько основных причин, затрудняющих использование численных методов при расчете турбулентности:

1. чрезмерно большие затраты машинного времени и памяти при расчете уравнений движения;
2. трудности и неопределенности, связанные с численной интерпретацией граничных условий;
3. отсутствие достаточно точных и универсальных методов описания турбулентного переноса [92, 93].

При численном расчете возможно построение нескольких моделей турбулентности:

модель длины смешения Прандтля, в которой турбулентность выражена в виде некоторых полуэмпирических зависимостей [94, 95];

$k$ - $\varepsilon$  - модель, получившая особую распространенность при расчете как отрывных, так и безотрывных течений и основанная на использовании дополнительных уравнений, описывающих перенос турбулентной кинетической энергии ( $k$ ) и скорости ее диссипации ( $\varepsilon$ ) [96–102].

В работе [94] авторы используют полуэмпирическую формулу при исследовании сифонного наполнения изложницы. Причем турбулентный аналог числа Рейнольдса ( $Re_t$ ) определяется как:

$$Re_t = URe_t^* \nu, \text{ где } Re_t^* = \lg[Re(r/L)]. \quad (2.9)$$

Авторы оставляют открытым вопрос о предельном значении  $Re_t$ .

В работе [103] эта формула была апробирована на модели, позволяющей изучать аэродинамику и теплофизику в воздухе при наполнении ковша чугуном. Полученная картина вихревой структуры удовлетворительно совпадает с промышленным экспериментом, проведенном на МК Азовсталь (рисунок 2.1).

Однако, если турбулентный перенос значителен во всех направлениях, то предложенная модель недостаточно отражает физику процесса [104].

В работе [95] используется модель длины смешения Прандтля, в которой турбулентная вязкость выражена в виде следующей зависимости от завихренности и масштаба длины:

$$\nu_t = \chi^2 y^2 |\omega|, \quad (2.10)$$

где  $\chi$  - постоянная Кармана,  $y$  - расстояние, отсчитываемое от стенки.

Несмотря на простоту модели, в результате ее применения в нескольких задачах о внутренних и внешних безотрывных течениях были получены вполне удовлетворительные результаты.

Но с помощью такой модели не всегда удастся правильно описать очень важные турбулентные процессы, такие как диссипация [91].

В работе [105] также применялась эмпирическая формула (2.10). Результаты, полученные в ходе расчетов и лабораторных исследований, хорошо совпадают.

Экономически эффективен подход к решению задачи о турбулентных течениях, который заключается в решении осредненных по времени уравнений Рейнольдса. Однако процедура осреднения по времени приводит к появлению в уравнениях неизвестных членов – напряжений Рейнольдса. Для решения таких уравнений широкое распространение получила k-ε модель с двумя уравнениями переноса [96]. Выполняя сопоставление нескольких моделей турбулентности, авторы работы

пришли к заключению, что данная модель должна приводить к более хорошим результатам расчета по сравнению с другими моделями. Турбулентная вязкость определяется как

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon; \quad (2.11)$$

$$\text{где } k = 0,5 \overline{u'u'}; \quad \varepsilon = \nu \left( \frac{\partial u'}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial x} \right) \quad (2.12)$$

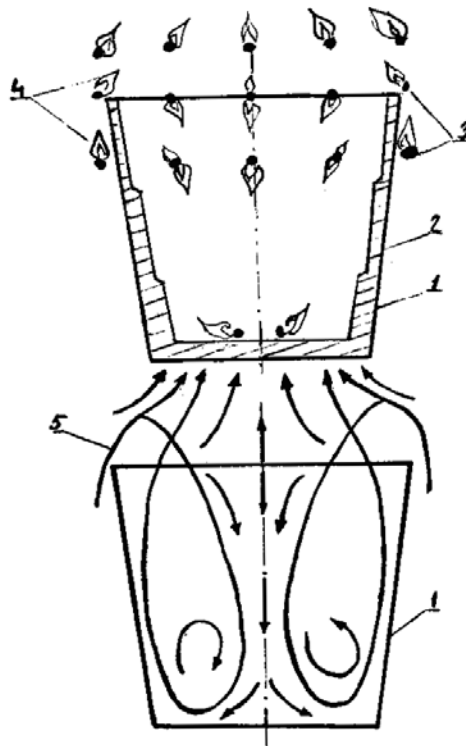


Рисунок 2.1 – Вихревая архитектура в подогретом перед разливкой ковше, верхняя часть рисунка движение воздуха в полости ковша, полученное методом задымления и фотографирования; нижняя – расчетные данные.

Система уравнений для таких моделей состоит из пяти неизвестных  $u$ ,  $v$ ,  $p$ ,  $u'^2$ ,  $v'^2$  и с учетом предположения изотропности ( $u' = v'$ ) записывается в виде [100].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \nu \nabla u; \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \nu \nabla v; \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial kv}{\partial y} = +\nabla \frac{\nu}{\sigma_k} \nabla k + \Phi - \varepsilon; \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} = +\nabla \frac{\nu}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon + C_1 \frac{\varepsilon G}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.16)$$

где  $\nu = \nu_l + \nu_t$  - ламинарная и турбулентная вязкости соответственно.

$$G = \nu_t \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] - \text{диссипативная функция.}$$

Рейнольдсовы напряжения линейно связаны со средней скоростью деформации через скалярную турбулентную вязкость [97].

$$\overline{v}^2 = 2\nu_t \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} - \frac{2}{3} k; \quad \overline{u}^2 = 2\nu_t \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} - \frac{2}{3} k; \quad \overline{v} \overline{u} = \nu_t \left( \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} \right) \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} - \frac{2}{3} k.$$

Наибольшую сложность представляет выбор эмпирических констант. В работах [97, 98] показаны  $k$ - $\varepsilon$  модели, которые отличаются выбором этих констант и диапазоном их применения. Для плоского течения:

$$C_\mu = 0,09; \quad C_1 = 1,43; \quad C_2 = 1,92; \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1,13. \quad (2.17)$$

Для осесимметричного:

$$C_\mu = 0,09 - 0.04 f; \quad C_2 = 1,92 - 0.0667 f; \quad f = \left| \frac{\sigma}{\Delta u} \left( \frac{dU_0}{dx} - \left| \frac{dU_0}{dx} \right| \right) \right|;$$

$\sigma$ -толщина слоя смещения  $dU$  - характерное изменение скорости поперек слоя;  $U_0$  - средняя скорость потока вдоль оси.

Однако при расчете слабых сдвиговых течений предполагают  $C_\mu$  функцией  $G/\varepsilon$ , где  $G$  - член характеризующий генерацию энергии [106, 107]

и тогда:

$$C_\mu = 0,09G \frac{\overline{G}}{\overline{\varepsilon}}.$$

Для осесимметричного течения:

$$C_\mu = 0,09G \frac{\overline{G}}{\overline{\varepsilon}} - 0,0543f; \quad C_2 = 1,92 - 0.0667 f.$$

В работе [108] рассматриваются две  $k$ - $\varepsilon$  модели (для течений с малыми и большими числами Рейнольдса) и пять алгебраических моделей для расчета с высокими числами Рейнольдса. Все эти модели сформулированы для развитых турбулентных течений в трубах, однако методы их решения вполне пригодны для расчета турбулентных течений в ограниченных объемах. Авторы показали, что ни одна алгебраическая модель хорошо не работает у стенки. Это объясняется отсутствием слагаемых, учитывающих влияние стенки. Напротив,  $k$ - $\varepsilon$  модель наилучшим образом согласуется с экспериментом.

Вообще численная реализация граничных условий в случае турбулентных течений весьма затруднительна из-за больших градиентов турбулентных характеристик у стенки. Турбулентный погранслой вблизи стенки состоит из очень узкого вязкого подслоя, инерционного слоя и внешней области течения. Профиль скорости представляет собой линейную зависимость в вязком подслое, логарифмическую в инерционном слое и быстро меняющуюся функцию во внешней области. Для подробного описания течения в вязком подслое необходим чрезвычайно малый шаг сетки, что расточительно с точки зрения ресурсов памяти и быстродействия ЭВМ. Поэтому одним из способов задания граничных условий является закон "стенки" [96].

В работе [97] для описания поведения течения на стенке, учитывались эффекты неизотропной диссипации (значения диссипации задаются на стенке нулевыми). Причем, последнее учитывается через молекулярную вязкость, входящую в

диффузионные члены во всех уравнениях переноса. Рекомендуемая в [97] модификация модели заключается во включении члена уничтожения в  $k$ -уравнение:

$$-2\nu \left[ \left( \frac{\partial k^{1/2}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2 \right]; \quad (2.18)$$

и члена порождения в  $\varepsilon$  - уравнение:

$$2\nu_t \left[ \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 \right]. \quad (2.19)$$

$C_\mu$  замещается на  $C_\mu [-2,5(1+Re_t/50)]$  и  $C_2$  на  $C_2 [1-0,3\exp(-Re_t^2)]$ . Значения  $k$  и  $\varepsilon$  полагаются нулевыми на стенках.

В работе [109] авторы моделируют турбулентную полуограниченную струю с помощью  $k$ - $\varepsilon$  модели, но указывают, что модель работает для развитого течения и применима вблизи стенки. Авторы считают, что у стенки имеет место течение Куэтта и выполняются условия:

$$\frac{\partial k}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0.$$

На границе течения Куэтта турбулентная кинетическая энергия и скорость ее диссипации определяются как:

$$k = \frac{\tau_*}{\sqrt{C_\mu}}; \quad \varepsilon = \frac{\tau_*^{3/4}}{\chi y};$$

где  $\tau_*$  - касательное напряжение,  $\chi$  - постоянная Кармана.

Касательное напряжение предлагается определять из уравнения:

$$\frac{\partial \tau_* u}{\partial x} + \frac{\partial \tau_* v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\nu}{\sigma_\tau} \frac{\partial \tau_*}{\partial y} \right) + C_\tau C_\mu \tau_* \frac{\partial \tau_* u}{\partial y} - C_\tau \tau_* \frac{\varepsilon}{k}.$$

Все эти работы в основном касаются методов исследования турбулентности в трубах или при обтекании профилей. Однако в работах [110–114] эти модели и методы их реализации с успехом применялись при исследовании гидродинамики, тепломассопереноса в ограниченных объемах, в частности при разливе в ковш или изложницу.

В работе [110] дан обзор результатов исследования свободной конвекции в замкнутых полостях с архимедовой силой, вызванной распределенным объемным источником энергии. Рассматривались полости с адиабатическими стенками, а также с охлаждением сверху. Авторы утверждают, что при больших числах Рэлея ( $Ra$ ), когда явно невозможно определить аналитически структуру течения или теплообмен, единственным средством являются численные методы.

Фарук В. [111] исследовал турбулентную тепловую конвекцию в замкнутой полости с внутренним тепловыделением. Автор утверждает, что необходимо рассматривать всю область течения, т.к. с ростом  $Ra$  картина течения изменяется от симметричной многоячейстой структуры к несимметричной одноячейстой. Автор проиллюстрировал зависимость турбулентной вязкости от числа  $Ra$ . Осредненные по времени результаты для функции тока, изотерм и турбулентной вязкости показаны на рисунке 2.2. При  $Ra=10^6$  уровень турбулентности в области относительно низок и турбулентная вязкость лишь в 3 раза больше молекулярной (рисунок 2.2, а, б, в). При увеличении числа  $Ra$  до  $10^7$  пограничный слой у верхней поверхности уменьшается, турбулентная вязкость возрастает на порядок (рисунок 2.2, г, д, е).

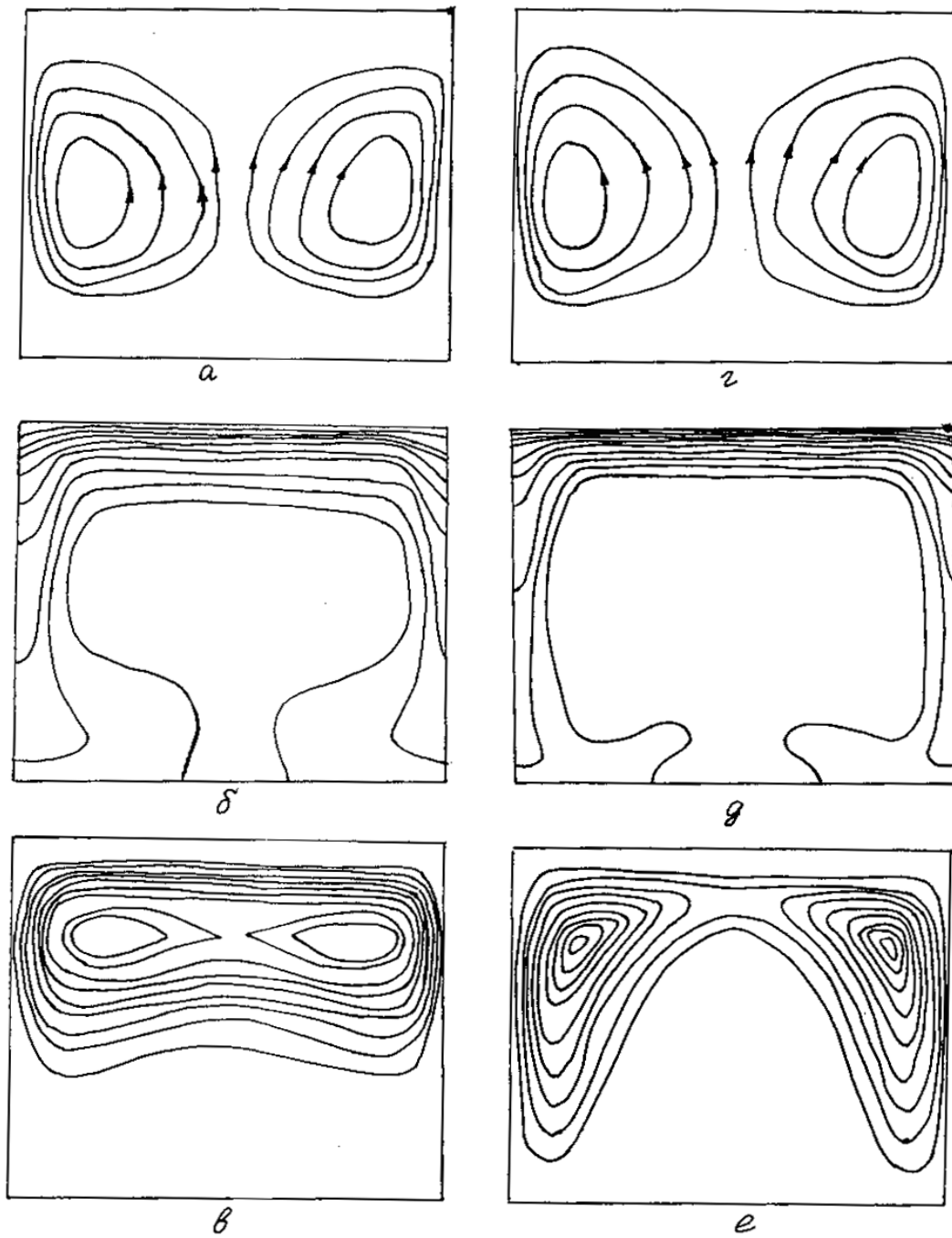
При больших  $Ra$  симметрия в картине течения исчезает, тонкий тепловой слой указывает на высокую степень теплообмена. При  $Ra=10^9$  многоячейстость сменяется одноячейстой картиной.

В работе [112] авторы проводят численные исследования при рафинировании стали в ковше, при этом к вышеупомянутой системе уравнений гидродинамики тепломассопереноса и модели турбулентности добавляется уравнение диффузии. Авторы показали, что турбулентные пульсации скорости первоначально возникают в центре ковша, постепенно охватывая весь объем, при этом эффективный коэффициент вязкости увеличивается на 4 порядка по сравнению с коэффициентом молекулярной вязкости. Это подтверждается в ряде работ Дж. Зекели [105, 114–116]. Автор исследовал не только  $k$ - $\epsilon$  модель, но и предложил формулу, позволяющую описать турбулентную вязкость [105, 115].

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что нижняя часть ковша остается относительно невозмущенной.

Р.И.Л. Гутри [116] сравнил результаты расчетов, полученных на основании турбулентной и ламинарной моделей при наполнении ковша (рисунок 2.3). Струя металла диаметром 0,2 м сливается в ковш диаметром 3,4 м со скоростью 10 м/с. Как видно, турбулентная струя значительно быстрее гасится в толще металла, чем ламинарная.

Картина распределения турбулентной вязкости (рисунок 2.4) указывает на то, что значение  $\nu$  вблизи контакта внедряющейся струи с циркулирующим потоком стали в  $10^4$  раз больше, чем ламинарной.



Линии тока (а, г), изотермы (б, д) и изолинии  $\mu_t^*$  (в, е)

Рисунок 2.2 – Линии тока (а, г), изотермы (б, д) и изолинии вязкости  $\mu_t$  (в, е) при  $Ra$   $10^6, 10^7$  соответственно.

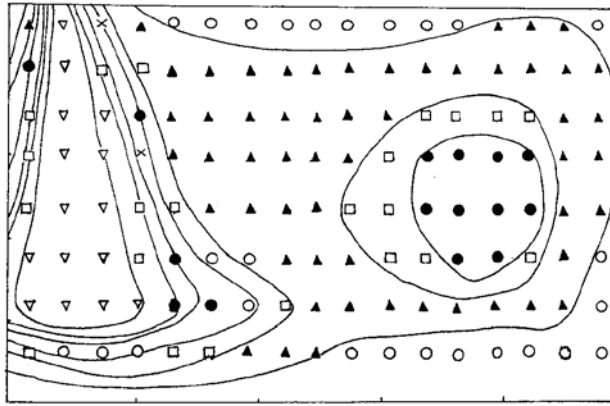


Рисунок 2.3 – Картина пространственного распределения величины турбулентной вязкости ( $\mu_t$ ) при сливе стали в ковш глубиной 1,6 м.

Обзор литературы по вопросу турбулентного теплопереноса в жидкости и газе показал, что проведенные на основе k-ε-модели исследования дают результаты хорошо совпадающие с реальными [117, 118].

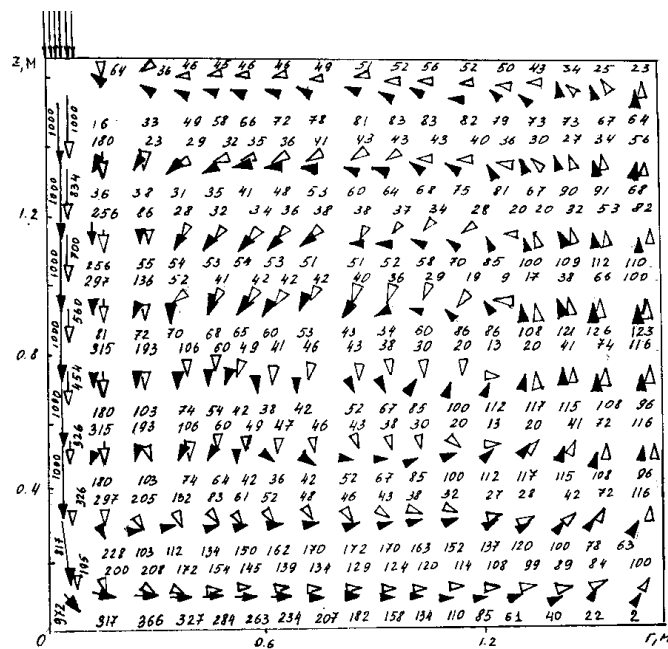


Рисунок 2.4 – Сопоставление рассчитанных на основе турбулентной и ламинарной моделей полей скорости потоков жидкой стали в ковше глубиной 1,6 м и радиусом 1,65 м. Стрелки указывают направление скорости, цифры – величину скорости (см/с).

Данные, полученные на основании использования алгебраических моделей при решении многих задач, также адекватны промышленным процессам [105, 115,

119]. Однако, в литературе практически отсутствуют комплексные исследования по вопросу турбулентного тепломассопереноса как в период разлива, так и затвердевания слитка. Поэтому целесообразно провести исследования гидродинамики и тепломассопереноса при заливке и затвердевании стальных изделий.

### 2.3. Выбор моделей турбулентности для расчета теплофизических и гидродинамических процессов в затвердевающем слитке

Конвективное движение в заливаемом в изложницу расплаве определяется двумя процессами: конвективным тепломассопереносом вследствие осредненного движения среды и за счет турбулентности. Поэтому математическая модель должна правильно описывать не только поле средних скоростей, но и характеристики турбулентных течений.

Система точных уравнений, описывающая во времени все детали эволюции полей скорости, температуры и концентрации в металлургической задаче, не может быть решена с помощью современных вычислительных средств [117].

В настоящее время существует единственный экономически оправданный выход: решать уравнения осредненного движения, которыми определяется распределение осредненных по времени величин. Причем время осреднения должно быть много больше временного масштаба турбулентности, но много меньше временного масштаба осредненного течения.

Такие уравнения содержат члены турбулентного переноса, которые должны быть аппроксимированы определенной моделью турбулентности для решения этой системы. Возникает вопрос, какой же должна быть сложности модель для получения результатов с достаточной для практической цели точностью.

Некоторые задачи удовлетворительно решаются с помощью алгебраической модели. Другие - с привлечением довольно сложных схем турбулентности различного порядка. В идеальном случае модель турбулентности должна быть настолько общей, чтобы для ряда прикладных задач ее можно было бы применять без изменения. Выбор схемы решения турбулентности - цель данного параграфа.

Для оценки применимости модели турбулентности предлагается тестовая система осредненных стационарных уравнений:

$$\frac{\partial \omega u}{\partial x} + \frac{\partial \omega v}{\partial y} = \nabla [\text{Pr}(1 + \nu_t) \nabla \omega] + \text{PrRa} \frac{\partial \theta}{\partial x}; \quad (2.20)$$

$$\varpi = -\Delta \psi; \quad (2.21)$$

Численный расчет осуществлялся для прямоугольной области, на неравномерной сетке размерностью  $60 \times 50$  (граничные условия будут оговорены ниже при рассмотрении конкретной задачи). В основе численной реализации лежит метод переменных направлений.

Рассмотрим несколько наиболее популярных моделей турбулентности и оценим их работоспособность для следующих видов течения расплавленного металла:

Естественная конвекция. Уравнения (2.20) - (2.21) дополняются следующими граничными условиями: для скорости - условия прилипания на всех границах; для температуры - на правой стенке  $\theta = \theta_{\text{ср}}$  ( $\theta_{\text{ср}}$  - температура окружающей среды), на всех других границах выполняется условие адиабатичности;

Вынужденная конвекция, описывается уравнениями (2.20) - (2.21), с граничными условиями на верхней границе:

$$\psi|_{\Gamma} = V_m x; \quad \omega|_{\Gamma} = \frac{2}{y^2} (\psi|_{\Gamma-1} - V_m x); \quad x = [0, R]; \quad (2.22)$$

где  $V_m$  - скорость поступления расплава в объем - 2м/с;  $R$  - радиус струи;  $\Gamma$  - верхняя граница полости.

Смешанная конвекция, для которой выполняются гидродинамическое условие (2.22) и тепловые ( $\theta|_{\Gamma} = \theta_0$ ,  $x = [0, R]$ ) на верхней границе.

Для всех перечисленных видов течения жидкой стали  $\text{Pr}=0,216$ ,  $\text{Ra}=10^9$ .

Рассмотрим модель Прандтля. Успех этой модели объясняется тем, что для многих простых случаев  $\nu_t$  задается формулой:

$$\nu_t = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, \quad (2.23)$$

где  $l$  - длина пути смешения, которую можно трактовать, как расстояние в поперечном направлении, на котором частица сохраняет свой собственный импульс и зависит от типа течения [107]. Величину  $l \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$  - трактуют как характерную скорость турбулентности  $V_t$ .

Видно (рисунок 2.5, а, кривая 1), что значение  $v_t$  на оси равно 0. Гипотеза смешения предполагает нахождение параметров турбулентности в состоянии локального равновесия вследствие выполнения в каждой точке баланса генерации и диссипации турбулентной энергии вне зависимости от предыстории развития процесса. Т.е. в модели Прандтля пренебрегается турбулентный перенос импульса в направлении от стенок к оси области.

Для второго вида течения (рисунок 2.5, б, кривая 1) возрастание турбулентной вязкости наблюдается вблизи струи, где имеет место наибольший градиент скорости. Распределение турбулентной вязкости для третьего вида течения представлено на рисунок 2.5, в, кривая 1. Возникновение промежуточного минимума на кривой  $v_t$ , по нашему мнению, противоречит физике процесса порождения турбулентности. Дело в том, что в этой части области значения полей скоростей наиболее высокие, что должно приводить к наибольшей интенсивности турбулентности. Но т.к. эта часть области характеризуется наименьшим градиентом скорости, то в соответствии с моделью Прандтля использование соотношения (2.23) и приводит к противоречивому результату.

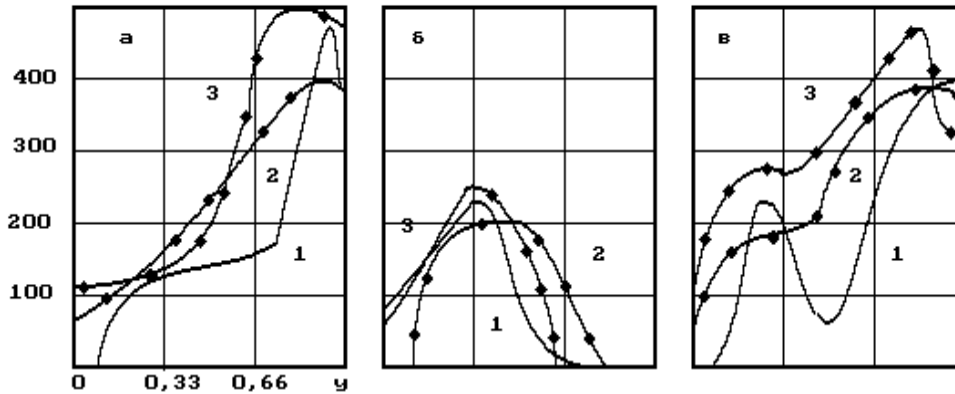


Рисунок 2.5 – Распределение турбулентной вязкости по горизонтальному сечению области: а - при естественной конвекции; б – при вынужденной; в – при смешанной; 1 – прандтлевская модель расчета турбулентности; 2 –  $k - \epsilon$  модель; 3 –  $k - \epsilon - \epsilon$  модель.

Во избежание этого недостатка была предложена однопараметрическая модель [118], основанная на решении уравнения кинетической энергии турбулентности  $k=0.5 \overline{u'u'}$ , квадрат которой пропорционален скорости турбулентности  $V_t$ . Используя уравнение переноса для  $k$

$$\frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial kv}{\partial y} = \nabla \left( 1 + \frac{\nu}{\sigma_k} \right) \nabla k + \Phi - \epsilon, \quad (2.24)$$

$$\text{турбулентность можно оценить как } \nu_t = C_k l \sqrt{k} \quad (2.25)$$

Понятно, что в соответствии со второй моделью устраняется недостаток модели пути смешения, связанный со стремлением значений  $\nu_t$  к нулю, когда  $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$ . Однако, указанный способ определения турбулентной вязкости справедлив только в развитом турбулентном потоке, т.е. вдали от демпфирующего влияния стенки. Поэтому на стенке внутренние граничные условия задаются из следующих соображений. Известно, что вблизи стенок конвекция и диффузия  $k$  малы. Поэтому диссипация и генерация уравновешивают друг друга, и задача кинетической теории

турбулентности сводится при этих условиях к модели длины смешения [43-46]. Поэтому в пристеночной области в качестве внутреннего граничного условия для  $k$  можно использовать:

$$k(x_0) = l^2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) / C_d^{2/3}. \quad (2.26)$$

Таким образом, основу однопараметрической модели турбулентности составляет система уравнений (2.19) - (2.22), (2.24) и соотношение (2.25) - (2.26). Представленные на рисунке 2.5, а, б, в результаты вычислительного эксперимента (ВЭ) по исследованию турбулентной вязкости (кривые 2) на основе второй модели свидетельствуют об устранении недостатка, характерного для модели Прандтля: отсутствуют точки, в которых  $\nu_t \rightarrow 0$  при  $\partial u / \partial y = 0$ .

Но недостатком этой модели является независимость длины пути смешения от предыстории течения. Применимость однопараметрической модели ограничивается, главным образом, относительно простыми областями. Для более сложных областей (изложница, литейная форма), трудно получить эмпирическое выражение для длины пути смешения. Поэтому предложена двухпараметрическая модель ( $k$ - $\varepsilon$ ) [96]. Параметр скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$  связан с другими модельными параметрами соотношением:

$$\nu_t = C_\mu \bar{k}^{3/2} / l$$

и находится из уравнения переноса:

$$\frac{\partial u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v \varepsilon}{\partial y} = \text{Pr} \left[ \nabla \left( 1 + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \text{PrG} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.27)$$

где  $C_1, C_2, \sigma_\varepsilon$  - константы турбулентности.

Тогда формула для расчета турбулентной вязкости записывается в виде (2.11).

Накоплен опыт работы с этой моделью в основном для течений, в которых свойство жидкости изменяется мало. Приведенный выше метод определения турбулентности практически не пригоден для расчетов вблизи стенок. Поэтому на внутренней границе предлагается учитывать либо гипотезу Прандтля, либо в уравнение переноса для  $k$  и  $\varepsilon$  вводить дополнительные члены, чтобы распространить область применимости на вязкий подслой. Последний способ особенно популярен для сложных турбулентных течений, как например, для течений с сильно изменяющимися свойствами жидкости. Авторами [96, 97] предложено ввести члены уничтожения в  $k$  - уравнение и член порождения в  $\varepsilon$ -уравнение. Значения  $k$  и  $\varepsilon$  полагают нулями на стенке. На входном отверстии для расчетов второго и третьего видов течения задаются условия:

$$k|_r = 1,5TuV_m^2; \quad \varepsilon|_r = C_\mu^{3/4} K^{3/2} / l; \quad [0, R]. \quad (2.28)$$

Таким образом двухпараметрическая модель турбулентности состоит из уравнений (2.19) (2.21), (2.24), (2.27), (2.11) и условий (2.28).

Сопоставление результатов ВЭ, выполненных на основе одно-и двухпараметрической модели турбулентности, свидетельствует об их удовлетворительном согласовании (рисунок 2.5, а, б, в, кривые 2 и 3). Однако, учитывая громоздкость  $k$ - $\varepsilon$  модели и более значительные затраты машинного времени при ее численной реализации, для инженерных расчетов прикладных задач в областях несложной конфигурации следует отдать предпочтение однопараметрической модели.

Исследования применимости и работоспособности двухпараметрической модели турбулентности выполнены на примере решения нестационарной задачи тепловой конвекции турбулентности в области с отношением сторон  $L_2/L_1 = 0,5$ . На верхней стенке  $\theta = 0$ , на всех остальных границах задается условие адиабатичности. Исследования проведены для  $Ra = 10^8 - 10^{10}$ . Турбулентные процессы переноса импульса и тепла, происходящие в области при естественном конвективном перемешивании, описываются следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{V} + \beta \vec{g} \nabla T;$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0;$$

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

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) k = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 k + G - \vec{g} \beta \Delta T - \varepsilon;$$

$$\frac{\partial u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v \varepsilon}{\partial y} = \text{Pr} \left[ \nabla \cdot \left( 1 + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \text{Pr} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}.$$

Для значения числа  $Ra=10^8$  тепловая конвекция достигает режима стабилизации при  $Fo=0,002$ . Картина течения симметрична с развитым градиентом температур и высокими значениями  $\nu_t$  и  $k$  в верхней части области (рисунок 2.6). В нижней части области (рисунок 2.6) преобладает ламинарное течение. По мере увеличения числа  $Ra$  увеличивается период достижения режима стабилизации конвекции, усиливается турбулизация и в конечном итоге ( $Ra=10^{10}$ ) структура течения становится мелковихревой и асимметричной с довольно тонким тепловым погранслоем в верхней части области.

Таким образом, при моделировании процесса наполнения сложных литейных форм наиболее приемлемой является  $k$ - $\varepsilon$  модель. Однако учитывая громоздкость и значительные затраты машинного времени при ее численной реализации, для инженерных расчетов прикладных задач в областях несложной конфигурации (прямоугольная, цилиндрическая) следует отдать предпочтение однопараметрической модели турбулентности. ВЭ установлены геометрические размеры области, для которых следует выбирать математическую модель процесса наполнения в турбулентной или ламинарной постановке.

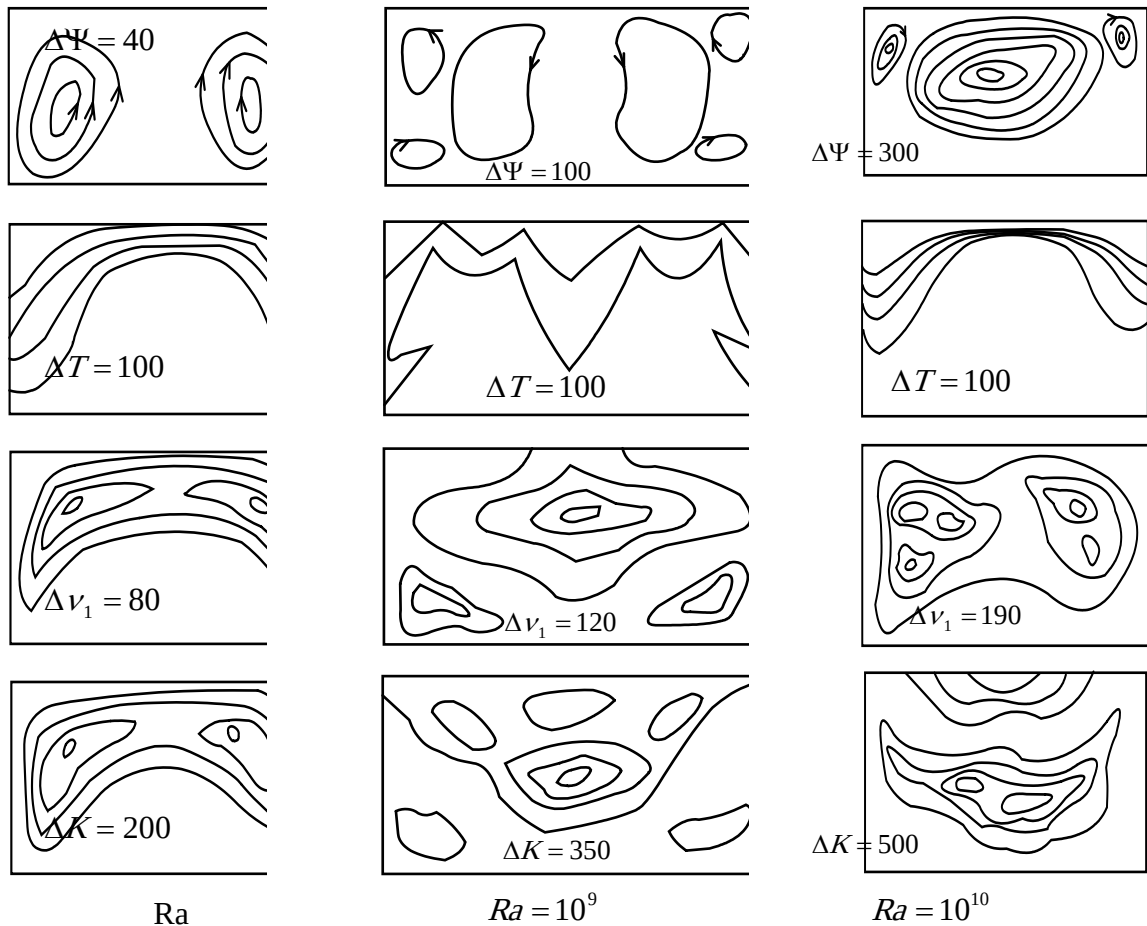


Рисунок 2.6 – Линии функции тока, изотермы, линии турбулентной вязкости, турбулентной кинетической энергии при различных числах Релея.

Приведенный выше набор схем известен и в той или иной мере используется в вычислительной практике. В каждом случае необходимо знать диапазон и условие применимости данной схемы. Ряд работ посвящен тестированию конечно-разностных схем [120, 121], однако расчеты нелинейных задач конвекции методами конечных разностей освящены все еще недостаточно. Поэтому выполним тестовые расчеты некоторых классических задач с помощью выбранной и описанной схеме возмущенного оператора с разностью против потока. На рисунке 2.7. показаны результаты расчета тепловой гравитационной конвекции в замкнутой квадратной области при подогреве области сбоку. Система уравнений (2.1) - (2.3) замыкается следующими граничными условиями:

|       |                   |          |                                        |                                          |
|-------|-------------------|----------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| $y=0$ | $0 \leq x \leq 1$ | $\psi=0$ | $\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$ | $\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$ |
| $y=1$ |                   |          |                                        |                                          |
| $x=0$ | $0 \leq y \leq 1$ | $\psi=0$ | $\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$ | $\theta = 1$                             |
| $x=1$ |                   |          |                                        | $\theta = 0$                             |

Расчет осуществлялся на равномерной сетке  $65 \times 65$  при  $Gr = 1,25 \cdot 10^4$ ,  $Pr = 0,71$ . Физическая картина течения в такой области, рассчитана численно и подробно описана в работе [121]. На рис 2.6 видно, что в области образуется циркуляционное течение, перемешивающее жидкость и переносящее тепло от нагретой стенки к холодной. Качественно полученная картина совпадает с результатами численного моделирования авторами [122]. Увеличения числа Грасгофа до  $10^5$  приводит к появлению вторичных внутренних течений в ядре (рисунок 2.6,б).

#### 2.4. Выбор границ применимости математической модели турбулентности при формировании стального слитка

Гидродинамические процессы определяют тепловую и физико-химическую обстановку в затвердевающем стальном слитке. Расчет полей скорости трудоемкая задача, требующая значительных затрат машинного времени. Так расчет полей скорости в жидком ядре кристаллизующегося расплава занимает до 60% машинного времени, остальные 40% приходятся на определение полей температуры, концентрации и доли твердой фазы. Если процесс носит турбулентный характер, то затраты на расчет гидродинамической части задачи составляют 62-80% машинного времени в зависимости от выбранной модели турбулентности. Поэтому выбор математической модели - сложный процесс: с одной стороны, пренебрежение турбулентным переносом субстанций может привести к существенному искажению результатов, а с другой стороны, необоснованный учет турбулентности существенно увеличивает время расчета на ЭВМ.

Целью данного параграфа является определение рациональных границ применимости турбулентной модели переноса импульса и тепла в затвердевающем расплаве в замкнутой области, т.к. именно для замкнутых областей этот вопрос до настоящего времени остается открытым.

В качестве метода исследования выбрано математическое моделирование гидродинамических процессов, тепло и массопереноса с привлечением  $k-\varepsilon$  -модели турбулентности при разливке и затвердевании стального слитка [3, 123–126].

Исследования проводились для двух этапов формирования слитка: первый-разливка в изложницу, второй-затвердевание. Для первого этапа имеет место альтернатива - либо считать гидродинамику в ламинарном приближении, либо - в турбулентном. На рисункт 2.7 представлена зависимость средней по высоте слитка толщины твердой корочки от тоннажа слитка при разливке сверху и сифоном (снизу). Оценка влияния способа разливки на поведение расплава осуществлялась при одинаковых технологических параметрах (теплоперегреве и скорости поступления расплава в изложницу) как при разливке сверху, так и при сифонной.

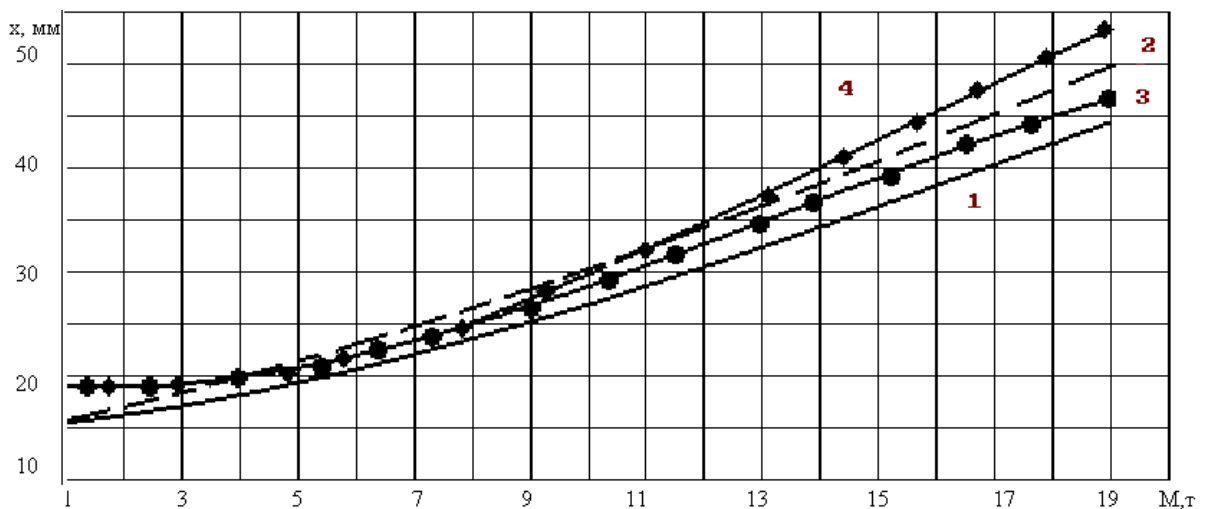


Рисунок 2.7 – Зависимость средней толщины твердой корочки от тоннажа слитка при разливке сверху: кривая 1- без учета турбулентности, 2 – с учетом турбулентности; при разливке снизу: 3- без учета турбулентности, 4 – с учетом турбулентности

При разливке сверху, уже начиная с однотонового слитка, учет турбулентности заметно сказывается на толщину твердой корочки. Увеличение массы усиливает эти различия. При разливке сифоном влияние турбулентности проявляется, начиная с 8 тонного слитка (рисунок 2.7).

Различие в поведении расплава в зависимости от способа разливки объясняется следующим образом. В период разливки интенсивность перемешивания расплава характеризуется двумя причинами: механическим воздействием струи и тепловой конвекцией. Эти две причины обуславливают развитие в расплаве смешанной конвекции, которая определяет гидродинамическую обстановку в расплаве, и, как следствие, тепло-и массоперенос. При разливке сверху имеют место две зоны. Первая существует на протяжении всего процесса разливки и характеризуется наличием нисходящих потоков в центре изложницы, вызванных раскрытием струи. По мере наполнения изложницы ( 50%), образуется вторая зона, в которой наблюдается обратное течение, т.е. в центре внизу имеют место восходящие потоки, а в пристеночной области по всей высоте изложницы - нисходящие [124]. Эта зона обусловлена, в первую очередь, тепловым градиентом. Интенсивность перемешивания во второй зоне на порядок ниже, чем в первой. С наполнением области размеры первой зоны не изменяются, а вторая зона занимает все больший объем.

Влияние турбулентной вязкости существенно сказывается на толщины "твердой корочки" по высоте слитка. Препятствуя распространению струи вглубь расплава [125], она способствует раннему образованию второй более спокойной зоны. Если на верхних горизонтах потоки, вызванные струей, отдают тепло, подплавляя "твердую корочку", то на нижних горизонтах нисходящие потоки отбирают у пристеночных слоев тепло и выносят его в центр слитка, способствуя росту "твердой корочки".

При разливке сифоном, наблюдается три зоны течения: центральная, представляющая собой восходящие циркуляционные потоки, обусловленные раскрытием струи; периферийная - нисходящие потоки, вызванные эжектирующим действием струи и тепловой конвекцией; зона восходящих потоков, локализованных в

верхнем углу, образованная уровнем расплава и боковой стенкой. Как и при разливке сверху, в первой зоне имеют место наибольшие значения скорости (до 60 см/с при расходе 1000 кг/мин). Однако, если при разливке сверху эта зона перемещается по мере наполнения изложницы, то при сифонной разливке она неподвижна. Высота факела струи не превышает 70 - 100 см, влияние турбулентной вязкости практически не сказывается на его высоту.

Вторая зона более спокойна (максимальная скорость достигает 20 см/с) и локализуется в донной части изложницы. В начале наполнения перемешивание расплава вызвано эжекцией струи. С нарушением теплового равновесия в расплаве интенсивность смешанной конвекции увеличивается за счет конвективного теплопереноса. Следует отметить, что влияние турбулентности больше сказывается во второй зоне. Это выражается в более интенсивном росте "твердой корочки". По-видимому, восходящие потоки, отдав тепло на высоте 1 - 1,2 метра, охлажденными опускаются ко дну изложницы, способствуя наращиванию "твердой корочки". Понятно, что при турбулентном теплопереносе процесс отдачи тепла происходит интенсивнее.

Третья зона наиболее спокойная (максимальная скорость 1,5 - 2 см/сек), здесь не проявляется активность струи, а равномерно распределенная температура по сечению слитка не способствует образованию тепловой конвекции. Эта зона образуется после 50% наполнения изложницы, поэтому твердая корочка наиболее тонкая. Влияние турбулентности практически не сказывается.

При увеличении размеров изложницы (наибольшее влияние на протекание процессов оказывает ширина изложницы) наблюдается увеличение второй зоны и толщины "твердой корочки".

На примере двух видов разливки показано, что величина турбулентной вязкости вносит существенные коррективы в тепловую и гидродинамическую обстановки. Поэтому для оценки рациональных границ применения турбулентной модели предлагается использовать числа подобия  $Re$  и  $Gr^*$ : первое число характери-

зует внешнюю обстановку, обусловленную струей, а второе - внутреннюю, обусловленную естественной тепловой конвекцией. Имеет смысл ввести комплекс  $ReGr^*$ , где  $Re = Vd/\nu$ ,  $Gr^* = g\beta\Delta T x_{пр}^3/\nu^3$ ,  $V$  - скорость поступления металла в изложницу,  $d_{пр}$  - диаметр струи у зеркала металла при разливке сверху или в стакане при разливке снизу,  $\Delta T = T_0 - T_1$  -перегрев, разница между температурой  $T_0$  разливки и  $T_1$  ликвидусом,  $x_{пр}$  – приведенный размер слитка (отношение объема слитка к площади его поверхности). Выбор  $x_{пр}$  позволяет учесть различные соотношения геометрических размеров слитка [127]:

$$x_{пр} = \frac{S_{слитка} + S_{приб}}{4(V_{слитка} + V_{приб})},$$

где  $S_{слитка}$ ,  $S_{приб}$ ,  $V_{слитка}$ ,  $V_{приб}$  –площади и объемы слитка и прибыли соответственно.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показал, что учет турбулентности необходим при следующих значениях  $ReGr^*$ : для разливки сверху -  $8,9 \cdot 10^{12}$ , а для сифонной -  $3,8 \cdot 10^{13}$ .

Второй этап исследования - определение границ применимости турбулентной модели на этапе затвердевания слитка. На этом этапе в связи с прекращением заливки определяющим критерием является число Релея.

Сравнение времен затвердевания 1- тонного слитка, рассчитанного в условиях отсутствия конвекции и при естественном перемешивании расплава, показали, что влиянием гидродинамики в вертикальном слитке можно пренебречь при  $Ra^* < 1,5 \cdot 10^6$ . Но для таких чисел  $Ra^*$  ( $Pr=0,216$  и  $x_{пр}=0,095$  м) перегрев не должен превышать  $1^\circ\text{C}$ , что технологически нереально при разливке слитка. Поэтому можно утверждать, что при затвердевании стальных слитков массой более одной тонны необходимо учитывать конвекцию.

Что касается учета турбулентности, то для оценки ее влияния просчитаны 12 вариантов затвердевания блюминговых слитков весом 2,7; 5,75; 10; 12; 18; 20; 24; 42; 98; 120; 380 и 420 тонн при перегреве  $\Delta T=60^\circ\text{C}$ . Различие полного времени затвердевания слитка, превышающее 10%, уже начинается с 20-тонного слитка с  $x_{пр} = 0,3$  м

и  $Ra^* = 5,1 \cdot 10^8$ . Для 420 тонного слитка ( $x_{пр} = 0,83м$ ,  $Ra^* = 1,1 \cdot 10^{10}$ ) эти различия составляют 19%. На основании расчетов была построена диаграмма, позволяющая выбрать соответствующую математическую модель в зависимости от  $x_{пр}$  и  $\Delta T$  (рисунок 2.7).

В процессе расчета одного варианта затвердевания стального слитка, возможно последовательное применение нескольких моделей: турбулентной, ламинарной и бесконвективной. Для 20 - тонного слитка залитого при  $\Delta T = 60^\circ C$ , необходимо применять модель, учитывающую турбулентность, т.к. согласно диаграмме, значение  $Ra^*$  находится в области 3, соответствующей турбулентной модели. Через 17,5 минут после начала затвердевания в связи со снятием теплоперегрева [3] значения числа  $Ra^*$  позволяют говорить о возможности применения ламинарной модели, а через 87 минут после начала затвердевания можно отказаться от учета конвекции. Анализ позволил существенно снизить затраты машинного времени. При комбинированном использовании различных моделей (рисунок 2.7) машинного времени было затрачено более, чем в 2 раза меньше, чем при использовании модели турбулентности для всего времени затвердевания 20-тонного слитка. При этом расхождение во времени затвердевания слитков составило 2,3%.

Таким образом, полное время затвердевания слитка  $t_0$  условно представляется в виде:

$$t_0 = t_t + t_l + t_{бк} = t_k + t_{бк}, \quad (2.29)$$

где  $t_t$  - время существования турбулентной конвекции,  $t_l$  - ламинарной,  $t_k$  - суммарное время существования конвекции в жидком ядре затвердевающего расплава и  $t_{бк}$  - время бесконвективного затвердевания слитка .

Для определения безразмерного времени применения конвективной модели, обработаны результаты расчетов затвердевания 12 вышеуказанных вариантов. На основании статистической обработки результатов получена следующая формула :

$$Fo_k = 5,39 Ra^{*0,15} . \quad (2.30)$$

Например, для 24 тонного слитка углеродистой стали Ст.0,8 ( $x_{\text{пр}} = 0,32$  м и  $\Delta T = 60^\circ \text{C}$ ) значение числа  $Ra^* = 6,1 \cdot 10^8$ . Подставляя значение  $Ra^*$  в формулу (2.30), получаем  $Fo_k = 5,25 \cdot 10^{-2}$ . Определим размерное время, при котором рекомендуется учитывать влияние естественной конвекции ( $t_k = Fo_k x_{\text{пр}} / a$ ), которое для указанной стали равно 97,1 мин. Дальнейший учет конвекции нецелесообразен, т.к. в силу малых скоростей перемешивания, она не влияет на полное время затвердевания слитка и конфигурацию "твёрдой корочки" [127].

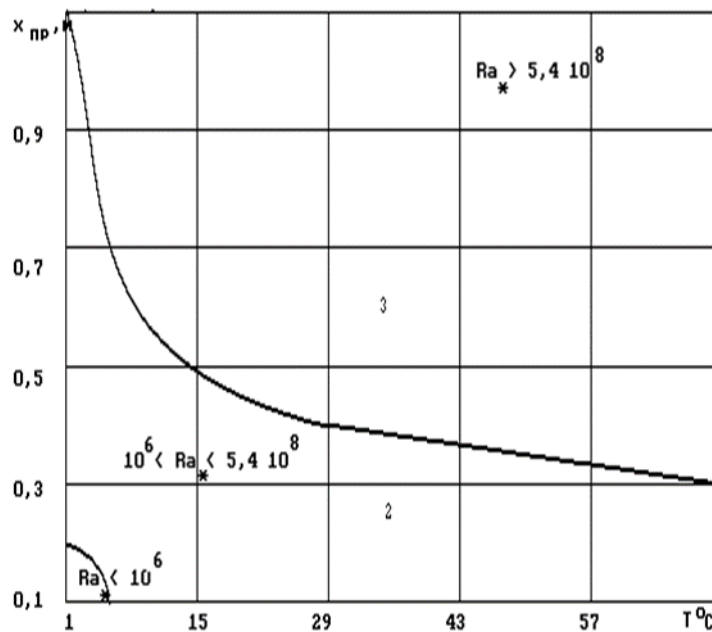


Рисунок 2.8 – Диаграмма выбора математической модели в зависимости от приведенного размера и перегрева: 1 – бесконвективные, 2 – ламинарная конвекция, 3 – турбулентная.

Для определения временного интервала существования конвекции в турбулентном режиме проведены исследования для 20, 24, 42, 98, 120, 380 и 420 - тонных слитков при  $\Delta T = 60^\circ \text{C}$  и построена зависимость (рисунок 2.9, пунктирная кривая, для которой значения параметров представлены в скобках по осям абсцисс и ординат).

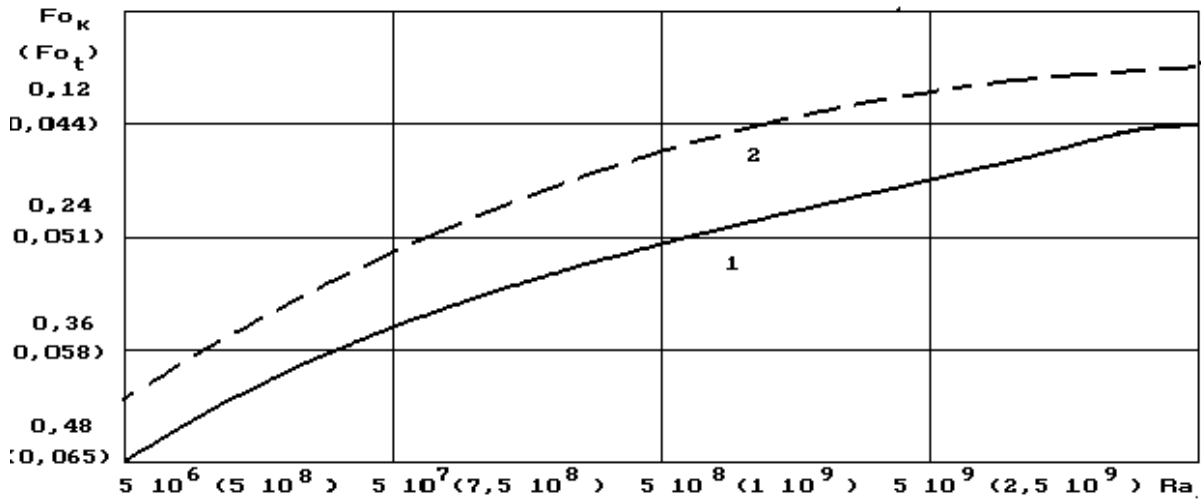


Рисунок 2.9 – зависимость времени существования конвекции (кривая 1) и турбулентной конвекции (кривая 2, значение параметров для нее представлены в скобках по оси абсцисс и ординат) от числа  $Ra^*$

$$Fo_t = 0,208 Ra^{*-0,068}. \quad (2.31)$$

Вычислительный алгоритм. Система уравнений (2.1- 2.9) реализуется в переменных вихрь-функция тока ( $\omega-\psi$ ), что является наиболее эффективным приемом при моделировании процессов переноса в плоской постановке с точки зрения экономии машинных ресурсов.

Строится неявная монотонная конечно-разностная схема с привлечением методов интегро-интерполяционного, «возмущенного» оператора, разности против потока и прогонки [128]. Совокупность всех этих методов сводит нелинейные дифференциальные уравнения к цепочке алгебраических.

Работоспособность разработанной математической модели и вычислительного алгоритма доказана на примере ряда задач по разливке и затвердеванию слитков.

Разливка сверху. В результате вычислительного эксперимента (ВЭ) получено:

- учет турбулентности сказывается в уменьшении глубины проникновения струи вглубь расплава (на 60% при массовой скорости поступления расплава в изложницу 1000 кг/мин и перегреве  $60^0$  C);

- зона активного влияния струи занимает 45% объема расплава и локализуется в верхней части расплава, зона влияния тепловой конвекции - составляет 55% объема полости изложницы;

- влияние турбулентности сказывается в ускорении (на 10%) роста «твердой корочки», особенно в нижней пристеночной области;

- учет газозахвата и турбулентности приводят к уменьшению глубины проникновения струи вглубь расплава на 68% при содержании газовой фазы 20% и росту "твердой корочки" в нижней части изложницы на 21% (рисунок 2.10)

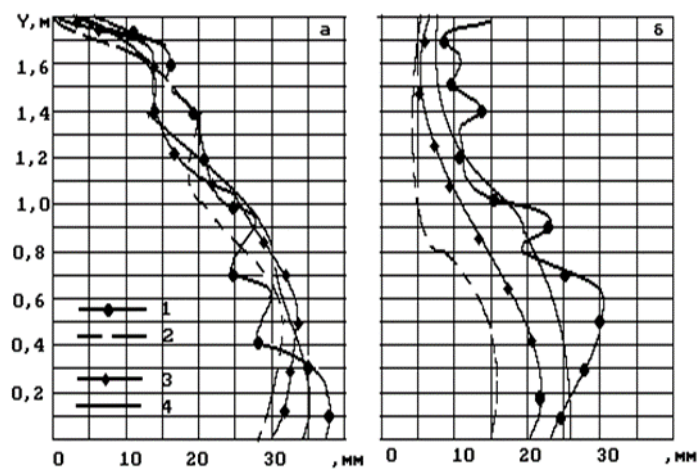


Рисунок 2.10 – Толщина твердой корочки по высоте 15,3 тонного слитка при разливки сифоном (а) и сверху (б) кривая 1 результаты эксперимента, 2 - расчет без учета турбулентности, 3 – с учетом турбулентности, 4 - с учетом турбулентности и газовой фазы

#### Разливка сифоном:

- влияние турбулентности и газовой фазы практически не сказалось на высоте ядра затопленной струи и распределении вертикальной компоненты-ты скорости на оси изложницы, при этом усиливается влияние естественной конвекции в нижней пристеночной области;

- влияние турбулентной вязкости увеличивает толщину «твердой корочки» в нижней части изложницы на 25%, а совокупное влияние турбулентной вязкости и газовой фазы - на 40%.

Установлено, что учет турбулентности необходим при следующих значениях чисел Релея  $Ra^* = ReGr^*$  : для разливки сверху -  $8,9 \cdot 10^{12}$  , а для сифонной -  $3,8 \cdot 10^{13}$  ,

где  $Gr^* = g\Delta T x_{\text{пр}}^3 \beta_T / \nu^2$ ,  $x_{\text{пр}}$  - приведенный размер слитка (отношение объема слитка к площади его поверхности). Выбор  $x_{\text{пр}}$  позволяет учесть различные соотношения геометрических размеров слитка.

Для тепломассопереноса при затвердевании стального слитка в условиях турбулентной термоконцентрационной выявлено:

1. турбулентные характеристики движения расплава наиболее значительны в первые 4-5 мин, в дальнейшем их величина резко падает;
2. учет конвекции необходим при числах Релея  $Ra^* > 1,5 \cdot 10^6$ , а турбулентной при числах  $Ra^* > 5 \cdot 10^8$ .

## 2.5. Условия на границе

Все описанные выше металлургические процессы описываются ограниченным количеством уравнений, основанных на законах сохранения переноса импульса, энергии, вещества. Многообразие задач объясняется наличием различных условий однозначности: начальными и граничными условиями для температуры и скорости, на основании которых выводятся соответствующие соотношения для функции тока и завихренности. Поскольку задание искомых функций в начальный момент времени (в нестационарных задачах) обычно принципиальных затруднений не вызывает, остановимся на проблеме постановки условий на границе объема жидкости.

Пусть  $\Gamma$  — регулярная линия границы в плоскости определения двумерной задачи;  $n$  — внутренняя нормаль к ней;  $s$  — длина дуги на линии  $\Gamma$ ;  $u$  и  $v$  касательная и нормальная составляющие вектора скорости на плоскости  $\Gamma$ . Вводя функцию тока, можно сказать [3], что на границе  $\Gamma$

$$u = \xi \frac{\partial \psi}{\partial n}, \quad v = \xi \frac{\partial \psi}{\partial s} \quad (2.32)$$

Соотношения (2.32) использоваться при выводе граничных условий для функции тока и завихренности.

Рассмотрим несколько типичных ситуаций.

**Твердая стенка.** Предположим, что жидкость примыкает к твердому телу, имеющему регулярную поверхность. В зависимости от типа задачи температура на  $\Gamma$  может, задана либо в явном виде, как известная непрерывная функция пространства и времени (граничные условия 1 рода), либо величиной теплового потока - условие 2-го рода), либо некоторым соотношением, связывающим значения температуры со значениями теплового потока (граничные условия 3-го рода). В последнем случае тепловой поток обычно считается пропорциональным разности между температурой  $T_\infty$  твердого тела на большом удалении от границы (на бесконечности)

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n_{|\Gamma}} = \alpha(T_\Gamma - T_\infty), \quad (2.33)$$

где  $\lambda$ ,  $\alpha$  – коэффициенты теплопроводности и теплообмена соответственно.

Все три условия описываются общей формулой

$$a \frac{\partial T}{\partial n_{|\Gamma}} - b T_{|\Gamma} + D_{|\Gamma}, \quad (2.34)$$

где при  $a=0$  и  $b \neq 0$  имеем условие 1-го рода (условие Дирихле), при  $a \neq 0$  и  $b=0$  – условие 2-го рода (условие Неймана), при  $a \neq 0$  и  $b \neq 0$  – условие 3-го рода.

В более полной постановке задачу о теплообмене решают в области, состоящей из обеих соприкасающихся сред. При этом на линии раздела поддерживаются условия сопряжения (граничные условия 4 рода). Если на  $\Gamma$  отсутствуют посторонние источники или стоки условия сопряжения записываются в виде:

$$T_\Gamma^{(1)} = T_\Gamma^{(2)}, \quad \lambda^{(1)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial n_{|\Gamma}} = \lambda^{(2)} \frac{\partial T^{(2)}}{\partial n_{|\Gamma}}, \quad (2.35)$$

один из верхних индексов соответствует жидкости, а другой — среде, контактирующей с ней (в данном случае твердому телу).

На твердой поверхности, ограничивающей движущую вязкую жидкость, для скорости ставятся так называемые *условия прилипания*:

$$u_\Gamma^{(1)} = u_\Gamma^{(2)} = u_n. \quad (2.36)$$

Ввиду (2.32) и (2.36) на неподвижной стенке имеем

$$u_n = 0, \quad \psi_n = \text{const}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial n_\Gamma} = 0. \quad (2.37)$$

Причем константу допустимо выбирать любой, например, равную нулю. Так что условия прилипания в этом случае запишутся в виде

$$u_n = 0, \quad \psi_n = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial n_\Gamma} = 0. \quad (2.38)$$

Первое из них применяют в качестве граничного условия для функции тока, второе же служит для вычисления на  $\Gamma$  значений завихренности.

**Свободная граница.** Если жидкость, для которой решается задача конвекции, контактирует, не смешиваясь с другой жидкостью (или газом), температуру на границе контакта обычно задают условиями 3-го рода. Строгая формулировка такой задачи должна условно учитывать совместный процесс конвективного теплообмена в соприкасающихся средах, в каждой из которых следует рассматривать свою систему конвективных уравнений, удовлетворяя на линии раздела  $\Gamma$  условиям сопряжения (2.31).

На поверхности раздела двух вязких несмешивающихся жидкостей (жидкости и плотного газа) естественны условия прилипания (2.37). Кроме того, скорость должна удовлетворять кинематическому и динамическому условиям. Применяя их, когда линия раздела есть прямая, положение которой не изменяется во времени. Из кинематического условия в этом случае на  $\Gamma$  имеем

$$u = 0, \quad (2.39)$$

а из динамического - баланс касательных напряжений

$$\eta^{(1)} \frac{\partial u_s^{(1)}}{\partial n} = \eta^{(2)} \frac{\partial u_s^{(2)}}{\partial n}, \quad (2.40)$$

где  $\eta^{(1)}$  и  $\eta^{(2)}$  - коэффициенты динамической вязкости контактирующих сред. В силу формул (2.32), (2.37), (2.39), (2.40) на прямой  $\Gamma$  можно получить следующие условия для функции тока и завихренности:

$$\psi_\Gamma = \text{const} = 0, \quad \frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial n} = \frac{\partial \psi^{(2)}}{\partial n} \quad \eta^{(1)} \omega_\Gamma^{(1)} = \eta^{(2)} \omega_\Gamma^{(2)} \quad (2.41)$$

С помощью соотношений (2.40) строят приближенные соотношения, которые позволяют с учетом зависимости (2.41) выразить  $\omega_\Gamma^{(1)} = \omega_\Gamma^{(2)}$  в явном виде.

Если жидкость граничит с газом, плотность которого мала, то здесь имеем *свободную поверхность*. Пусть свободная поверхность плоская и стационарная. Тогда для оставляющих скорости жидкости на линии  $\Gamma$  этой границы из кинематического и динамического условий  $u_n = 0$ ,  $\partial u_n / \partial n = v_n$  откуда находим

$$\psi_\Gamma = 0, \quad \omega_\Gamma = 0. \quad (2.42)$$

**Линия симметрии.** Пусть  $\Gamma$  — прямая, являющаяся линией симметрии конвективного движения. Условие симметрии задаются в виде

$$\frac{\partial T}{\partial \eta_\Gamma} = 0, \quad u_{\eta_\Gamma} = 0, \quad \frac{\partial u_n}{\partial \eta_\Gamma} = 0. \quad (2.43)$$

Отсюда в силу (2.32) получаем

$$\frac{\partial T}{\partial \eta_\Gamma} = 0, \quad \psi_\Gamma = \text{const} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial n} \left( \xi \frac{\partial \psi}{\partial n} \right)_{|\Gamma} = 0. \quad (2.44)$$

В случае осесимметричного течения в цилиндрических координатах  $r, z$  линией симметрии является вертикальная ось  $r=0$ . На основании (2.44), уравнений функции тока и завихренности (2.2) на ней должно выполняться

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \psi = 0, \quad \omega = 0. \quad (2.45)$$

При постановке плоских задач конфигурация границы и температурные условия на ней нередко выбираются симметрично относительно средней вертикальной линии  $\Gamma$ . Это позволяет решать задачу только на половине ее области определения, считая  $\Gamma$  частью границы. На линии симметрии  $\Gamma$  правомерны условия для случая декартовых координат  $x, y$ :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \psi = 0, \quad \omega = 0. \quad (2.46)$$

**Особые точки.** Если в неподвижной массе жидкости с постоянной температурой  $T_\infty$  поместить более нагретое твердое тело, в жидкости возникнет конвективное движение. Интенсивность этого движения сравнительно велика лишь вблизи

нагревателя, но быстро падает по мере удаления от него. На бесконечности естественно ожидать  $u=0$  с вытекающими отсюда условиями для функции тока и завихренности:

$$\psi = 0, \quad \omega = 0 \quad (2.47)$$

Вызванные естественной конвекцией возмущения температуры следуют той же тенденции, т. е. на бесконечности они затухают, поэтому температура здесь считается неизменной:

$$T=T_{\infty}. \quad (2.48)$$

При численном решении таких задач расчетная область обычно задается ограниченной, а условия (2.47), (2.48) ставятся на внешней границе этой области, которая выбирается на конечном, хотя и достаточно большом, расстоянии от твердой стенки.

На практике форма границы нередко описывается ломаной линией, состоящей из регулярных кусков, и тогда может возникнуть потребность в дополнительных соотношениях, определяющих  $T$ ,  $\omega$  и  $\psi$  в угловых точках границы.

Рассмотрим угол, образованный двумя регулярными участками границы (стенка — стенка, свободная поверхность — стенка), и пусть на них выполняются условия вида (2.34), (2.37) или (2.43). Следует помнить, что температура в угловой точке должна оставаться непрерывной, удовлетворяя условиям, которые приняты на смежных участках границы. Угловое значение функции тока выбирается таким же, как и на остальной части границы:  $\psi = 0$ .

Обсудим проблему вычисления завихренности в угловой точке. Величину угла  $\gamma$  условимся измерять в сторону жидкости, так что  $0^\circ < \gamma < 180^\circ$  соответствует вогнутым углам, а  $180^\circ < \gamma < 360^\circ$  — выпуклым. Если угол вогнутый и прямой ( $\gamma=90^\circ$ ), из уравнения для функции тока и с помощью (2.37), (2.43) в его вершине легко получить  $\omega = 0$ .

Переходя к косоугольным координатам, можно показать, что это условие справедливо при любых  $0^\circ < \gamma < 180^\circ$ . Существует предположение, что в вершине

выпуклого угла завихренность терпит разрыв и определяется неоднозначно. Поэтому при  $180^\circ < \gamma < 360^\circ$  рекомендуется пользоваться теми же приближенными формулами, что и на регулярных участках стенок, образующих выпуклый угол. Эти формулы дадут два различных угловых значения  $\omega$ . В алгоритме используется как одно, так и другое в зависимости от того, с какой стороны выступа ведется счет.

## 2.6. Оценка применимости математической модели.

Изложенные математические модели формирования стальных изделий нуждаются в сопоставлении с экспериментальными результатами и оценкой адекватности процессам реального производства.

С целью оценки корректности предложенной математической модели и вычислительного алгоритма экспериментальным результатам, был проведен ряд тестовых вычислительных экспериментов, целями которых были:

- определение условий и ограничений, накладываемых на выбор параметров аппроксимации, для обеспечения устойчивости и сходимости выбранной разностной схемы;
- доказательство применимости выбранной методики численной реализации математической модели;
- определение, насколько адекватно математическая модель описывает реальные физические процессы.

## 2.7. Адекватность применения предложенной математической модели

Как показывают численные эксперименты, обеспечить устойчивость задачи для различных вариантов конфигурации слитков и режимов внешних и внутренних воздействий на металл возможно при наложении на шаг по времени ограничения, задаваемого условием Куранта-Фридрихса-Леви [128]:

$$\tau < \frac{h}{|u|}. \quad (2.49)$$

Это условие применяется для явных схем и при больших числах  $Gr$  и  $Re$ , накладывает жесткое ограничение на величину временного шага  $h$  и скорости течения расплава  $u$ . Так, в условиях естественной конвекции для крупных слитков ( $Gr \sim 10^{10}$ ) временной шаг не должен превышать значения  $\tau = 10^{-5}$  (в размерных значениях, согласно критерию Фурье – 0,15 с), что согласуется с данными других авторов [129]. При вынужденной конвекции, когда скорости в области пульсирующей затопленной струи достигают значений  $\sim 1$  м/с, величина временного шага составляет  $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$  (в зависимости от размера слитка). Однако при современных возможностях вычислительной техники данное ограничение не приводит к существенному снижению эффективности программного обеспечения.

При выборе пространственной сетки требовалось выполнение следующего условия для относительной погрешности расчета максимального значения функции тока  $\psi_m$ :

$$\left| \frac{\max \psi_{J2} - \max \psi_{J1}}{\max \psi_{J2}} \right| \leq 0.05, \quad (2.50)$$

где: индексы  $J1, J2$  – число разбиений координат.

Как показали предварительные тестовые расчеты, наиболее оптимальным вариантом для рассматриваемой системы является сетка с количеством узлов  $33 \times 40$ . Установлено, что увеличение числа шагов вдвое приводит к изменению результатов на 3%, при уменьшении числа шагов сетки вдвое сходимость ухудшается, а результаты отличаются более чем на 22%.

В качестве критерия итерационной сходимости разностной схемы использовалась относительная ошибка счета ( $P_\psi$ ) при решении уравнения Пуассона:

$$P_\psi = \max \left| \frac{\psi_{ij}^{s+1} - \psi_{ij}^s}{\psi_{ij}^{s+1}} \right| \leq \varepsilon, \quad (2.51)$$

где:  $s$  – количество итераций;

$\varepsilon$  – точность счета.

В результате тестовых расчетов установлено, что при значении параметра итерации  $\sigma = 0,0001$  и точности счета  $\varepsilon = 0,0001$  уравнение Пуассона сходится за 30 итераций (рисунок 2.11) для этапа вынужденной конвекции. На этапе термогравитационной конвекции число итераций  $N$ , необходимых для достижения итерационной сходимости функции тока (на графике  $P_\psi$ ) равно 16.

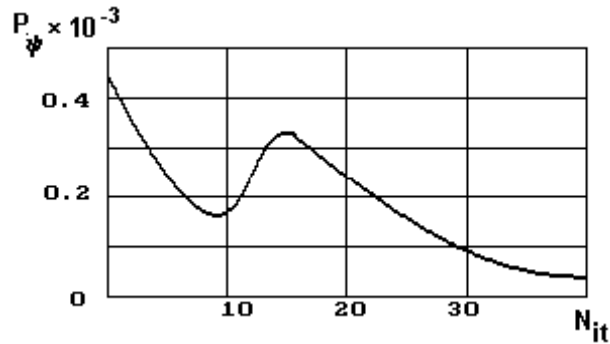


Рисунок 2.11 – Кривая сходимости для уравнения Пуассона.

Чтобы определить диапазон применимости выбранной методики численной аппроксимации (в частности, метода возмущенного оператора с разностью против потока), были выполнены тестовые расчеты некоторых классических задач с использованием разработанной модели и вычислительного алгоритма. В частности, была решена задача тепловой гравитационной конвекции в замкнутой квадратной области с подогревом сбоку. Математическое описание данной физической системы представляет собой систему уравнений, которая замыкается следующими граничными условиями:

$$y = 0, \quad y = 1, 0 \leq x \leq 1, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0; \quad (2.52)$$

$$x = 0, \quad 0 \leq y \leq 1, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad \theta = 1; \quad (2.53)$$

$$x = 1, \quad 0 \leq y \leq 1, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad \theta = 0. \quad (2.54)$$

Расчеты осуществлялись на равномерной сетке размером  $65 \times 65$  (оптимальных для геометрии этой области) для значения  $Pr=0,71$ . На Рисунок 2.12 приведены

полученные результаты расчетов, для значений числа Грасгофа  $Gr=1,25 \cdot 10^4$  и  $Gr=10^5$ .

Видно, что в области образуется циркуляционное течение, перемешивающее жидкость и переносящее тепло от нагретой стенки к холодной, а при увеличении числа Грасгофа до  $10^5$  в ядре появляются вторичные внутренние течения. Данная картина течения совпадает с приведенными в работе [130] результатами численного моделирования, соответствие которых реальным физическим процессам подтверждено экспериментально.

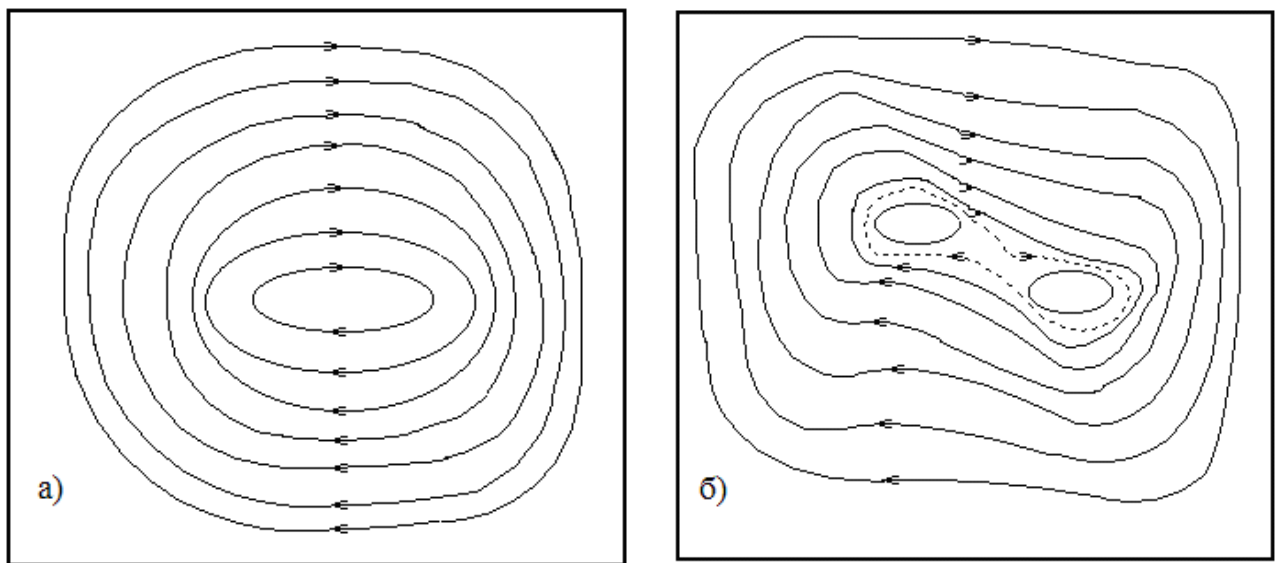


Рисунок 2.12 – Изолинии функции тока при термогравитационной конвекции в квадратной области с боковым подогревом при  $Gr=1.25 \cdot 10^4$  (а) и  $Gr=10^5$  (б).

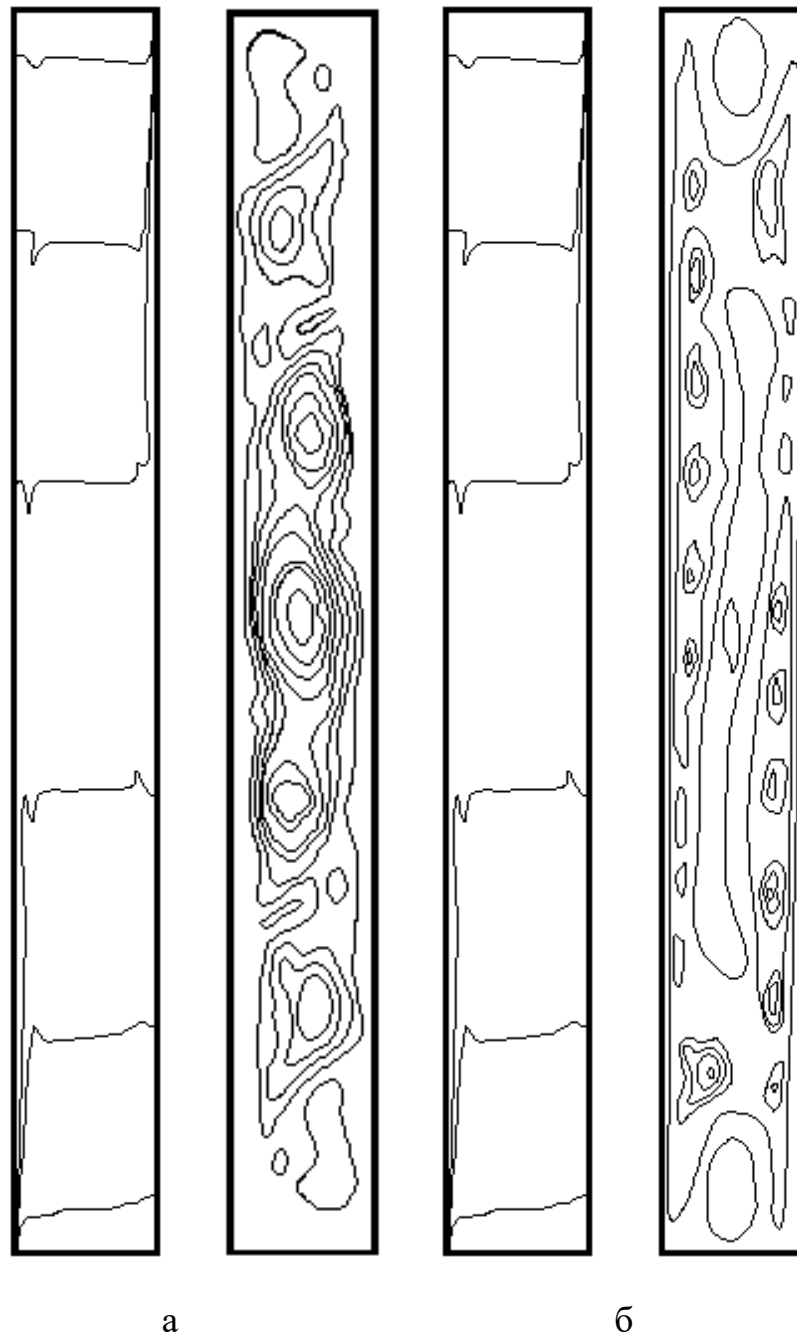


Рисунок 2.13 – Изотермы для безразмерной температуры  $\Theta$  и изолинии функции тока при естественной конвекции в вертикальном слое: а – экспериментальные данные, б – результаты численных исследований.

Также были рассмотрены режимы конвективного течения и теплообмена в вертикальном слое (отношение ширины области к ее высоте  $H/L=20$ ) с фиксиро-

ванным перепадом температур между стенками и теплоизолированными основаниями. Данная задача представляет особый интерес, так как в рассматриваемых условиях достигаются большие значения чисел Gr и Pr, как и в случае затвердевания крупных стальных слитков. Как видно из рисунка 2.13 при  $Pr=15$  и  $Ra=1,5 \cdot 10^9$  возникает система мелких вихрей в пристеночной области, что соответствует данным экспериментальных и численных исследований, выполненных другими авторами [131].

Таким образом, в результате сопоставления установлено, что математическая модель обеспечивает адекватный перенос большинства наблюдаемых на физической модели эффектов в части гидродинамики и теплопереноса.

## 2.8. Адекватность расчетных и экспериментальных данных

Созданные математические модели формирования многослойных композиций сталей использованы для прогнозирования технологических параметров и свойств композиций стали.

При проведении вычислительного эксперимента определялась толщина корки на боковой поверхности слитка в зависимости от времени кристаллизации первого металла, заливаемого с начальной температурой  $1600^\circ\text{C}$ . При этом видно (рисунок 2.14), что после заливки второго металла с температурой  $1570^\circ\text{C}$  наименьшая толщина корочки наблюдается при выдержки металла 5 минут, а наибольшая при 15 минутах. Все графики строились в одно и тоже время.

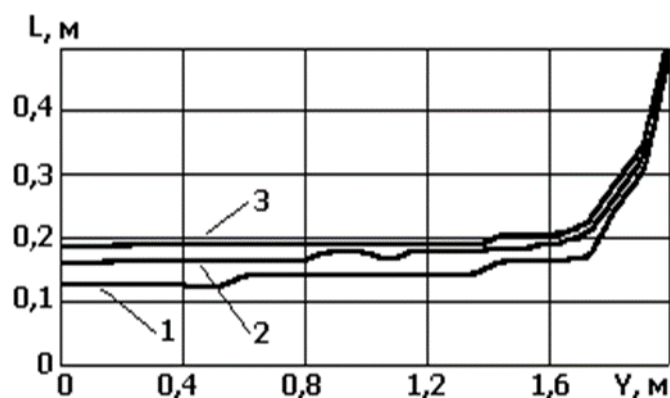


Рисунок 2.14. Изменение толщины корки ( $L$ ) по высоте боковой поверхности изложницы ( $Y$ ) при различной продолжительности выдержки металла: 1- 5 минут; 2- 10 минут; 3- 15 минут после доливки второго сплава.

Размер дендритов в слитке определяли в зависимости от выдержки металла при тех же температурных режимах (рисунок 2.15). Наибольшее влияние гидродинамических и теплофизических процессов на формирование отливки наблюдается при выдержке металла 10 и 15 минут.

Выполненный расчет толщины холодной вставки позволяет оценить геометрические размеры холодной вставки, используемой в двух целях. Для получения многослойной отливки с необходимой толщиной поверхностного слоя и для улучшения качества осевой зоны отливки за счет растворения пластины заливаемым в изложницу металлом.

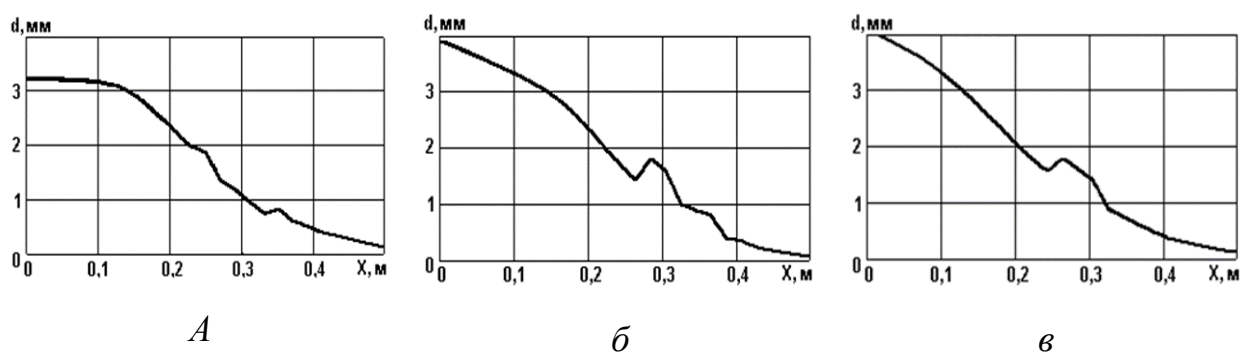


Рисунок 2.15. Размер зерна дендрита ( $d$ ) по ширине слитка ( $X$ ). Интервал выдержки металла до долива сплава второго состава.  
а) – 5 минут; б) – 10 минут; в) – 15 минут.

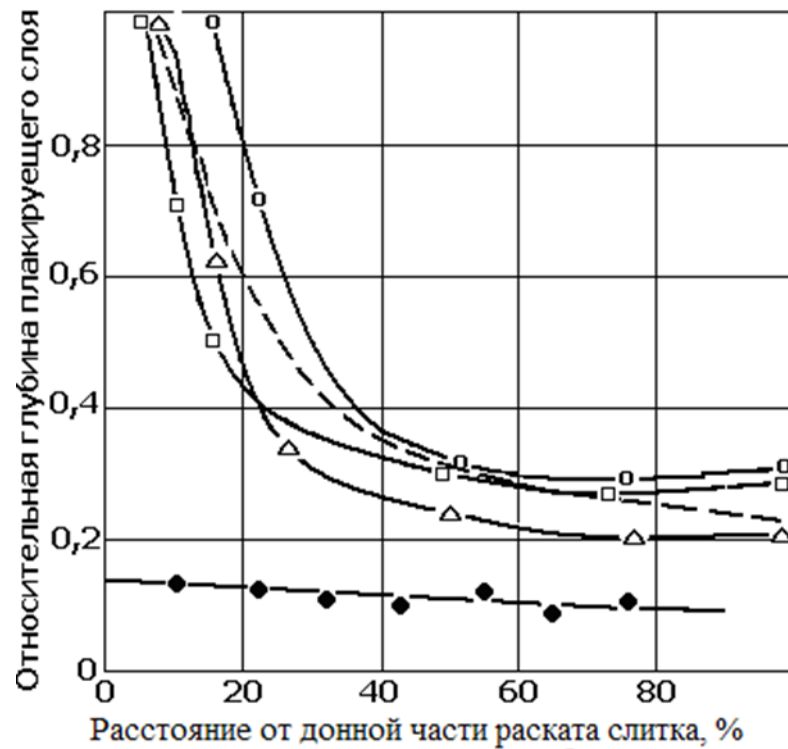


Рисунок 2.16. Изменение толщины плакирующего слоя по длине раската из композиции хромистых сталей при различном времени кристаллизации тела слитка до долива сплава второго состава: ● 7 мин 50 с; Δ - 8 мин 45 с; □ - 11 мин; ○ - 13 мин 15 с; ----- вычислительный эксперимент (время 13 мин 15с).

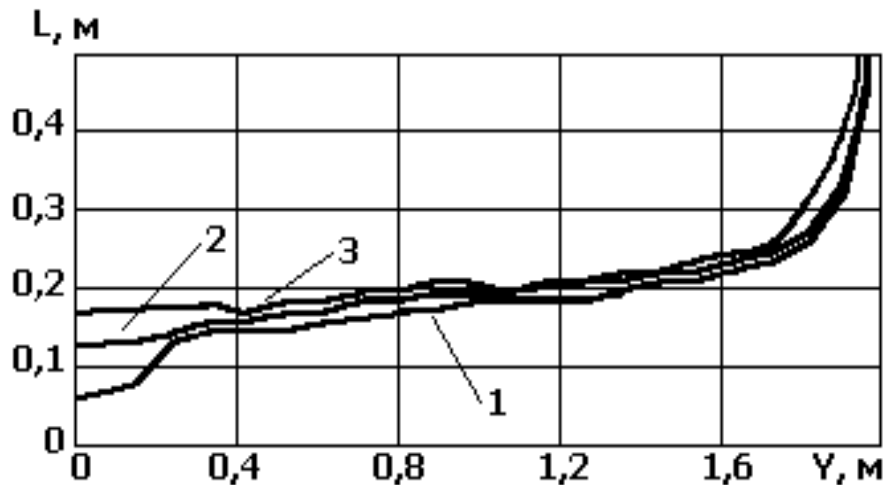


Рисунок 2.17 – Изменение толщины корки (L) по высоте боковой поверхности слитка (Y). Диаметр внутреннего холодильника: 1- 20мм; 2- 40мм; 3- 80мм. Время выдержки после долива 17 минут.

Результаты вычислительного эксперимента и экспериментальные данные изменения толщины поверхностного слоя по длине многослойного раската из композиции хромистых сталей при различном времени затвердевания сплава первого состава до долива второго приведены на рисунке 2.16.

Расчетные зависимости толщины поверхностного слоя удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Погрешность расчета составляет 20%. Полученные данные позволяют рекомендовать математическую модель для прогнозирования толщины поверхностного слоя в зависимости от времени кристаллизации первого сплава до долива сплава второго состава.

## 2.9. Адаптация математической модели для высоких цилиндрических слитков

При формировании высоких тонких слитков (слитки трубной и колесной стали) время активного гидродинамического процесса составляет 20 – 30% от времени всего формирования слитка. При этом можно пренебречь турбулентной составляющей.

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

уравнения Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla \vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \nu \nabla \vec{V} + \vec{g} \beta T; \quad (2.55)$$

уравнения теплопереноса

$$c\rho \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla T) \right] = \nabla \lambda \nabla T; \quad (2.56)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial(rV_z)}{\partial z} = 0; \quad (2.57)$$

где:  $\vec{V}$  – вектор скорости, м/с;

t – размерное время, с;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$P$  – давление, н/м<sup>2</sup>;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$\bar{g}$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения 1/К;

$r, z$  – текущие координаты, м;

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

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности Вт/мК [132].

На основе экспериментальных и теоретических исследований процесса формирования слитков сформулирована математическая модель разлива и кристаллизации слитка, которая основывается на следующих предположениях:

- процесс заполнения изложницы считается симметричным относительно вертикальной оси координат;
- скорость поступления расплава в изложницу  $V_m$  постоянная;
- температура и химический состав по всему объему расплава в начальный момент времени распределены равномерно;
- за характерный размер исследуемой области выбирается полуширина слитка  $X_0$ ;
- поверхность зеркала металла плоская и не возмущена механическим воздействием струи и граница поверхности уровня расплава в изложнице плоская;
- предполагается идеальный тепловой контакт между расплавом и стенкой изложницы в период разлива;
- по окончании разлива между затвердевшей корочкой и изложницей возникает газовый зазор [133];
- коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и кинематический коэффициент вязкости для расплава считаются постоянными;
- изложница предварительно (на 5%) заполнена расплавом (высотой  $H_0$ ), температура которого в начальный момент времени соответствует температуре разливаемого металла;
- величина скорости перемешивания в жидкой части слитка в начальный момент времени равна нулю;
- струя разливаемого расплава идеально организована;
- уравнение гидродинамики записывается в приближении Буссинеска.

Предварительные расчеты показали, что в объеме усадочной раковины значение числа  $Re$  не превышает 500, что значительно меньше порога турбулентности для цилиндрических слитков. Поэтому влиянием турбулентности можно пренебречь.

С учетом этих предположений краевые условия формируются следующим образом:

начальные условия

$$\begin{aligned} t = 0: \quad V_r = V_z = 0; \\ T_{\left| \begin{smallmatrix} 0 \leq r \leq l_r \\ 0 \leq z \leq l_z \end{smallmatrix} \right.} = T; \quad T_{\left| \begin{smallmatrix} l_r \leq r \leq l'_r \\ l_z \leq z \leq l'_z \end{smallmatrix} \right.} = T_{изл}, \end{aligned} \quad (2.58)$$

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:

$$r = 0; \quad V_r = 0; \quad \frac{\partial V_z}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (2.59)$$

$$z = H; \quad V_r = 0; \quad V_z = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (2.60)$$

$$r = L_r; \quad V_r = 0; \quad V_z = 0; \quad \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{ж} = \lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{из}; \quad T_{ж} = T_{из}; \quad (2.61)$$

$$r = L_z; \quad V_r = 0; \quad V_z = \begin{cases} V_m, & 0 \leq r < R \\ 0, & R \leq r \leq L_z \end{cases}; \quad T = \begin{cases} T_0, & 0 \leq r < R \\ \lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{ж} = \lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{из}; T_{ж} = T_{из}; & R \leq r \leq L_z \end{cases}. \quad (2.62)$$

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:

$$\lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r}|_{из} = -\alpha_6 (T - T_{cp}); \quad (2.63)$$

на поддоне:

$$\frac{\partial T}{\partial z}|_{из} = 0, \quad (2.64)$$

где  $\alpha_6$  – 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 (2.59) – (2.62) не изменяются, а граничные условия (2.63) преобразуются к виду:

$$z = L_z; \quad V_r = 0; \quad V_z = 0; \quad T = \lambda_{жс} \frac{\partial T}{\partial r}|_{жс} = \lambda_{из} \frac{\partial T}{\partial r}|_{из}; \quad T_{жс} = T_{из}. \quad (2.65)$$

## 2.10. Методы решения уравнений теплопроводности и гидродинамики

Уравнения (2.55) и (2.57) могут быть решены различными методами:

- в естественных переменных скорость ( $u, v$ ) – давление ( $p$ );
- в переменных вихрь ( $\omega$ ) – функция тока ( $\psi$ ).

Сравнительные достоинства методов ( $\omega - \psi$ ) и ( $u, v, p$ ) зависят от решаемой задачи. Главную роль всегда играет опыт предшествующих расчетов, но при выборе системы уравнений видим, что в большинстве случаев (за исключением задач со свободной поверхностью или задач о движении жидкостей с поверхностями раздела) целесообразно брать ( $\omega - \psi$ ) – систему [134].

Если не требуется находить нестационарное решение для давления, то в ( $\omega - \psi$ ) – системе приходится решать одно уравнение переноса вихря параболического типа и одно уравнение для функции тока эллиптического типа с условиями Дирихле на некоторых (возможно на всех) границах. В ( $u, v, p$ ) – системе надо решать два уравнения переноса количества движения, имеющих параболический тип, и

одно уравнение эллиптического типа для давления с граничными условиями Неймана на всех границах.

При решении уравнения переноса вихря  $\omega$  необходимо дополнительно выполнить операцию дифференцирования функции тока  $\psi$  для нахождения составляющих скорости. Решать уравнение переноса вихря  $\omega$  можно по неявным схемам, хотя при этом может потребоваться дополнительный итерационный процесс для неявного вычисления значений  $\omega^{n+1}$  на стенках ковша при условии прилипания. В случае же  $(u, v, p)$  – системы значения  $u^{n+1}$  и  $v^{n+1}$  известны точно в течение всего времени, но здесь существует трудность, связанная с неустойчивостью из-за нелинейности. Достижение итерационной сходимости при решении уравнения давления  $p$  эллиптического типа требует значительно больше времени, чем при решении эллиптического уравнения для функции тока. Это объясняется различием граничных условий.

Сравним эти две системы для случая, когда нужно получить нестационарную картину линий тока. В случае  $(\omega - \psi)$  – системы линии тока  $\psi = \text{const}$  строятся с помощью простой интерполяции. В случае же  $(u, v, p)$  – системы они определяются интегрированием, причем наиболее точный способ состоит в решении уравнения Пуассона.

Таким образом, при решении двумерного уравнения с условиями прилипания и непроницаемости на всех границах, предпочтительней использовать  $(\omega - \psi)$  – систему, которая зарекомендовала как быстросходящаяся и имеющая высокий уровень аппроксимации.

Для перехода в систему  $(\omega - \psi)$ , осуществляется операция «rot», после чего уравнение Навье-Стокса переписывается в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial r} + \frac{\partial v \omega}{\partial z} - \frac{u}{r} \omega = \nu \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} - \frac{\omega}{r^2} \right] - \bar{g} \beta \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (2.66)$$

Функция тока представлена в следующем виде:  $u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ ,  $v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$ .

$$\text{Уравнение Пуассона } \omega = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}. \quad (2.67)$$

С учетом этих преобразований изменяется уравнение теплопереноса

$$c\rho \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial}{\partial r} (T\omega) + \frac{\partial}{\partial z} (T\omega) \right) \right] = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]. \quad (2.68)$$

Краевые условия для гидродинамики, так же преобразуются.

$$t = 0: \quad \omega = \psi = 0;$$

| Коор-<br>динаты | Условия при заливке                                         | Условия при затверде-<br>вании                              |        |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
| $r = 0;$        | $\psi = 0; \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0;$ | $\psi = 0; \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = 0;$ | (2.69) |

|          |                                                                           |                                                         |        |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|
| $z = H;$ | $\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0; \quad \psi = \frac{V_m R}{L_r} r;$ | $\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0; \quad \psi = 0;$ | (2.70) |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|

|            |                                                             |                                                         |        |
|------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|
| $r = L_r;$ | $\psi = V_m R; \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0;$ | $\psi = 0; \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0;$ | (2.71) |
|------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|

|            |                                                                                                                                                                                                 |        |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| $z = L_z;$ | $\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0; \quad \psi = \begin{cases} V_m r, & 0 \leq r < R \\ V_m R, & R \leq r \leq L_z \end{cases}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0; \quad \psi = 0.$ | (2.72) |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|

Введем безразмерные переменные следующим образом:

$$\begin{aligned} x = x/X_0; \quad y = y/X_0; \quad V_0 = a_{ж}/X_0; \quad V_y = v_y/V_0; \\ V_x = v_x/V_0; \quad a_{ж} = \lambda_{ж}(c_{ж} \rho_{ж}); \quad \theta = T/T_0. \end{aligned} \quad (2.73)$$

Переход к безразмерным величинам, позволяет решать не просто конкретную задачу, а целый класс такого рода задач.

Учитывая соотношения (2.73) в уравнениях (2.66) и (2.67), получаем систему критериальных уравнений

$$\frac{\partial \omega}{\partial F_0} + \frac{\partial \omega v_r}{\partial r} + \frac{\partial \omega v_z}{\partial z} = \text{Pr} \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial z} \right] - \text{Pr}^2 Gr \frac{\partial T}{\partial r}; \quad (2.74)$$

$$c\rho \left[ \frac{\partial \theta}{\partial Fo} + \theta \frac{\partial \omega}{\partial r} + \theta \frac{\partial \omega}{\partial z} \right] = \lambda \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]. \quad (2.75)$$

где:  $Fo$ ,  $Pr$ ,  $Gr$  – критерии Фурье ( $at/x_0^2$ ), Прандтля ( $\nu/a$ ), Грасгоффа ( $g\beta\Delta T x_0^3/\nu^2$ ).

$a$  – коэффициент температуропроводности,

$\Delta T$  – температурный перегрев.

Краевые условия для уравнений гидродинамики остаются в виде, представленном зависимостями (2.69) - (2.72). Что же касается краевых условий для температуры, то с учетом выражений (2.73) они запишутся в виде:

$$Fo=0 : \theta \Big|_{\substack{0 \leq x \leq l \\ 0 \leq y \leq l_y}} = \theta; \quad \theta \Big|_{\substack{l_x \leq x \leq l'_x \\ l_y \leq y \leq l'_y}} = \theta_{изл} \quad (2.76)$$

$$r = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0; \quad (2.77)$$

$$z = H; \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0; \quad (2.78)$$

$$r = L_r; \quad \lambda_{жс} \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{жс} = \lambda_u \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_u; \quad \theta_{жс} = \theta_u; \quad (2.79)$$

$$z = L_z; \quad \theta = \begin{cases} \theta_0, & 0 \leq r < R \\ \lambda_{жс} \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{жс} = \lambda_u \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_u; \theta_{жс} = \theta_u, & R \leq r \leq L_z \end{cases}. \quad (2.80)$$

на внешней стенке изложницы:  $\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_u = -Bi(\theta - \theta_{cp});$

на поддоне:  $\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_u = 0.$

здесь  $\theta = T/T_0$  – безразмерная температура,

$T_0$  – начальная температура расплава.

### 2.11. Метод конечных разностей

При решении многих задач переноса сплошной среды, невозможно применить аналитические методы к системе дифференциальных уравнений в частных производных, что обусловлено нелинейностью и многомерностью. Это касается и ряда задач, решаемых в физике твердого тела. Наиболее приемлемым методом решения уравнений переноса, применяемым для широкого класса задач гидродинамики, является метод конечных разностей (метод сеток). Сущность его состоит в том, что область непрерывного изменения аргумента заменяется конечным дискретным множеством точек (узлов), образующих пространственно-временную разностную сетку. Функция непрерывного изменения аргумента рассматривается как сеточные функции дискретного аргумента, определенные в узлах сетки. Все рассматриваемые дифференциальные уравнения и краевые условия заменяются их конечно-разностными аналогами. В результате нелинейные дифференциальные уравнения заменяются нелинейными алгебраическими уравнениями. Такую систему называют разностной задачей или разностной схемой. Таким образом, процедура численного решения состоит из трех основных этапов:

- на выбранной сетке производится аппроксимация дифференциальных уравнений и краевых условий, в результате которой строится разностная схема – дискретный аналог исходной задачи;
- выбирается метод решения полученной нелинейной разностной задачи и конструируется алгоритм;
- программная реализация полученного алгоритма на ЭВМ.

При построении разностной сетки, следует учитывать конфигурацию расчетной области, особенности выбранной системы координат. Число узлов в сеточной области определяется требованиями к точности решения в соответствии с техническими возможностями ЭВМ.

В общем случае пространственно-временную разностную сетку можно записать следующим образом [135–137]:

$$\omega_\tau = \sum_{n=0}^N \tau_n; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N;$$

$$\omega_h = \begin{cases} r = \sum_{i=0}^I h_i; & i = 0, 1, 2, \dots, I; \\ z = \sum_{j=0}^J h_j; & j = 0, 1, 2, \dots, J, \end{cases} \quad (2.81)$$

где:  $N, I, J$  – число разбиений по времени, по координате  $r$  и по координате  $z$ ;

$n, i, j$  – номер временного, пространственного по  $r$  и пространственного по  $z$  шагов.

Для практического использования разностных схем необходимо сформулировать общие принципы получения схем заданного качества, среди которых наиболее важным является консервативность. Конечно-разностный аналог будет консервативен в том случае, если он обеспечивает выполнение физических законов сохранения в пределах введенной разностной сетки.

Консервативная разностная схема может быть получена путем применения интегро-интерполяционного метода, разработанного А.А.Самарским [128].

## 2.12. Метод расчета усадочной раковины

Процессы охлаждения и кристаллизации металла, как правило, сопровождаются уменьшением его объема, т.е. усадкой. В слитках это приводит к образованию усадочных раковин и усадочных дефектов (рыхлостей, пористости и т.д. в различных объемах тела слитка в зависимости от условий теплоотвода). Они образуются в местах, в которых металл застывает в последнюю очередь. При конструировании слитков стараются сконцентрировать усадочную раковину в определенном месте, как правило, в головной части слитка (прибыльной части), которая в дальнейшем отделяется от здорового металла и идет в обрезь.

Различают открытую усадочную раковину, которая сообщается с атмосферой без перекрытия ее мостом металла, и закрытую, отделенную от атмосферы мостом металла. Схемы к расчету размеров таких раковин приведены на рисунке 2.18. Нас интересуют размеры открытой усадочной раковины в слитке. Такие раковины образуются либо при разливке стали сифонным способом под теплоизолирующей смесью (наш случай), либо при скоростной разливке стали сверху с последующим закрытием зеркала металла теплоизолирующими смесями.

Уменьшение объема кристаллизующегося сплава принято характеризовать коэффициентом объемной усадки (объемного сжатия)  $n = \rho_{\text{т}}/\rho_{\text{ж}} - 1 = 0,11$  ( $\rho_{\text{т}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$  – соответственно плотности твердой и жидкой фаз металла). Расчет усадки производится в процессе кристаллизации слитка как изменение объема жидкого металла в объеме прибыльной вставки, а глубина усадочной раковины – как разность ординат уровня налива и минимального расчетного уровня профиля усадочной раковины.

При расчете от начального уровня налива жидкого металла каждому моменту времени в процессе затвердевания слитка соответствует уровень жидкого металла в прибыльной части, понижающийся за счет расходования жидкого металла на питание усадки. Точка пересечения фронта кристаллизации с уровнем жидкого металла дает координату профиля усадочной раковины.

Рассмотрим схему расчета величины усадочной раковины на примере двухмерной задачи. В этом случае ось  $Oy$  располагают по оси слитка, а ось  $Ox$  по уровню налива металла (рисунок 2.18, а).

Объем затвердевшего металла при решении двухмерной задачи соответствует площади, ограниченной внешней границей слитка и границей фронта кристаллизации.

Пусть линия  $A_0A_1A_4$  отражает положение фронта кристаллизации в момент времени  $\tau_1$ . координаты ее характеризуются координатами точек  $\varepsilon_1$ ,  $h_1$ , определяемыми на основании решения уравнения теплопередачи при условии нахождения в

точке 90 % твердой фазы. Положение нижней точки  $A_4$  линии характеризует глубину жидкой лунки от уровня налива ( $l_1$ ).

На образование твердой фазы между внешней границей слитка и границей фронта кристаллизации (линия  $A_0A_1A_4$ ) в количестве  $V_{ТМ1}$  затрачивается объем жидкого металла  $\Delta V_{ж1}$ , равный  $\Delta V_{ж1} = V_{ТМ1} \rho_T / \rho_{ж}$ . Тогда усадка расплава составит:  $\Delta V_1 = V_{ж} - V_{ТМ1} \cdot (\rho_T / \rho_{ж} - 1)$ . Отсюда ордината точки  $A_1$  или опустившийся в избыточной части вследствие питания усадки уровень жидкого металла  $h_1$  определится из выражения  $h_1 = \Delta V / \varepsilon_1 / x_0$  ( $x_0$  – характерный размер).

В момент времени  $\tau_2$  фронт кристаллизации переместится в положение, определяемое линией  $A_0A_2A_3$ . Объем затвердевшего металла в этом случае соответствует площади, ограниченной кривой  $A_0A_1A_2A_3$  и внешней границей слитка. При этом точка  $A_3$  характеризует глубину жидкой лунки от уровня налива ( $l_2$ ).

На образование твердой фазы металла объемом  $V_{ТМ}$  так же, как и в предыдущем случае, затрачивается объем жидкого металла  $V_{ж2} = V_{ТМ2} \rho_T / \rho_{ж}$ . тогда усадка расплава за промежуток времени  $\tau_2$  от начала затвердевания составит  $\Delta V_2 = V_{ж} - V_{ТМ2} \cdot (\rho_T / \rho_{ж} - 1)$ , а уровень жидкого металла  $h_2$  определится из выражения  $h_2 = \Delta V_2 / \varepsilon_2 / x_0$  ( $x_0$  – характерный размер).

Усадка каждого последующего расчетного цикла затвердевания определяется аналогично. При этом после каждого последующего цикла расчета величина  $l_i$  – уменьшается, а  $h_i$  – увеличивается, двигаясь навстречу друг другу.

На последнем расчетном этапе затвердевания эти величины совпадают, определяя, таким образом, глубину открытой усадочной раковины.

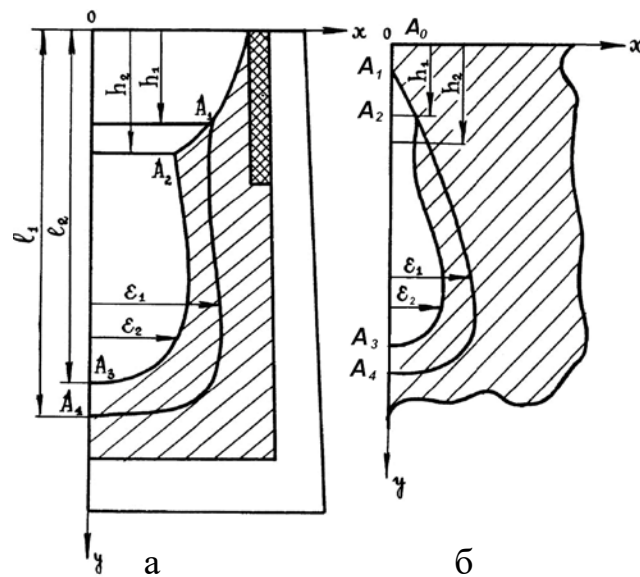


Рисунок 2.18 – Схема к расчету открытых (а) и закрытых (б) усадочных раковин

Для расчета закрытой усадочной раковины начало координат помещается в точку смыкания боковых фронтов (границ питания) слитка (точка  $A_4$ ) (рисунок 2.18, б). При этом методика расчета остается такой же, как и для открытой усадочной раковины. Влияние конвективного теплопереноса при образовании открытой усадочной раковины сказывается в опускании ее поверхности, исключая осевую часть раковины.

В период наиболее активного движения расплава из осевых зон тела слитка восходящими конвективными потоками осуществляется полная компенсация потерь тепла прибылью через вкладыши, а после снижения ее интенсивности – частичная. Это сдерживает рост от вкладышей твердой корочки и приводит к образованию характерной кромки по периферии открытой усадочной раковины.

Размеры закрытой усадочной раковины зависят от объема незатвердевшего металла, заключенного в полости ниже точки смыкания.

### 2.13. Выводы по разделу 2

Исследована обобщенная математическая модель гидродинамических и тепломассообменных процессов в системе слиток - окружающая среда, предложенная донецкой школой моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических процессах.

Рассмотренная модель адаптирована для расчета разливки и формирования расширенных книзу бесприбыльных слитков трубной стали и круглых слитков колесной стали, разливаемой в чугунные и стальные изложницы. Модель базируется на системе нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики, теплопереноса, описывающих процессы передачи импульса и тепла в расплаве. Тепловые эффекты плавления и кристаллизации учитываются с помощью квазиравновесной двухфазной зоны. Турбулентные явления не учитываются в данной постановке задачи ввиду особенности геометрии области слиток – изложница – окружающая среда.

### 3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данном разделе описывается метод проектирования программного обеспечения, разработанный для моделирования задач тепломассопереноса при разливке и формирования стальных слитков, но который может быть при необходимости модифицироваться и для других видов математических задач. Результатом работы для разработчика можно считать компиляцию исполнимых файлов для расчета какой-либо конкретной задачи тепломассопереноса. В дальнейшем полученный пакет программ можно как поставлять конечным пользователям (например, заказчикам на металлургическом производстве или в другой отрасли производства или науки), так и самостоятельно использовать для расчетов.

В работе [138], посвященной обсуждению ресурсоэнергетических проблем черной металлургии, отмечается: отечественный и зарубежный опыт убедительно доказывает, что развитие предприятий металлургического комплекса, его техническое перевооружение, решение проблем качества и конкурентоспособности металлопродукции на мировом рынке требуют коренного совершенствования систем сбора, хранения, обработки, передачи и использования информации, применяемых как для управления технологическими процессами, так и управления производством в целом.

Следует отметить, что анализ в целом состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике технологии ведения доменной плавки показывает, что в настоящее время разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и реальными возможностями используемого программного обеспечения огромен. В связи с этим следует выделить научные и технические проблемы, первостепенными из которых являются: использование современных достижений в области математического моделирования, моделирования знаний, распознавания образов, теории и практики доменной плавки, теории управления при

разработке автоматизированных систем управления; разработка на основе современных принципов соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения; создание интегрированных интеллектуальных компьютерных систем поддержки принятия решений для управления металлургическим комплексом. Решение этих проблем возможно только при наличии финансовых средств, интеграции интеллектуальных ресурсов вузов, научно-исследовательских и проектных институтов, металлургических предприятий.

### 3.1. Автоматизация проектирования программного обеспечения

В данном параграфе рассматривается проектирование программного обеспечения, предназначенного для решения задач гидродинамики и тепломассопереноса в металлургическом производстве. Выделение конкретной области проектирования (металлургии), объясняется сложностью не только решаемой задачи, но и особым требованиям к визуализации полученных результатов.

При проектировании описываемой системы ставится двойная цель: удобство и простота пользования расчетной программой для конечного пользователя и максимальная эффективность для разработчика математической модели. Для этого представляется логичным разделить непосредственно расчет задачи и интерфейсную часть программы, а также из расчета выделить некую абстрактную общую для всех задач тепломассопереноса и затвердевания часть и составляющую, относящуюся только к решению текущей конкретной задачи [21, 30, 34]. При этом получаем следующие преимущества:

- разработчик может сосредоточиться только на разработке математической модели, что экономит время на создание программы;
- общую расчетную и интерфейсную часть можно реализовать в виде отдельных динамических библиотек, что сэкономит оперативную и дисковую память компьютера;
- независимые интерфейсные библиотеки можно совершенствовать, не переписывая расчетное ядро;

- оставляя неизменной интерфейсную часть, можно варьировать в самых широких пределах математическую модель, на которой основано вычислительное ядро.

Реализовывать вышесказанное предлагается в виде использования независимых программных модулей:

- непосредственного расчета математической модели задачи;
- абстрактной (общей) задачи;
- модуль, который осуществляет связь между двумя первыми;
- интерфейсные модули, отвечающие за ввод-вывод данных и взаимодействие с пользователем.

Взаимодействие между модулями показано на рисунке 3.1.

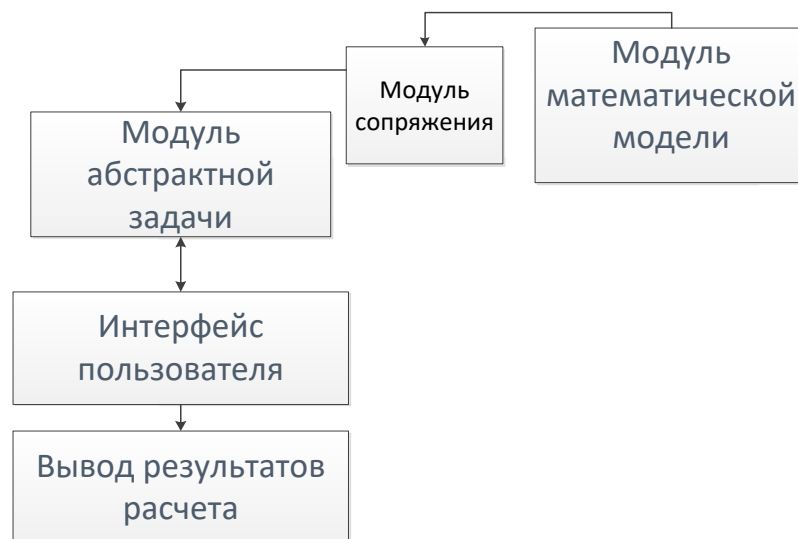


Рисунок 3.1 – Взаимодействие программных модулей

При этом процесс расчета можно представить как отдельный объект, который может создаваться (выделять для себя оперативную память), уничтожаться (освобождать память), записывать свое состояние на диск и считывать его и выполнять собственно расчет задачи. Отсюда следует логичность применения объектно-ориентированного подхода [139–142].

В настоящее время можно выделить четыре наиболее развитых и распространенных объектно-ориентированных языка программирования: Java, C# (идеологи-

чески и синтаксически похожий на Java), C++ и Delphi (Object Pascal) [143]. Проведем небольшое сравнение с целью выбрать из них наиболее подходящий для описываемых вычислительных задач.

Языки программирования можно оценить по тому, насколько они строги к типам. Контроль типов включает проверку существования вызываемых методов, типов их параметров, проверку границ массивов и т.д. C++, Java, и Object Pascal предпочитают более или менее широкий контроль во время компиляции. C++, возможно, наименее точен в этом отношении, тогда как Java использует проверку типов наиболее широко.

Ещё одно различие лежит между чистыми и гибридными объектно-ориентированными языками. Среди трех сравниваемых языков только Java является чистым объектно-ориентированным языком. C++ и Delphi, наоборот, - типичные примеры гибридных языков, которые позволяют программистам использовать при необходимости традиционный подход C или Pascal. Этот подход делает более простым написание расчетных подпрограмм и позволяет без особых усилий использовать их повторно в других проектах.

Третий элемент, по которому различаются языки ООП - их объектная модель. Некоторые традиционные языки ООП позволяют программистам создавать объекты в стеке, в куче (в хипе - heap) или в статической памяти. В этих языках переменная типа класс соответствует объекту в памяти. Так работает C++.

В ссылочно-объектной модели каждый объект динамически размещается в куче (heap), а переменная типа класс фактически является ссылкой или хэндлом объекта в памяти (технически это нечто вроде указателя). Java и Delphi используют эту ссылочную модель.

Важное различие между тремя языками заключается в организации исходного кода в файлах. Все три языка используют файлы в качестве стандартного механизма для запоминания исходного кода классов, но компилятор C++, в отличие от Delphi или Java, не понимает файлов. Эти же два языка работают с идеей модулей, хотя называют их по-разному.

В С++ программист обычно помещает определение класса в файл объявлений, а определение методов - в отдельный файл кода. Обычно у этих двух файлов одинаковые имена и различные расширения. Компилируемый блок, как правило, ссылается (включает в себя) на свой файл объявлений и на файлы объявлений тех классов (или функций), на которые ссылается код. Это значит, что линкеру предстоит большая работа, потому что компилятор не может знать, в каком другом модуле может быть определен нужный метод.

В Object Pascal каждый файл исходного кода называется `unit`, и он делится на две части: интерфейс и исполнение, отмечаемые соответственно ключевыми словами `interface` и `implementation`. Секция интерфейса включает в себя определения классов (с объявлениями методов), а секция исполнения должна включать в себя определения методов, объявленных в интерфейсе. Писать фактический код в секции интерфейса нельзя. Можно сослаться на объявления другого файла, используя предложение `uses`. Этим включается в компиляцию интерфейс нужного файла. Сборка программы обычно происходит в несколько раз быстрее, чем на С++.

В Java каждый файл исходного кода или единица компиляции компилируется отдельно. Затем можно отметить группу единиц компиляции как части одного пакета. В отличие от двух других языков, весь код методов пишется тут же при объявлении класса. При включении какого-либо файла предложением `import`, компилятор читает только `public` объявления, а не весь код.

Другим важным отличием Java и Delphi является их способность читать откомпилированные файлы и извлекать из них определения, как бы извлекая заголовки из скомпилированного кода. С другой стороны, для преодоления отсутствия модулей С++ включает пространство имен (`namespace`). В Java и Delphi, когда два имени конфликтуют, можно использовать имя модуля в качестве префикса. Это не требует дополнительной работы по определению пространств имен, а просто включено в языки.

Есть еще свойства, специфичные только для одного из трёх языков. Так, в С++ есть ещё перегрузка операторов, тогда как перегрузка методов присутствует

также в Java и в Object Pascal. C++ позволяет программистам перегружать и глобальные функции. Некоторые специфические черты Object Pascal: ссылки на классы, легкие для использования указатели на методы (основа модели обработки событий) и, в частности, свойства (property). Свойство - это просто имя, скрывающее путь, которым можно получить доступ к данным или методу. Свойство может проецироваться на прямое чтение или запись данных, а может ссылаться на метод, обеспечивающий доступ. Даже если поменять способ доступа к данным, при этом не нужно менять вызывающий код (хотя нужно будет его перекомпилировать). Это делает свойства очень мощным средством инкапсуляции.

Таким образом, сравнив основные характеристики, мы видим: хотя, как языки, так и их среда копируют характеристики друг друга, они были сконструированы для разных потребностей. Цель C++ – мощность и контроль за счет сложности. Целью Delphi является легкое, визуальное программирование (не отказываясь от мощности) и прочная связь с Windows. Цель Java – мобильность, даже за счет некоторого отказа от скорости, и распределённые приложения или исполняемое содержание веб-сайтов.

Поэтому в качестве основного языка программирования был принят Delphi. Не исключается также применение программных вставок на языках assembler и c.

Была разработана система проектирования прикладного программного обеспечения для задач металлургического производства. Основные компоненты приведены в таблице А.1.

Рассмотрим физическое представление модели на примере проекта задачи моделирования слитков колесной стали. На рисунке 3.2 изображена схема взаимодействия основных библиотек, которые используются в проекте. Файлы, помеченные номерами от 1 до 3, относятся к программному модулю «Задача». Пометки 4-7 относятся к модулю математической модели. Файл Convert (8) содержит модуль сопряжения. Номера 9-19 принадлежат графическому интерфейсу пользователя и выводу результатов расчета.

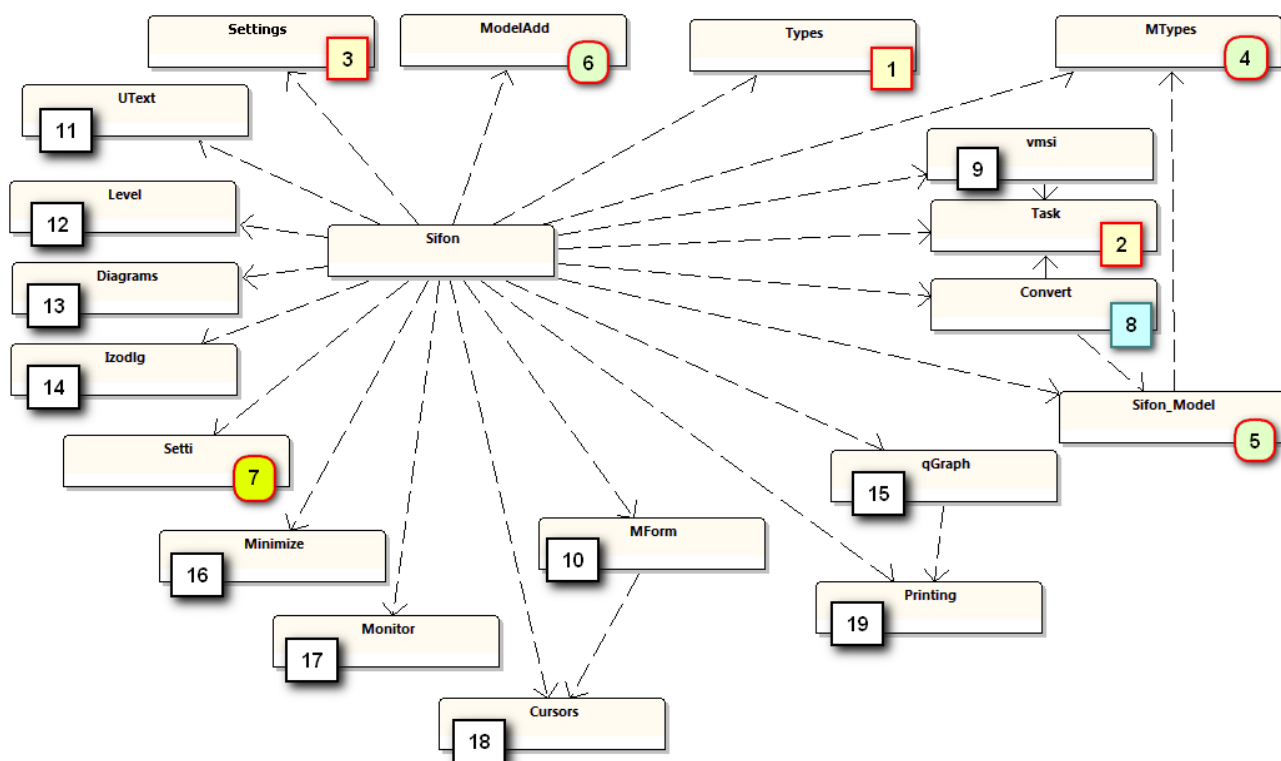


Рисунок 3.2 – Схема взаимодействия библиотек

### 3.2. Базовый класс «Задача»

Схема работы программного модуля «Задача» представлена на рисунке 3.3.

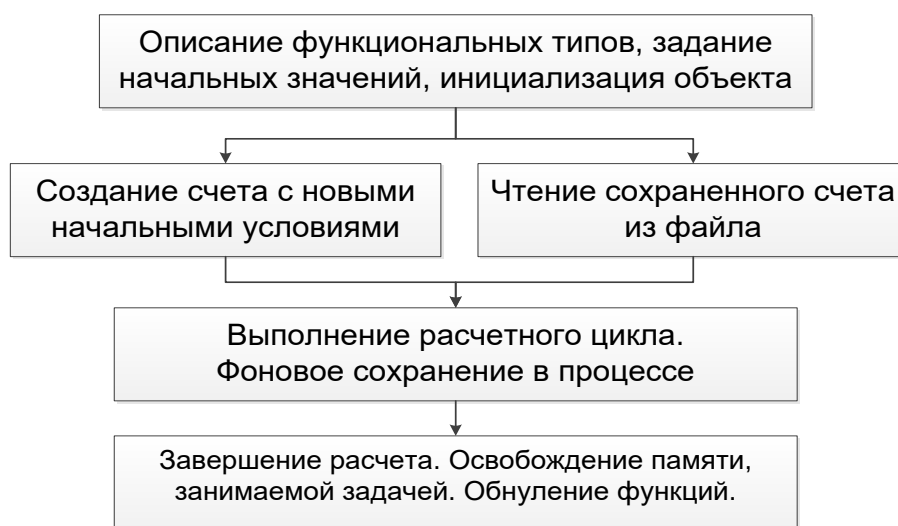


Рисунок 3.3 – Схема работы модуля «Задача»

Библиотека «Types» (Рисунок 3.2, 1) содержит описания функциональных (процедурных) типов, преобразование стандартных типов для удобства, некоторые общие константы и битовые маски.

Юнит «Task» содержит класс «Задача», в который входят свойства в виде переменных функциональных типов, описывающие общие параметры задач переноса и затвердевания (такие как массив температур, скоростей, доли твердой фазы и т.п.) и методы, отвечающие за выполнение общих этапов расчета.

Цель класса «Задача» - инкапсуляция действий, общих для любой расчетной задачи. Предполагаем, что процесс происходит следующим образом. Прикладная программа находится в режиме ожидания следующих возможных действий: команды нового расчета; просмотра сохраненных результатов; закрытия программы.

Если пользователь дает команду начать или продолжить расчет: создается соответствующий объект – переменная класса «Задача»; инициализируются начальные значения для расчета или считывается ранее сохраненное состояние; выполняется главный расчетный цикл до тех пор, пока не выполняются условия завершения вычислений или не поступит команда пользователя на остановку; во время выполнения цикла необходимо обеспечить фоновое сохранение состояния, вывод результатов и взаимодействие с пользователем; по завершении расчета происходит уничтожение соответствующего объекта с сопутствующим освобождением памяти и «обнулением» адресов функций; программа возвращается в состояние ожидания.

Если конечный пользователь программы дает команду просмотра сохраненных результатов: создается соответствующий объект – переменная класса «Задача»; загружается ранее сохраненное состояние; различные варианты расчетов загружаются необходимое пользователю количество раз; по команде пользователя завершить просмотр происходит уничтожение объекта с сопутствующим освобождением памяти и «обнулением» адресов функций; программа возвращается в состояние ожидания.

Происходит выполнение описываемого расчетного модуля в отдельном потоке ОС Windows, что позволяет полноценно использовать современные многоядерные и многопроцессорные компьютерные системы, в частности, повышает отзывчивость пользовательского интерфейса во время расчета [144–146].

К программному модулю «Задача» можно отнести и юнит «Settings» (Рисунок 3.2, 3). С его помощью можно настроить некоторые параметры выполнения программы: приоритет расчета, время автоматического обновления экрана данных, контрольное время счета и т.д.

### 3.3. Библиотека подпрограмм «Математическая модель»

Математические модели, описанные в разделе 2, являются основой для расчетного алгоритма, который реализуется в модуле математической модели. В отличие от описанного выше модуля абстрактной задачи, изменение которого запрещено, здесь весь программный код пишет разработчик расчетной модели. Поэтому этот модуль спроектирован таким образом, чтобы от составителя алгоритма не требовались глубокие знания в области объектно-ориентированного программирования. В рамках данной библиотеки подпрограмм не требуется разрабатывать никаких сложных процедур ввода-вывода или интерфейсных элементов, но настоятельно рекомендуется ввод начальных условий организовать в виде отдельных подпрограмм. Кроме того, обязательно должна присутствовать подпрограмма, в которой описывается один шаг по времени главного расчетного цикла. Также необходимы подпрограммы, сохраняющие основные расчетные массивы на жестком диске.

На рисунке 3.4 приведена блок-схема расчета. На практике описываемый модуль представляет собой один или несколько юнитов языка Delphi или библиотек языка C. В данном примере на рисунке 3.2 к нему относятся файлы с отметками 4-7.

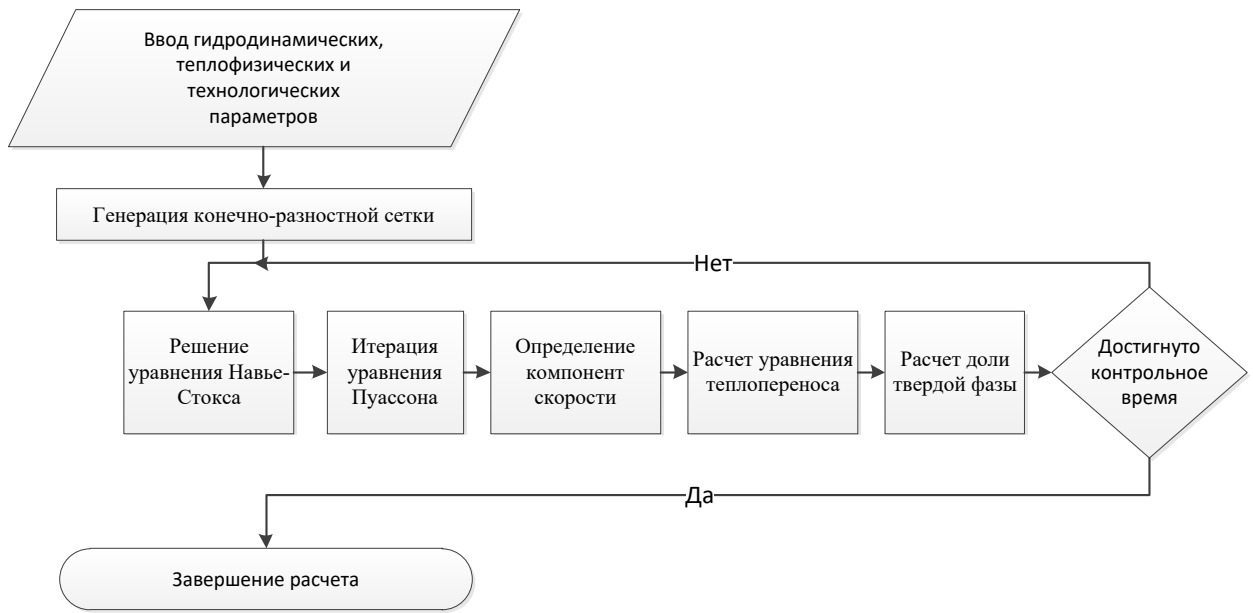


Рисунок 3.4 – Блок-схема проведения расчета по обобщенной математической модели

Юнит «MTypes» (Рисунок 3.2, 4) содержит специфичные для математической модели типы данных, константы, глобальные массивы и т.п.

Юниты «Sifon\_Model» (Рисунок 3.2, 5) и «ModelAdd» (Рисунок 3.2, 6) включают в себя процедуры и функции численного моделирования. Данные юниты написаны с помощью процедурного программирования. В настоящем случае это является более эффективным, т.к. получаем более высокую скорость выполнения расчета, чем при использовании иерархий объектно-ориентированного программирования. Главной подпрограммой расчета, из которой в различной форме происходит вызов всех остальных, является «Run». Она представляет собой шаг цикла по времени. На рисунке Б.1 приведен краткий алгоритм этой подпрограммы.

Последний относящийся к математической модели юнит «Setti» (Рисунок 3.2, 7) содержит форму ввода начальных условий и выбор варианта изложницы из базы данных (рисунок 3.5).

Установки задачи

Начальные условия

Скорость поступления металла в изложницу: 180

Высота налива изложницы: 3,13

Температура изложницы: 50

Температура ликвидус: 1470

Температура среды: 20

Начальная температура: 1550

Высота изложницы: 3,2

Характерный размер: 0,25

Тоннаж: 4300

☒ Раздевание слитка

Время раздевания слитка: 1 часов 0 мин.

Вариант изложницы: Чугунная изложница (по умолчанию)

Теплопроводность: 34

Теплоемкость: 7780

Плотность: 960

Глубина вкладыша: 270

OK

Отмена

Рисунок 3.5 – Окно ввода начальных условий

### 3.4. Модуль сопряжения

Модуль сопряжения (рисунок 3.1) осуществляет связь между объектом «Задача» и модулем математической модели. Это юнит «Convert» (рисунок 3.2, 8).

В основе работы подпрограмм конвертации лежат такие особенности языка Delphi как поддержка процедурных (функциональных) типов и использование ссылочной модели. Основное назначение процедурных типов - дать программисту гибкие средства передачи функций и процедур в качестве фактических параметров обращения к другим процедурам и функциям.

Процесс сопряжения на примере отдельно взятой переменной иллюстрирует рисунок 3.6.

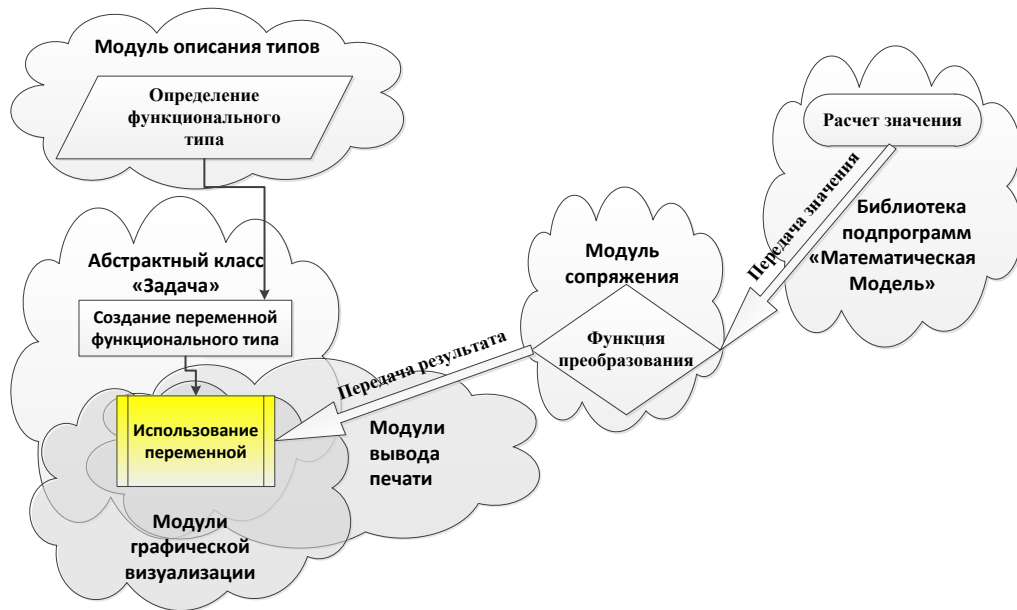


Рисунок 3.6 – Внутреннее взаимодействие модулей

### 3.5. Проектирование интерфейса пользователя

Почему пользовательский интерфейс столь важен для пользователей, проектировщиков и разработчиков программных продуктов? Потому что это то, что пользователи видят перед собой и с чем они работают. Различия между навыками пользователей, проектировщиков и разработчиков, различия между точками зрения, опытом - причина многих проблем в нашей жизни и не только в компьютерных системах. Многие книги и руководства по проектированию пользовательского интерфейса говорят об этих точках зрения как о различных моделях пользовательского интерфейса [147, 148].

Когда говорят о научных основах проектирования пользовательских интерфейсов, в первую очередь упоминают термин Human-Computer Interaction (HCI), что переводится как "взаимодействие человека и компьютера".

Пользовательский интерфейс (англ. user interface, UI) является своеобразным коммуникационным каналом, по которому осуществляется взаимодействие пользователя и компьютера.

Ментальная, или концептуальная, модель - внутреннее отображение того, как пользователь понимает и взаимодействует с системой. Ментальную модель можно

представить как отображение (в основном) физической системы или компьютерного программного обеспечения, в котором заложена вероятная последовательность действий при выполнении операций ввода и вывода. Люди формируют ментальные модели по ряду причин. Они позволяют пользователям: предсказывать (или обозначать невидимые) события; найти причины замеченных событий; определить необходимые действия для осуществления нужных изменений; использовать их как мнемонические устройства для запоминания событий и связей (отношений); обеспечить понимание аналогичных устройств; применять стратегии, которые позволяют преодолеть ограничения, заложенные в алгоритме обработки информации.

В основе ментальной модели - все взаимоотношения между пользователями и их компьютерами, поэтому она является фундаментом для выработки принципов и правил пользовательского интерфейса. Когда мы переносим знания об окружающем нас мире в мир компьютеров, начинает действовать концепция метафор. Метафора «рабочий стол» используется в большинстве современных графических и объектно-ориентированных интерфейсов.

Лучшим пользовательским интерфейсом можно назвать такой интерфейс, которому пользователь не должен уделять много внимания, почти не замечать его. Пользователь просто работает, вместо того, чтобы размышлять, какую кнопку нажать или где щелкнуть мышью. Такой интерфейс называют прозрачным — пользователь как бы смотрит сквозь него на свою работу [148].

Чтобы создать эффективный интерфейс, который делал бы работу с программой приятной, нужно понимать, какие задачи будут решать пользователи с помощью данной программы и какие требования к интерфейсу могут возникнуть у пользователей. Это сделать гораздо легче, если разработчик использует свою программу для собственных нужд, ведь в данном случае он является не только разработчиком, но и пользователем программы, смотрит на нее глазами ее аудитории.

Исследователи в области HCI сформулировали основные принципы проектирования пользовательских интерфейсов компьютерных программ. Как и в любой другой науке, существует довольно много различных методик и классификаций.

Одними из самых цитируемых в книгах по HCI являются десять так называемых эвристических правил известнейшего американского специалиста в области проектирования интерфейсов Якоба Нильсена (Jakob Nielsen), разработанных им совместно с другим исследователем, Рольфом Моличем (Rolf Molich) [149]. Это минимальные критерии, которым должен отвечать интерфейс любой программы:

1. Видимость состояния системы (правило обратной связи).
2. Информированность пользователя.
3. Средства обеспечения обратной связи.
4. Время оповещения.
5. Равенство между системой и реальным миром.
6. Свобода действий пользователя.
7. Последовательность и стандарты.
8. Предупреждение ошибок.
9. Понимание лучше, чем запоминание.
10. Гибкость и эффективность использования.

### 3.6. Общая схема построения пользовательского интерфейса

Графический интерфейс пользователя описываемой системы относится к многодокументному, или мультидокументному, типу интерфейса (Multi-Document Interface, MDI).

Центральным звеном графического интерфейса пользователя описываемой системы является юнит VMSI (Visual Mathematical Simulation Interface) (рисунки 3.2, 9), который содержит главную форму приложения. Данная форма является родительской в парадигме MDI.

Управляющими компонентами являются меню и панели инструментов с двумя наборами команд (для режимов расчета и просмотра). Кроме того, предусмотрены несколько контекстных всплывающих меню для вспомогательных целей.

При создании или открытии расчета инициализируется объект **vTask** – экземпляр класса «Задача». vTask – зарезервированное имя для обращения к объекту «Задача» во всех библиотеках графического интерфейса (рисунок 3.2, 9-19). При отсутствии расчета vTask имеет нулевое значение (nil).

Для информирования пользователя используется панель состояния. Данная панель разбита на три секции. В первой показывается текущее состояние расчета (как правило, время счета), во второй индикатор расчета, в третьей выводятся текущие подсказки и сообщения о незначительных ошибках. Данные о расчете при этом берутся из объекта vTask и настроек задачи.

Для автоматического обновления окон, в которых показываются данные расчета, используется компонент Timer. Этот таймер срабатывает через промежуток времени, указанный в настройках программы. При этом всем открытым подчиненным окнам («MDI Child») посылается команда на обновление содержимого. Таким образом, поток, в котором выполняется расчет задачи, не прерывается на вывод данных. И поскольку этот поток не выполняет кода Visual Component Library (VCL), и поток с пользовательским интерфейсом не модифицирует данные из объекта расчета, то выполняющийся процесс не нуждается в механизме синхронизации потоков. Это значительно упрощает разработку и ускоряет расчет прикладной задачи.

Еще один таймер следит за процессом расчета и выводит информацию в панель состояния.

### 3.7. Разработка визуальных компонентов

В наше время невозможно представить себе процесс математического моделирования без вывода результатов расчетов в графическом виде. Схема графической интерпретации представлена на рисунке 3.7.

Центральным звеном является схема двумерной области расчета (содержится в библиотеке MForn на рисунке 3.2, 10). В рассматриваемой работе задачу моделирования металлургических процессов в изложницах можно свести к двумерной осесимметричной модели. Схема области расчета визуализирует данную модель с помощью раскрашивания в разные оттенки в зависимости от значения выбранного поля. 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.



Рисунок 3.7 – Схема обработки результатов счета

Расшифровка схемы области расчета представлена на рисунке 3.8.

Реализуется заполнение цветовой области с помощью компонента Delphi TPaintbox (рисунок 3.8, 1), который задает прямоугольную область для выполнения графических операций, используя свойство Canvas. При этом используются такие возможности канвы как карандаш, кисть и методы построения геометрических фигур. Для этого класса определено событие OnPaint, возникающее перед тем, как компонент должен быть перерисован. В обработчике данного события задается пересчет расчетной сетки в экранные пиксели и производится отрисовка закрашен-

ных прямоугольников, соответствующих ячейкам сетки. Предусматривается 18 вариантов интервалов значений и связанных с ними цветов. Для просмотра и изменения пользователем этих параметров используется набор панелей (рисунок 3.8, 6). Начальные данные хранятся в ветке HKEY\_LOCAL\_MACHINE реестра Windows. Измененные пользователем значения записываются в ветку HKEY\_CURRENT\_USER в раздел прикладной программы. Таким образом, каждый пользователь может настроить вид схемы на свой вкус.

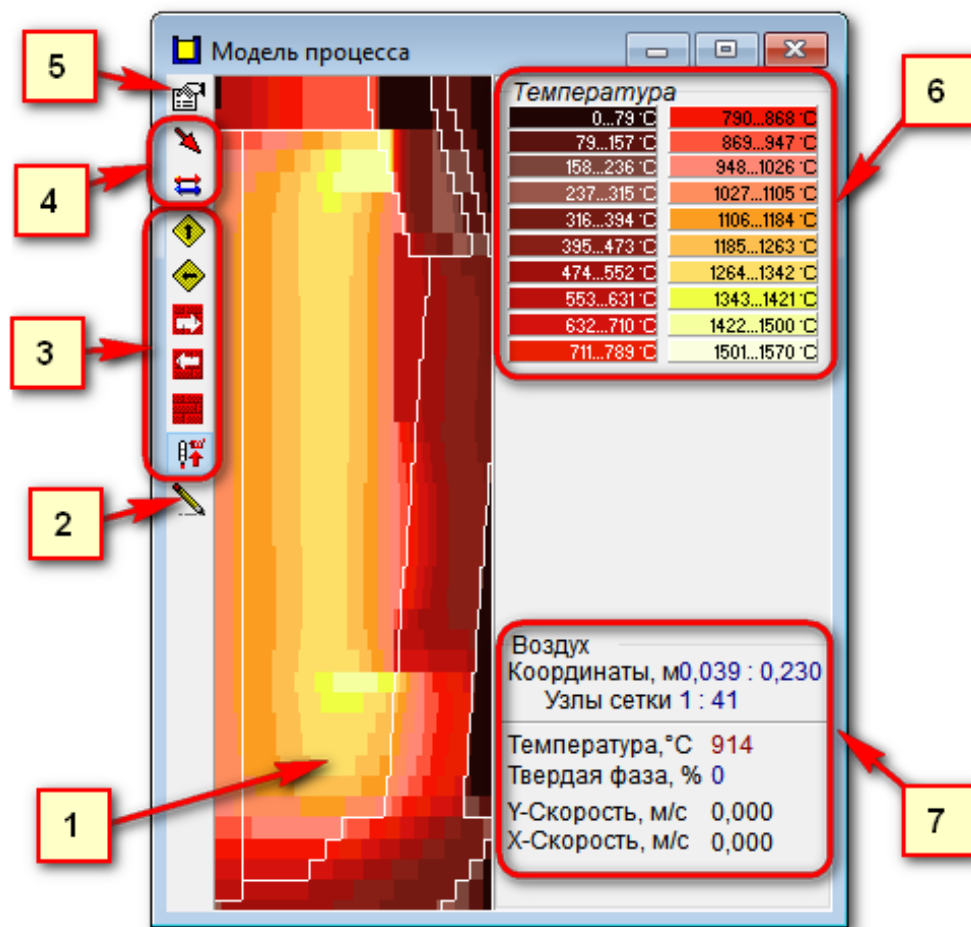


Рисунок 3.8 – Схема расчетной области

1 - цветовая область, 2 - кнопка принудительного обновления, 3 - кнопки выбора поля, 4 - кнопки выбора векторных характеристик, 5 - кнопка настроек, 6 - панели настроек диапазонов значений и оттенков цвета, 7 - панель информации текущего узла сетки.

Переключение выводимых полей производится с помощью набора селекторных кнопок (Рисунок 3.8, 3).

Если разработчик математической модели предоставляет специальный маркировочный массив, в котором описана геометрия области, то на цветовую область накладываются контуры внутренних и внешних границ изложницы, заполнителя и т.д.

Также разработаны функции, которые позволяют накладывать на область различные изолинии (функции тока, вихревой структуры, изотермы и т.п.) и стрелки, указывающие направление вектора скорости. Вызываются эти функции с помощью кнопок (рисунок 3.8, 4). Кнопка (рисунок 3.8, 5) вызывает диалоговое окно настроек для указанных функций (рисунок 3.1, 14).

В обработчике события OnMouseMove производится вывод информации из текущей (под курсором мыши) ячейки расчетной сетки в область (рисунок 3.8, 7).

Важную смысловую нагрузку несут графики функций распределения по сечениям и по времени. Компонентом Delphi и других визуальных сред программирования, который позволяет строить различные диаграммы и графики, является TChart. Данный объект является контейнером объектов Series типа TChartSeries – серий данных, характеризующихся различными стилями отображения. Каждая серия соответствует одной кривой на графике. Значения в эти серии заносятся как статические точки (X,Y). Поэтому, чтобы обновлять график с течением времени, необходимо очищать серии и вносить новые рассчитанные точки. Это замедляет расчет прикладной задачи. Поэтому, и еще по ряду причин, было принято решение отказаться от стандартного компонента построения диаграмм Delphi TChart и разработать свой с учетом особенностей использования процедурных типов.

Компонент создается с помощью наследования класса TPanel. Данный компонент тоже является контейнером объектов-графиков, организованного в виде поля GraphicList: TList. Один график является экземпляром спроектированного для описания графика класса TGraphics. Свойствами этого класса являются такие характеристики как цвет, вид линии, толщина линии и т.п. Данные для графика можно получать как в виде статических точек, так и в виде переменных функционального типа. При этом для динамического вида данных необходима только

начальная инициализация. В дальнейшем при обновлении окна график меняется автоматически, т.к. работает не со статическими переданными ему значениями, а с адресом функции.

Для вывода графиков используется форма «qGraph» (рисунок 3.2, 15). Как уже было сказано, в интерфейсной оболочке используется множество видов диаграмм различных функций распределения. Управляет вызовом графиков библиотека «Diagrams» (рисунок 3.2, 13). В ней также используется юнит «Level» (рисунок 3.2, 12), который содержит диалоговое окно выбора горизонтали или вертикали, по которой строится график распределения.

Юнит «UText» (рисунок 3.2, 11) включает окно вывода текущих рассчитываемых значений. Юнит «Monitor» (рисунок 3.2, 17) представляет собой монитор данных, который выводит текущие рассчитываемые массивы в виде таблицы. Юнит «Cursors» (рисунок 3.2, 18) содержит набор курсоров мыши. Юнит «Minimize» (рисунок 3.2, 16) обеспечивает сворачивание главного окна программы в системный трей Windows для фонового проведения расчетов. Юнит «Printing» (рисунок 3.2, 19) отвечает за вывод на принтер.

Готовое программное приложение (Рисунок 3.9) дает возможность работать в 2-х режимах: расчета и просмотра.

Пользователь может получать информацию следующими способами:

- с помощью визуализации схематической области, в которой проходит расчет;
- с помощью графиков температуры, доли твердой фазы, компонент скорости и т.п. на каком-либо горизонтальном или вертикальном срезе;
- с помощью текстового просмотра расчетных массивов температуры, доли твердой фазы и т.п.;
- с помощью просмотра значений избранных величин, таких как, объем усадочной раковины.

Любое из окон с информацией можно вывести на печать.

Во время работы в строке состояния отображаются время счета, процент выполнения и текущие подсказки.

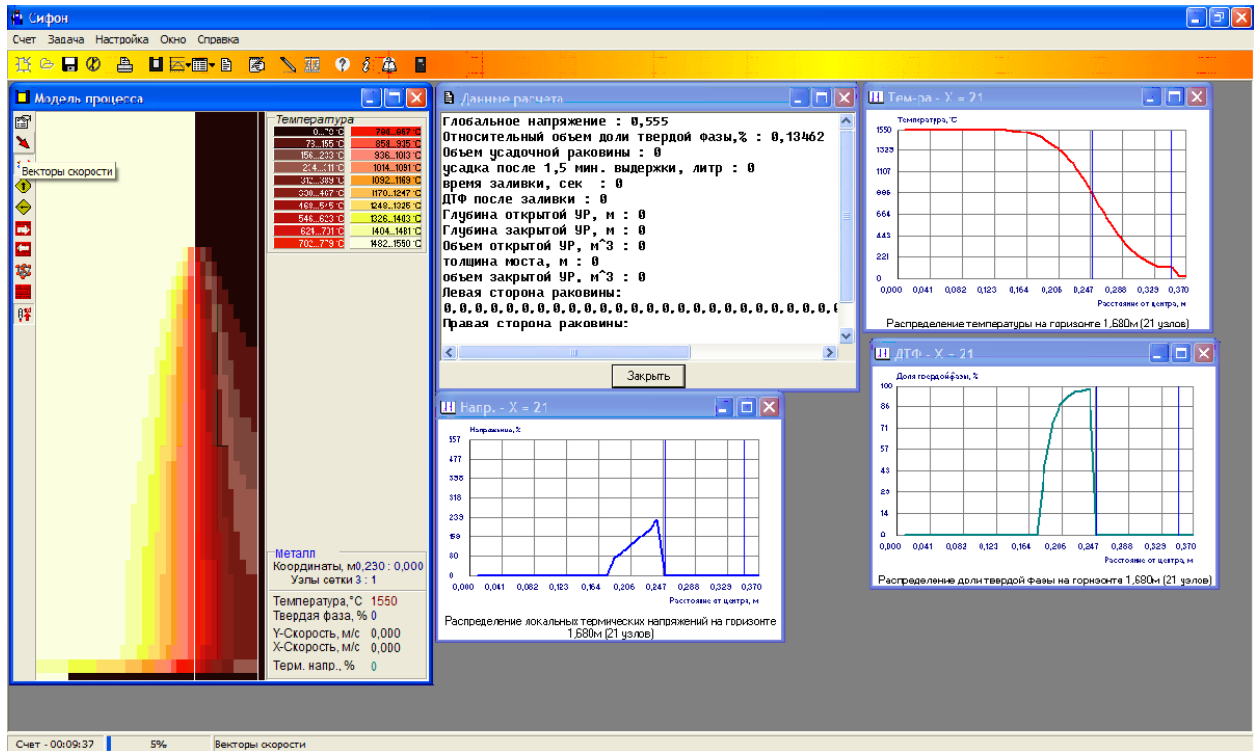


Рисунок 3.9 – Экран процесса расчета

### 3.8. Выводы по разделу 3

Разработана технология и программный комплекс для автоматизации проектирования прикладных программ. Программная система отличается следующими особенностями при проектировании вычислительных задач: разработчик может сосредоточиться только на разработке математической модели, что экономит время на создание программы; общую расчетную и интерфейсную часть можно реализовать в виде отдельных динамических библиотек, что сэкономит оперативную и дисковую память компьютера и ускорит скорость расчета; независимые интерфейсные библиотеки можно совершенствовать, не переписывая расчетное ядро; оставляя неизменной интерфейсную часть, можно варьировать в самых широких пределах математическую модель, на которой основано вычислительное ядро.

Это позволяет использовать комплекс не только для научно-исследовательских работ, но и в учебном процессе для лабораторно-расчетного практикума.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИВКЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ ВЫСОКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

В данном разделе приводятся результаты численных экспериментов, которые были проведены для слитков колесной стали на ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» [150] и для слитков колесной стали на заводе Ильича [151].

В частности, на ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» была внедрена в производство технология отливки колесных слитков в стальные круглые изложницы и производство 6-ти и 8-ми заготовочных слитков, отливаемых в круглые чугунные и стальные изложницы.

Однако до настоящего времени экспериментально не решены вопросы оптимизации параметров разливки стали в круглые изложницы и продолжительности их охлаждения в литейной форме для снижения брака колёс по дефектам металлургического происхождения и возможности уменьшения продолжительности цикла разливки, охлаждения слитков колесной стали при отливке как в чугунные, так и в стальные изложницы. Решение этих задач позволит значительно экономить энергоресурсы при производстве стали, а также уменьшить загруженность оборудования для обслуживания технологических процессов.

В настоящее время известны общие закономерности влияния на качество слитка начальной температуры и продолжительности разливки стали в чугунные и стальные изложницы, длительности охлаждения слитка в изложнице. Эти процессы тесно связаны между собой и установить их оптимальные параметры – сложная научно-техническая задача.

Определение влияния начальной температуры и продолжительности разливки стали в круглые слитки, затвердевания слитка в чугунной и стальной изложнице, и выбор оптимальных параметров производства отливок на основе экспериментальных исследований – длительный, дорогостоящий и трудоемкий процесс.

Цель настоящего раздела – применение метода математического моделирования к решению ряда вопросов производства качественных слитков колесной стали на Нижнеднепровском трубопрокатном заводе «Интерпайп НТЗ» и слитков трубной стали на заводе Ильича.

#### 4.1. Анализ технологических процессов производства слитков колесной стали «Интерпайп НТЗ»

Выплавка колесной стали различных марок в мартеновской печи завода «ИНТЕРПАЙП НТЗ» регламентируется технологической инструкцией ТИ НТЗ-М-01-2005 «Выплавка стали в мартеновском цехе», в которой изложены требования по обеспечению выплавки стали, удовлетворяющие соответствующим стандартам и техническим условиям, установлены требования к сырью, различным материалам, топливу, используемых в процессе выплавки стали.

Регламент технологических операций и порядок их выполнения при обработке металла на установке внепечной обработки стали (УВОС), метрологическое обеспечение, ведение документации, нормы и правила техники безопасности, а также требования к ферросплавам, шлакообразующим и другим материалам изложены в технологической инструкции ТИ НТЗ-М-03-2004 «Обработка металла на установке внепечной обработки стали (УВОС) в мартеновском цехе».

Производство слитков колесной стали регламентируется технологической инструкцией ТИ 243-М-02-200 «Разливка стали в изложницы». В инструкции изложен порядок подготовки оборудования к разливке металла, сформулированы требования к технологии разливки металла, технологические операции и порядок их выполнения, метрологическое обеспечение.

Требования к подготовке сталеразливочных составов, технологические операции и порядок их выполнения, контроль, ремонт и отгрузка 8-ми заготовочных слитков колесных марок стали, отливаемых в круглые чугунные и стальные изложницы, метрологическое обеспечение, регламентируются технологической инструкцией ТИ НТЗ-М-04-2007 «Подготовка сталеразливочных составов в мартеновском

цехе. Контроль и ремонт слитков». В инструкции также регламентированы режимы охлаждения слитков в изложнице и разливки их для дальнейшего охлаждения на воздухе.

Химический состав транспортного металла приводится в технологических картах на выплавку, внепечную обработку и разливку стали. Химический состав колесной стали, исследованной в настоящей работе, приведен в таблице А.2.

Комплекс «печь-ковш – вакууматор» (LHF-VD) предназначен как для подготовки металла к вакуумированию, так и для подогрева металла, корректировки его химического состава и дополнительного легирования без последующего вакуумирования.

На установке «печь-ковш» выполняют следующие технологические операции: отбор проб и замер температуры металла; наведение высокоосновного металла, жидкоподвижного шлака, что способствует устойчивой работе печи и процессу десульфурации металла; корректировку химического состава металла по легирующим элементам и легирование металла новыми элементами, не содержащимися в металле при поступлении его на «печь-ковш»; десульфурацию металла.

На вакууматоре выполняют следующие технологические операции: отбор проб для контроля химического состава металла; замер температуры металла; вакуумирование металла с целью снижения содержания водорода; корректировку химического состава; микролегирование и модифицирование металла сильными нитридообразующими элементами (титаном, ванадием, бором, алюминием, ниобием); глубокое раскисление и модифицирование металла алюминием и силикокальцием; очистительную продувку аргоном после ввода алюминия; измерение содержания водорода непосредственно в жидком металле с помощью системы «Hydris»; нанесение на шлак утепляющих материалов (для уменьшения тепловых потерь в процессе разливки стали).

Снижение температуры металла при вакуумировании составляет 1,8 – 2,5°С/мин в зависимости от расхода аргона (ориентировочно 45 – 60°С за цикл обработки).

Температура транспортного металла перед подачей ковша на разливку должна находиться в пределах 1545 – 1565 °С. При превышении указанной температуры необходимо осуществить корректирующую продувку аргоном.

Для разливки стали в изложницы в мартеновском цехе при проведении исследования использовано следующее сменное оборудование: поддоны шестиместные для установки изложниц КП-8 с торцованной поверхностью; поддоны двухместные для установки изложниц КП-8, изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке; поддоны с “Ж” – образным расположением каналов сифонной проводки; изложницы КП-8 для отливки 8-ми заготовочных слитков, изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке; центровые для сборки составов с изложницами КП-8, изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке; крышки для установки на изложницы КП-8, изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке; крышки 4-х местные для установки на изложницы КП-8 на 2-х местные поддоны.

При подготовке сталеразливочных составов на каждой платформе набирали по 2 куста из 6-ти изложниц. В кусте изложницы расположены по радиусу. Состав состоял из 4-х платформ и платформы с одним или двумя двухместными поддонами.

Изложницы КП-8 подготовленного транспортного сталеразливочного состава накрывали крышками с «лючками» из листовой стали.

Для состава под разливку транспортного металла в изложницы КП-8 подвешивается пакет с теплоизолирующей смесью с помощью киперной ленты или шпагата таким образом, чтобы обеспечить подвешивание пакета на высоте 50 – 70 мм от поверхности поддона и центрируют пакет по оси изложницы. Использование проволоки для подвески пакетов не допускается.

При вводе в эксплуатацию состава для разливки транспортного металла с новыми изложницами необходимо проведение промывочной плавки.

Подготовленный сталеразливочный состав не позднее, чем за 30 минут до выпуска плавки подается в разливочный пролет.

Разливка колесной стали производилась 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 (жёсткого и модульного типов) и продувочными узлами (фурмами и соплами). Использовано комплексное утепление слитка теплоизолирующими смесями и утепляющими вставками с использованием защиты струи металла аргонном.

Изложницы изготовлены из чугуна марки СЧ 15 и стали марки Ст 20. Геометрические параметры изложниц приведены на рисунке Б.2.

Для утепления слитков в изложницы после чистки, продувки сжатым воздухом и осмотра на наличие недопустимых дефектов устанавливали теплоизолирующие вставки МКРВ-340, соответствующие типоразмерам изложниц (таблица А.3, рисунок Б.3).

После наполнения второго поддона с каждого ковша отбирали пробу металла на ковшевой химический анализ. При измерении содержания водорода системой «ХАЙДРИС» пробы для определения содержания водорода не отбирались.

Продолжительность выдержки сталеразливочных составов со слитками колёсных марок стали в разливочном пролёте после окончания разливки и до начала разделения слитков приведена в таблице А.4 (ТИ НТЗ-М-04-2004).

После разливки стали в изложницы и выдержки в разливочном пролете сталеразливочный состав с изложницами выдерживается на технологических путях или подается в пролет подготовки составов. Разделение слитков всех типов и марок стали производится в том же порядке, в каком производилась разливка. Метрологический контроль процесса приведен в таблице А.5.

После охлаждения ОТК отслеживает идентификацию слитков, производит их маркировку и контролирует передачу на промсклад мартеновского цеха для отбраковки, ремонта и послиточной маркировки для передачи цеху-потребителю.

Слитки, поставляемые из мартеновского цеха в колесопрокатный цех, не должны иметь продольных и поперечных трещин, плен, поясов, заворотов, подкорковых пузырей, «голенищ», свищей, а также «рослость». Не допускаются к поставке в прокатные цеха «рослые» слитки, слитки, отлитые в изложницы сверху и с глубиной удаления дефектов на слитках более 30 мм (ЗТУ 27.1-05393116-525-2005, ЗТУ 27.1-05393116-522-2003).

**Теплофизические параметры разливаемой стали, литейной формы и утеплительных материалов.** 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) (рисунок Б.2, а) и стальную (марка стали Ст 20) (рисунок Б.2, б) изложницы. Теплофизические параметры колесной стали, материала изложниц и утеплителей приведены в таблицах А.6, А.7, А.8.

#### 4.2. Подтверждение адекватности математической модели

Для оценки точности результатов расчета выполнены экспериментальные измерения глубины жидкой лунки по оси слитка в процессе его затвердевания (после окончания отливки), исследования глубины усадочной раковины в 8-ми заготовочных слитках стали КП-2, измерение температуры поверхности стальной и чугунной изложниц при разливке и затвердевании слитков колесной стали.

*Глубину усадочной раковины* в головной части слитков колесной стали определяли на произвольно отобранных после порезки и поломки головных частей от 12 слитков четырех плавов (по три от каждой плавки).

Время наполнения прибыли колесного слитка по ТИ НТЗ-М-02-2005-1 п.7.3.7 составляло 2 – 3 мин, (скорость 70 – 120 мм/мин). Уровень наполнения прибыли металлом был ниже верхней кромки вставок, примерно на толщину слоя утеплительной смеси 50 мм.

После осмотра и обмера геометрических параметров выборочно выполнена порезка по оси головных частей (осевое сечение) огневым способом.

Общий вид и макроструктура головных частей (усадочных раковин) слитков приведены на рисунке Б.4.

Результаты замеров приведены в таблицах А.9, А.10.

Результаты показывают, что глубина усадочной раковины от кромки короны до дна открытой усадочной раковины составляет от 20 до 160 мм при высоте от кромки короны до тела слитка 130 – 190 мм.

Ниже дна усадочной раковины следов усадки нет, металл плотный.

Характер усадочных раковин и структура металла под уровнем открытой усадочной раковины свидетельствуют о том, что температурный и скоростной режимы разливки, конструкция слитка и величина теплоизолирующей вставки, а также применяемые смеси обеспечивают надлежащее качество металла тела слитка.

В численном эксперименте глубина усадочной раковины рассчитывалась при условии наполнения прибыли металлом до верхней кромки утеплительной вставки (торца изложницы). В применении к практике необходимо учитывать, что уровень налива металла примерно на 40 – 50 мм ниже верхней кромки слоя шлаковой смеси, выходящей в прибыль. В процессе кристаллизации уровень металла во вставке опускается примерно на 50 мм, образуя уровень кромки «короны» прибыльной части затвердевшего слитка.

Полученные данные показали, что в условиях производства при колебаниях продолжительности отливки слитков в пределах от 12 до 18 мин глубина открытой усадочной раковины не опускается ниже уровня утеплительной вставки.

Результаты численного эксперимента определения глубины открытой усадочной раковины в слитках, отлитых в чугунные и стальные изложницы в течение 10 – 18 минут при продолжительности наполнения прибыльной вставки высотой 220 мм в течение 120 – 160 сек показали, что во всем диапазоне исследования глубина усадочной раковины находится в пределах 180 – 240 мм, закономерно увеличиваясь при увеличении скорости разливки (рисунок 4.1).

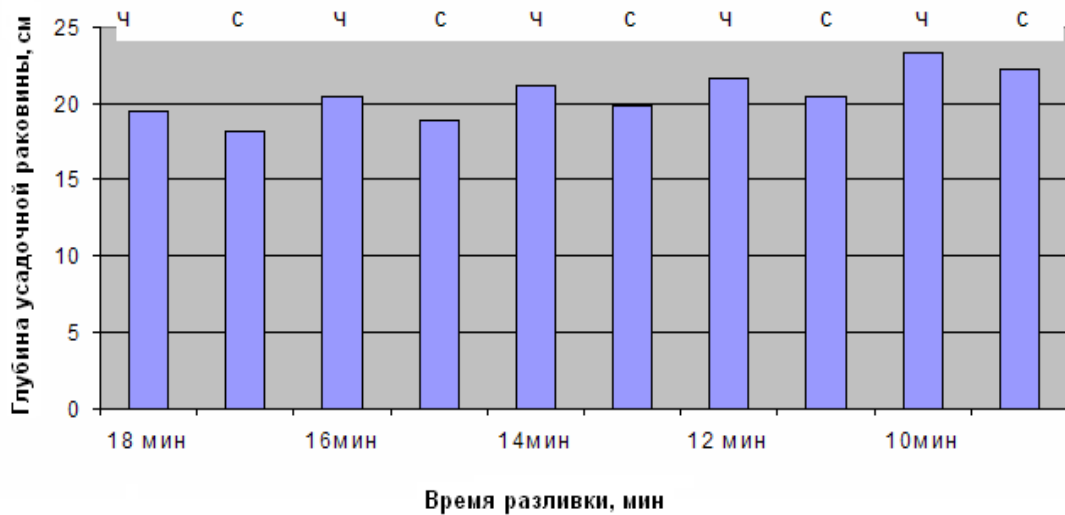


Рисунок 4.1 – Расчет глубины усадочной раковины при различном времени разливки стали. «Ч» и «С» – чугунная и стальная изложницы соответственно

Следует отметить, что глубина усадочной раковины, полученная путем численного моделирования, является завышенной, так как не учитывается специфика поведения теплоизолирующей смеси, под которой производится отливка слитка, при подходе металла к прибыльной части.

Эта специфика состоит в том, что смесь не обладает идеальной жидкотекучестью. При подходе к нижнему торцу теплоизолирующей вставки и дальнейшем движении поверхности жидкого металла вверх смесь не успевает выйти в горизонтальном направлении из-под торца вставки (из-под заплечиков вставки) и остается под заплечиками в виде слоя конической формы с максимальным утолщением под торцом вставки. Слой этот обладает достаточно высокими теплоизолирующими свойствами, и в пределах этого теплоизолирующего кольца металл достаточно долго находится в жидкоподвижном состоянии.

Подтверждением этому являются потеки жидкого металла на поверхности слитка, образующиеся при усадке его и нарушении сплошности этого шлакового кольца. Теплопроводность этого кольцевого пояса не поддается какому-либо определению и учету в теплопередаче от металла к стенке изложницы. В модели принимается теплопередача этого слоя эквивалентной теплопередаче от металла к стенке изложницы без посредников.

Результаты замеров, представленные в таблице А.10 соответствуют приведенной схеме на рисунке Б.5. Сравнение величин  $H_3$  и  $H_2$  свидетельствует о том, что за исключением одного случая (31527-2) дно усадочной раковины располагается выше тела слитка, т.е. усадочная раковина находится в пределах объема прибыльной части слитка. В шейке разлома между прибыльной частью слитка и головной заготовкой, находящейся в пределах 20 – 40 мм ниже прибыльной части следов усадочной раковины не обнаружено.

Таким образом, можно считать результаты математического моделирования достаточно надежными для использования их в практических выводах.

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

В таблице А.11 и на рисунке 4.2 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.

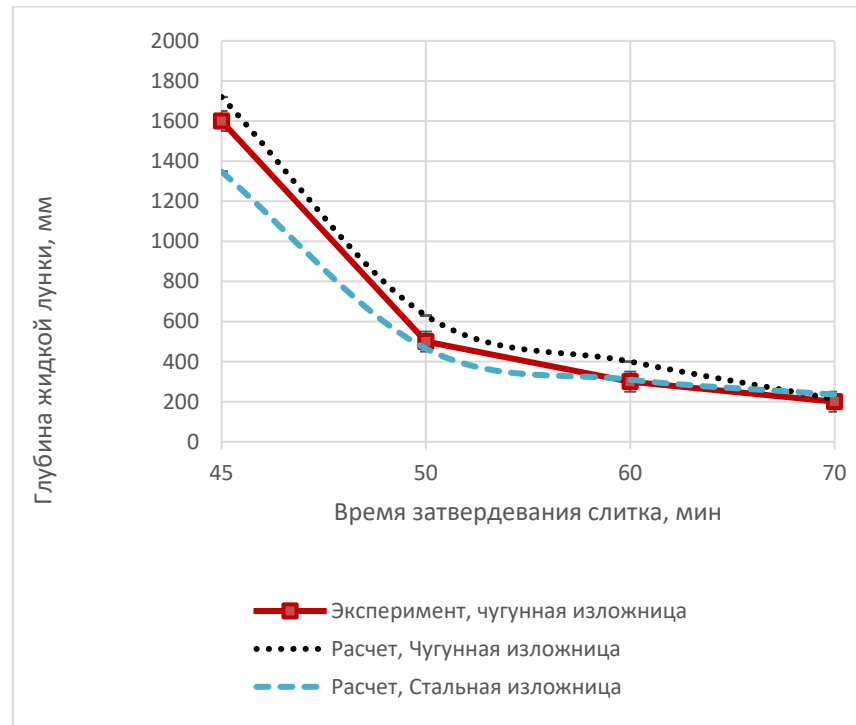


Рисунок 4.2 – Сравнение результатов промышленного и численного экспериментов определения глубины жидкой лунки слитка, отлитого в чугунную и стальную изложницы

В осевой зоне, как показывают расчеты, расплав затвердевает быстрее в стальной изложнице. Однако, это в определенной степени связано с точностью определения 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.

Время затвердевания осевой зоны слитка в чугунной изложнице по результатам моделирования составляет примерно 90 минут, и хорошо совпадает с экспериментальными исследованиями при экстраполяции кривых.

Обзор аналитических методов расчета затвердевания слитков различной конфигурации и массы приведен в работе Л. Шмрга [131]. На основании экспериментальных исследований, проведенных Б.Б.Гуляевым и В.М. Тагеевым [68], получена аналитическая формула времени затвердевания слитка  $\tau$ , мин от его радиуса  $R$ , см.:

$$\tau = 0,112 \times R^2 ; \quad (4.1)$$

Время затвердевания слитка, рассчитанное по формуле (4.1) – 70 мин.

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<sup>0</sup>С. 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.

Результаты приведены в таблице А.12 и на рисунке 4.3.

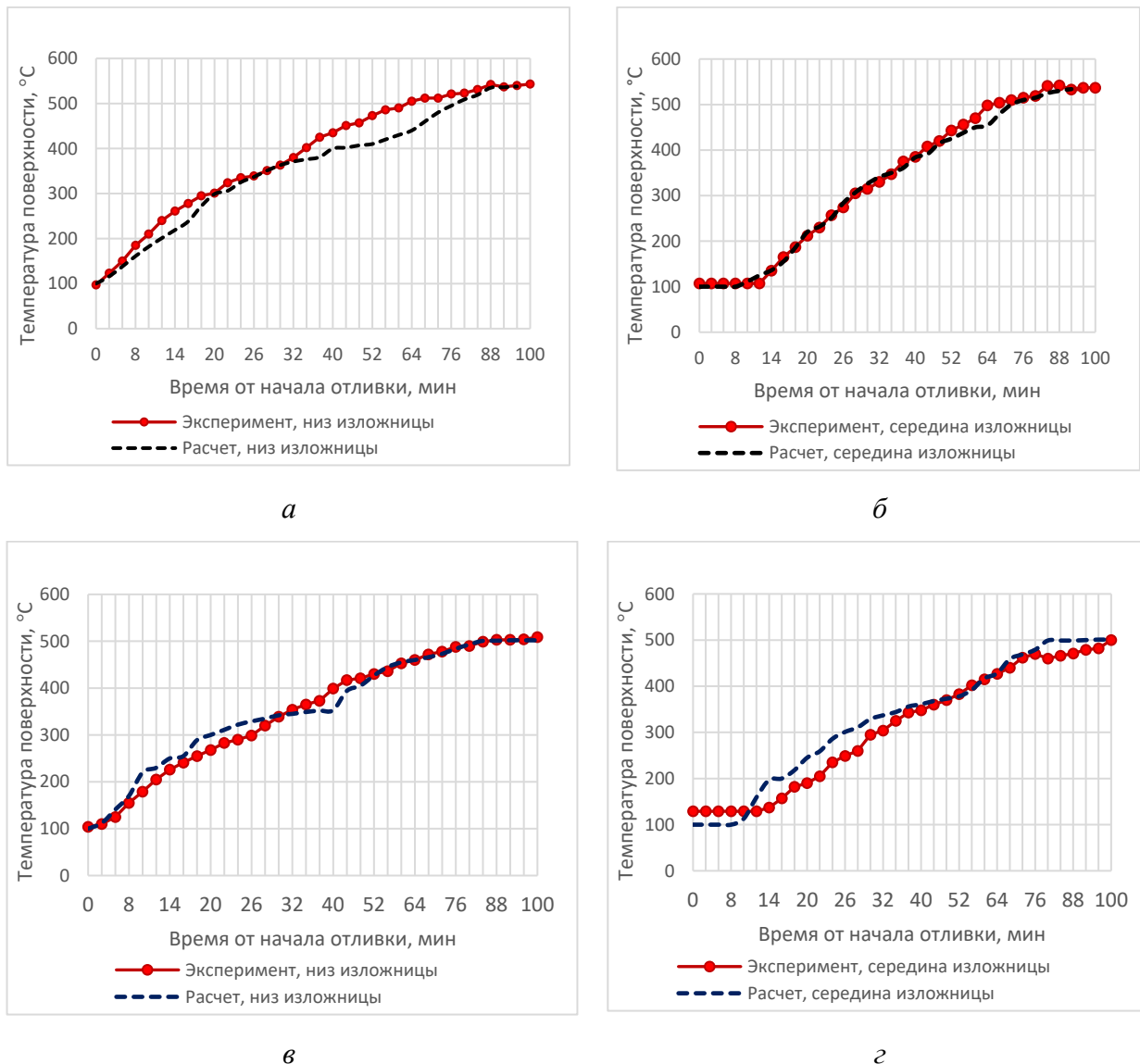


Рисунок 4.3 – Результаты экспериментального и численного определения динамики температуры поверхности чугунной (а – 200 мм от дна изложницы, б – середина изложницы) и стальной изложницы (в – 200 мм от дна изложницы, г – середина изложницы)

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.

#### 4.3. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов при разливке и формировании слитка

При общей продолжительности отливки слитка 16 – 18 мин 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  $3130 \pm 15$  мм. Внешний диаметр изложницы в нижней части  $850 \pm 2$  мм, внутренний диаметр изложницы в нижней части  $500 \pm 2$  мм; внешний диаметр изложницы в верхней части  $850 \pm 2$  мм, внутренний диаметр в верхней части  $506 \pm 2$  мм. Материал изложницы чугун СЧ 15-32 ГОСТ 1412-70. Изложницы цилиндрические. Конусность на изложнице отсутствует. Размеры утепляющей вставки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Размеры утепляющей вставки

| Изложница | Тип изложницы | Номер изделия | Размер вставки, мм |                |
|-----------|---------------|---------------|--------------------|----------------|
|           |               |               | Высота             | Внешний радиус |
| Колесная  | КП-8          | № 10          | 220                | 252            |

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

Как видно, уже через 10 мин наблюдается не только струйное течение, индуцируемое струей, но и естественное конвективное, вследствие градиента температур. Со временем этот вклад естественной конвекции возрастает, что подтверждают эпюры скоростей (рисунок 4.4).

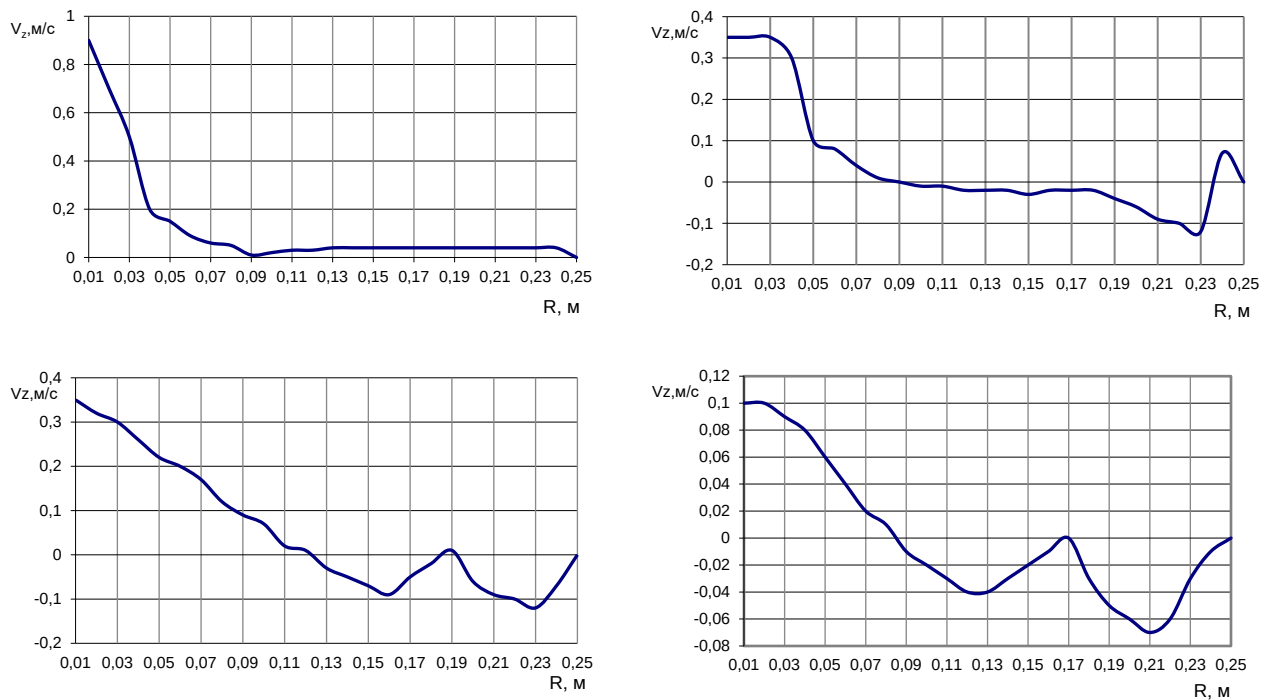


Рисунок 4.4 – Эпюры вертикальной компоненты скорости по радиусу изложницы на высоте 50 см от дна при разливке слитка в различные моменты времени

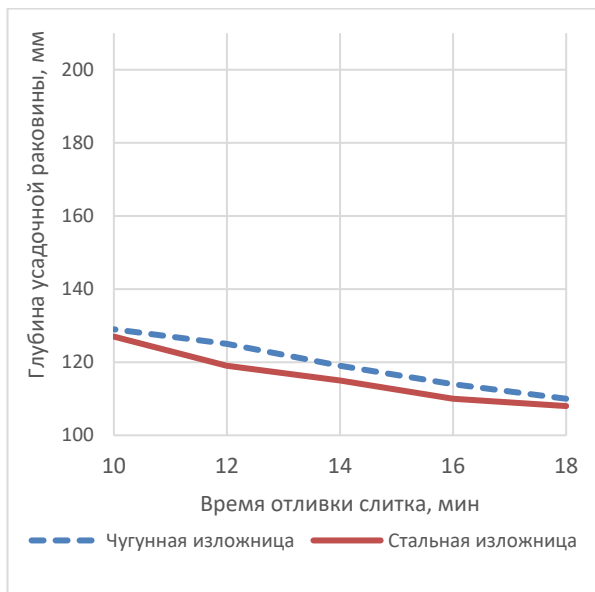
Немонотонное изменение кривой, характеризующей вертикальную компоненту скорости на 10, 15 минут, свидетельствует о наличии вихря в пристеночной области.

С окончанием разливки (рисунок Б.6, *г*) 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 восхо-

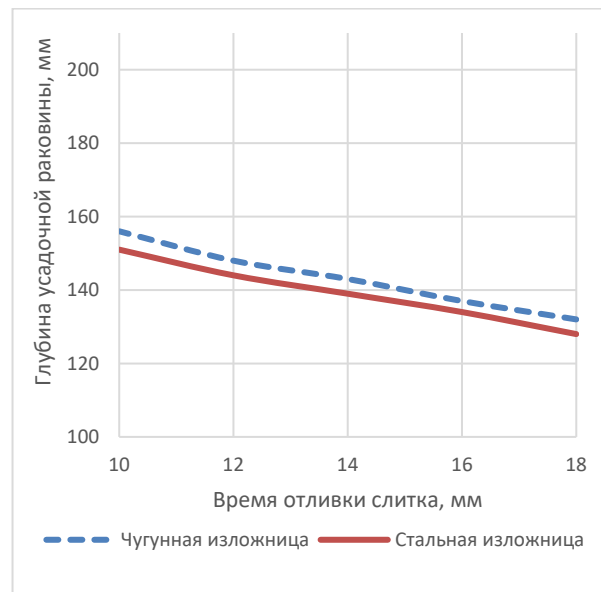
дящие потоки, а на фронте кристаллизации нисходящие, то горячий расплав из центральной части выносится в головную и, опускаясь вдоль границы фронта кристаллизации, остывает, формируя утолщенную твердую корочку в нижней части слитка, тогда как в головной части, подпитываемой горячими порциями расплава и хорошо теплоизолированной, затвердевание начинается в последнюю очередь.

#### 4.4. Влияние скорости разливки и высоты теплоизолирующей вставки на глубину усадочной раковины

Выполнено математическое моделирование влияния рассматриваемых факторов на глубину усадочной раковины при исходном перегреве стали над температурой ликвидус  $74^{\circ}\text{C}$  (середина регламентируемого диапазона перегревов для стали марки КП2). Результаты приведены в таблице А.13 и на рисунках 4.5, 4.6.



а



б

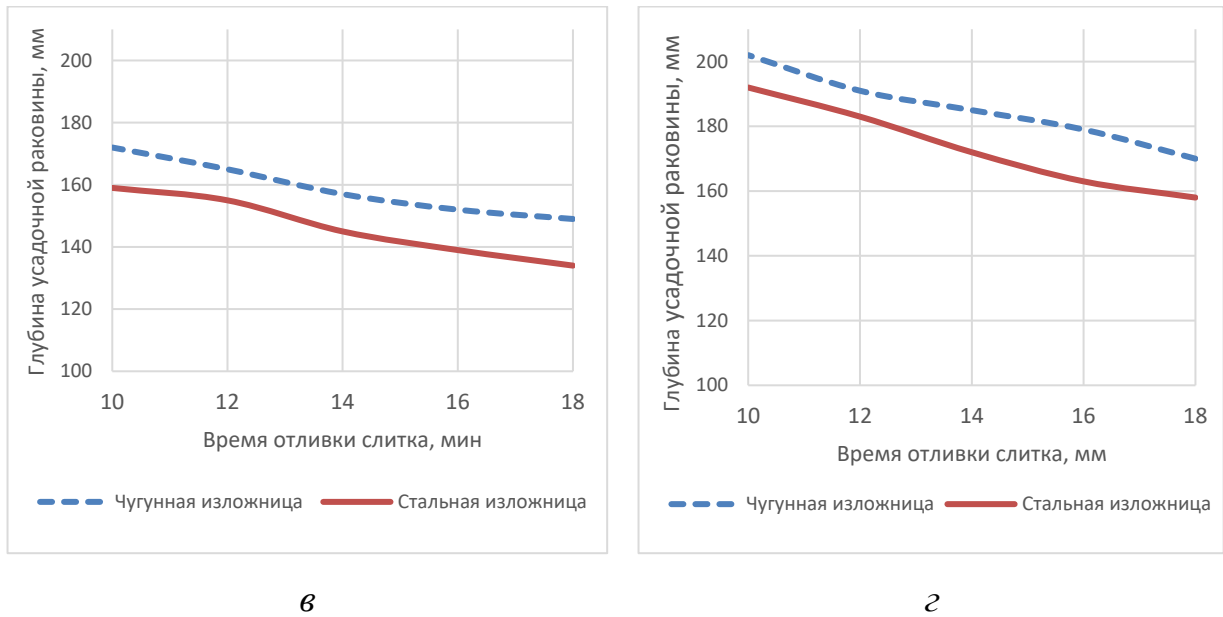


Рисунок 4.5 – Изменение глубины усадочной раковины от скорости отливки слитка (расчет). Высота вкладыша: а - 250 мм, б – 220 мм, в – 200 мм, г – 190 мм

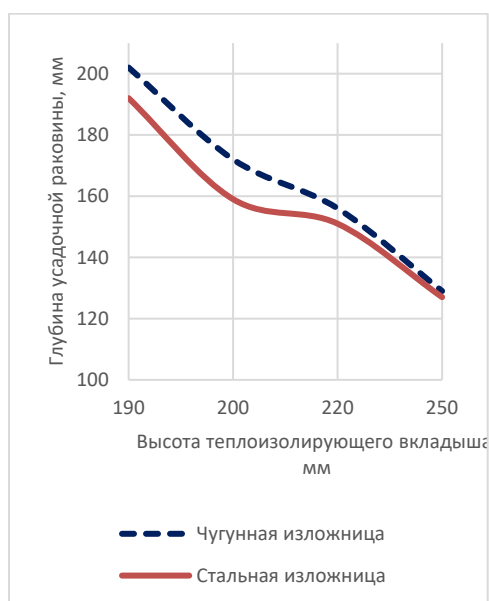
Математическое моделирование выявило интересные и несколько неожиданные результаты:

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.

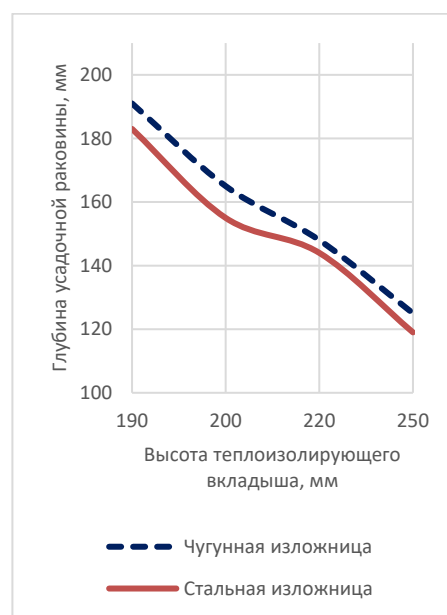
Это связано с различием теплофизических свойств стальной и чугунной изложниц и свидетельствует о высоких теплоизолирующих свойствах вставок производства Северского завода и весьма высокой эффективности использования физического тепла относительно небольшого объема металла (7 – 9 %). Этому способствует 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.

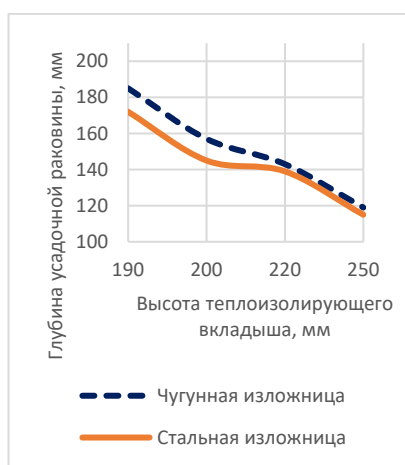
3. При решении вопроса устранения потеков металла по телу слитка и улучшения условий работы резцов первого реза целесообразно опробование уменьшения высоты стальных изложниц и соответственно слитка на 50 мм.



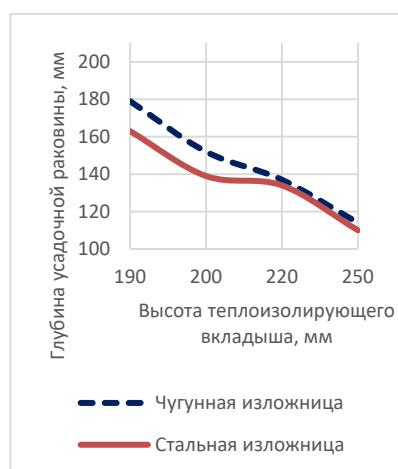
а



б



в



г



д

Рисунок 4.6 – 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

В использованной методике расчет усадочной раковины осуществляется от уровня налива слитка (зеркала металла в конце наполнения изложницы). Фактический уровень налива металла примерно на 50 мм ниже за счет слоя теплоизолирующей смеси на поверхности слитка в изложнице в конце отливки слитка. За счет

этого следовало бы опустить нижнюю расчетную границу усадочной раковины (глубину усадочной раковины) на 50 мм по сравнению с расчетной величиной, определенной от верхнего торца изложницы.

Следует учесть также 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.

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 разливочных кранов непосредственно на операции разливки.

#### 4.5. Влияние величины перегрева стали на глубину усадочной раковины

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

Однозначного ответа о влиянии перегрева на глубину распространение усадочной раковины нет. С одной стороны, более теплый металл имеет меньшую плотность и при застывании должен давать большую усадку. С другой стороны, более холодный металл имеет в начале кристаллизации большую плотность. И с этой позиции должен бы давать меньшую усадку. Однако вопрос этот на практике решается не так однозначно. При разливке металла в слитки с прибыльными надставками (вставками) одновременно с протеканием процессов теплоотвода протекают массообменные процессы, где одним из основных является гидродинамика жидкого металла. При снижении начальной температуры металла гидродинамические процессы протекают менее интенсивно вследствие быстрой потери металлом жидкоподвижности.

Из практики известно, что при разливке «холодного» металла слитки поражаются глубокими усадочными раковинами. При производстве проката это приводит к значительной отбраковке по дефектам усадочного происхождения.

Математическая модель кристаллизации слитка учитывает, как теплофизическую, так и гидродинамическую сторону процесса, и с наименьшими материальными временными затратами способна дать надлежащий ответ.

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 4.7).

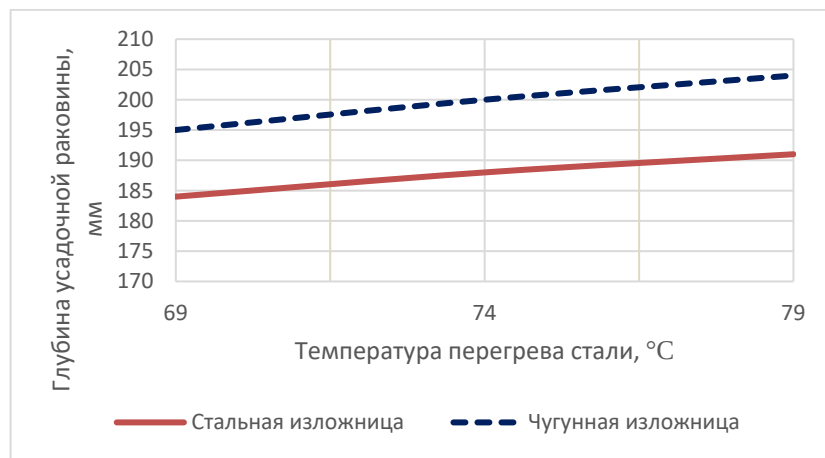


Рисунок 4.7 – Глубина усадочной раковины в зависимости от начального перегрева стали (численный эксперимент)

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.

#### 4.6. Численное моделирование распределения температур в слитке по его сечению при различной выдержке в изложнице до его разdevания

В таблице А.14 представлены результаты численного эксперимента по определению распределения температур металла в слитке по его сечению на высотах

0,2 и 1,5 м от поддона по ходу выдержки слитков до раздевания при различной величине перегрева над температурой ликвидус в начале разливки. Высоты выбраны с учетом экспериментальных замеров температуры изложницы для адаптации модели к конкретным производственным условиям.

Полученные результаты представляют интерес как сами по себе для выяснения картины, так и для практических выводов.

Прежде всего, обращает на себя внимание то, что температура слитка на высоте 1,5 м от поддона значительно выше температуры на расстоянии 0,2 м от поддона. Этот факт сам по себе тривиален: является отражением охлаждающего эффекта поддона и четко отмечается визуально при раздевании слитков.

Во всех случаях температуры слитка в чугунной изложнице выше соответствующих температур слитка в стальной изложнице. Это свидетельствует о том, что в стальной изложнице слиток охлаждается быстрее, чем в чугунной. Косвенно это подтверждается меньшими величинами усадочных раковин, величины которых зависят от соотношения скорости охлаждения тела слитка и времени пребывания в прибыли жидкого металла.

Регламентированная технологической инструкцией выдержка составов со слитками до раздевания их установлена для случая отливки слитков в чугунные волнистые («ромашка») изложницы с прибыльными надставками, футерованными шамотным кирпичом. Металл разливался непосредственно после выпуска из печи.

С тех пор технология подготовки металла к разливке, самой разливки и используемого для этого сменного оборудования кардинально изменились. Это обстоятельство уже само по себе делало актуальным уточнение и оптимизацию рассматриваемого параметра технологии. Однако, на практике такие исследования чрезвычайно трудоемки и долговременны. Получавшиеся на практике в период происходивших изменений технологии положительные результаты заслоняли актуальность уточнения оптимальной выдержки слитков до раздевания.

Выполненные на основе использованной модели численные эксперименты также не позволяют судить об оптимальности существующей регламентации рассматриваемого параметра. Однако, позволяют сделать сравнительную оценку существующего варианта технологии (отливки слитков в стальные изложницы) с вытесненным по другим причинам предшествующим вариантом (отливкой в чугунные изложницы).

Положив в основу тезис о том, что результаты охлаждения слитка после его извлечения из изложницы зависят от его температуры перед извлечением, можно сравнить значения температуры поверхности слитка (на расстоянии от оси 250 мм) в чугунной изложнице при 4-х часовой выдержке со временем достижения аналогичной температуры поверхности слитка в стальной изложнице.

Данные таблицы А.14 позволяют сделать такое сравнение и приводят к выводу о том, что аналогичное значение температуры поверхности слитков, отлитых в стальную изложницу, достигаются на 0,5 часа раньше. Отсюда следует вывод о возможности сокращения выдержки слитков до раздевания в стальных изложницах до 3,5 часов.

Положительными моментами этого мероприятия являются, сокращение времени оборачиваемости сталеразливочных составов, повышение маневренности в работе и дальнейшее повышение стойкости стальных изложниц.

#### 4.7. Производство колесной стали

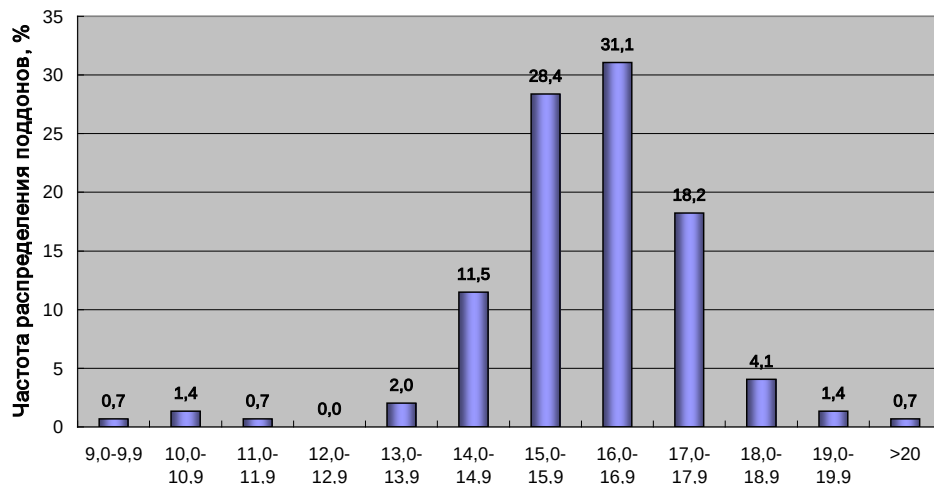
Приведенные выше результаты математического моделирования влияния уменьшения времени наполнения слитка с 18 до 10 минут показали, что при всех размерах вставки глубина усадочной раковины находится выше уровня нижней кромки вставки (выше уровня тела слитка) и за исключением случая вставки высотой 190 мм находится в пределах объема вставки. Размеры усадочных раковин в слитках, отлитых в чугунную изложницу, больше, чем в стальную.

При времени наполнения слитков больше 10 мин уровень дна усадочной раковины находится выше уровня тела слитка.

Результаты экспериментальных замеров температуры на высоте 1.5м поверхности чугунной изложницы и слитков при раздевании представлены в таблице А.15. Результаты были использованы для адаптации модели с целью выполнения расчетов охлаждения слитков во времени. Приведенные выше данные таблицы А.14 показывают удовлетворительную сходимость с практическими данными. Это послужило основанием для сравнения режимов охлаждения слитков в чугунных и стальных изложницах и вывода о возможности сокращения выдержки слитков в стальных изложницах на 0,5 часа по сравнению с чугунными.

В таблице А.16 приведены практические данные опробования сокращения продолжительности отливки слитков разных марок стали транспортного металла. Во всех опробованных случаях не было получено замечаний по качеству металла и разбраковки колес.

Результаты наблюдений (таблица А.17) показывают, что в 42,1% случаев продолжительность отливки 8-ми заготовочных слитков марки КПТ на 6-ти местных поддонах составило менее 16 мин, т.е. произведена отливка слитков с продолжительностью менее регламентированной. Данных по увеличению отбраковки слитков и заготовок не обнаружено. На рисунке 4.8 приведено частотное распределение общей продолжительности отливки 8-ми заготовочных слитков марки КПТ по всему производству этой марки за месяц.



Продолжительность отливки слитков по поддонам по картам разливки

Рисунок 4.8 – Частота распределения общей продолжительности отливки

Результаты показывают, что примерно 45% слитков отливо при продолжительности менее 15,9 мин.

Так же, как и на плавках с наблюдением имеет место ситуация с отбраковкой колес. Результаты выборки по плавкам не позволили обнаружить каких-либо ухудшений показателей качества колес при сокращении времени отливки слитков менее 16 мин регламентированных технологической инструкцией (16-18 мин).

Полученные результаты позволили рекомендовать отливку слитков при максимальной длительности 16 мин.

Ниже приводятся общие данные по опытно-промышленному опробованию рекомендаций.

*Колесная сталь марки КП-2.* Отливо 44 слитка в стальные и чугунные 8-ми заготовочные изложницы. Слитки отливали в течение 12мин 05 сек – 14 мин 42 сек. Двойник отливали 7 мин. 07 сек Температура стали при разливке 1550 °С. Высота утеплительных вставок 220 мм. Время нахождения состава в разливочном пролете – 40 мин. Время до раздевания слитков – 4 часа. Слитки плавки 21741 находились в разливочном пролете 40 мин; «раздевали» их через 3 часа 30 мин после отливки. Все слитки прошли контроль ОТК цеха и переданы в колесопрокатный цех. Замечаний по качеству изготовленных колес нет.

*Колесная сталь марки R-8.* С целью исследования влияния ускоренной разливки колесной стали в 8-ми заготовочные изложницы на качество металлопродукции отливо 47 слитков стали марки R8. Время отливки слитков от 13 мин 45 сек до 15 мин 20 сек. Температура стали при разливке 1550 °С. Слитки прошли контроль ОТК цеха и переданы на склад для передачи в колесопрокатный цех. Замечаний по качеству изготовленных колес нет.

*Колесная сталь марки КП-Т.* Из сортамента колесных сталей завода «Интерпайп – НТЗ» сталь марки КП-Т проходит сложный цикл деформационной и термической обработки и относится к наиболее чувствительным к трещинообразованию.

Выполненные численные эксперименты, разработанные рекомендации и промышленное производство железнодорожных колес показали возможность повышения скорости разливки стали в чугунные и стальные изложницы КП-8.

Выплавлено 8 плавок стали и отлито в чугунные и стальные изложницы КП-8 158 слитков. Время отливки тела слитков колебалось в пределах от 8 мин 33 сек до 15 мин. 42 сек. Общая продолжительность отливки слитков, включая прибыль, составляла 10 мин 33 сек – 17 мин. 50 сек. Четыре слитка отлиты в течение 10 мин 33 сек (тело слитка – за 8 мин 33 сек). 39 слитков отлиты в течение от 16 мин 17 сек до 17 мин 50 сек (тело слитка – за 14 мин 17 сек...15 мин 42 сек).

Температура стали при разливке 1550 – 1556 °С. Время нахождения состава в разливочном пролете – 40 мин. Время до «раздевания» слитков – 4 часа. Слитки прошли контроль ОТК цеха и переданы на склад для обработки для передачи в лесопрокатный цех.

#### 4.8. Разработка рекомендаций по оптимизации технологии отливки колесных слитков

На основании результатов работы предложены следующие изменения в технологию производства колесных слитков из стали марок КП2, КПТ и других:

1. 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.

2. Опробовано в производственных условиях сокращение времени отливки 8-ми заготовочных слитков с 16 – 18 мин до 14 – 16 мин. Получены положительные результаты, внесены изменения в ТИ НТЗ-М-02-2006, п. 7.3.8 и внедрены в производство.

3. Показана возможность сокращения времени охлаждения слитков в стальных изложницах до раздевания в течение 3 час 30 мин по сравнению с 4 часами в чугунной изложнице. Внесены изменения в ТИ НТЗ-М-04-2007, п. 5.1.1.

4. Изготовлена опытно-промышленная партия слитков, отлитых в течение 10 – 12 мин. Отлито 42 слитка, из них 3 слитка отлиты в течение 7 – 7 мин. 30 сек. Слитки прошли контроль ОТК мартеновского цеха и переданы на склад ремонта для поставки в колесопрокатный цех.

На основании полученных результатов рекомендуется время отливки слитков колесной стали уменьшить до 10 – 12 мин.

При изменении геометрических и теплофизических параметров литейной формы, теплоизолирующих вставок, изменения химического состава разливаемых сталей и утепления слитка, скорость отливки колесных слитков должна быть скорректирована по практическим результатам.

5. При переходе в мартеновском цехе на отливку слитков в стальные изложницы изменились теплофизические условия затвердевания слитков. Вопрос внедрения стальных изложниц решался на заводе на основе резкого повышения стойкости стальных изложниц (400 – 500 плавов) по сравнению с чугунными (80 – 100 плавов). Влияния изменения теплофизических условий кристаллизации внутренней зоны слитка при изменении материала изложницы в процессе освоения отливки специально не подвергалось экспериментальным исследованиям. Результаты математического моделирования показали, что отливки в стальные изложницы формирования осевой части слитка находятся в более благоприятных условиях. Результаты математического моделирования подтвердили прогрессивность принятого на заводе решения о выводе чугунных изложниц из эксплуатации.

#### 4.9. Обсуждение результатов работы и мероприятий по повышению энергосбережения в мартеновском цехе

Полученные и обсуждаемые результаты являются частью более широких мероприятий по повышению эффективности производства транспортного металла и энергосбережения в мартеновском цехе. Повышение эффективности работы оборудования мартеновского цеха связано, в частности, с сокращением времени раз-

ливки стали и охлаждения слитков в изложницах при снижении брака по усадочным дефектам и горячим трещинам, повышением долговечности футеровки разливочных ковшей и научно-техническим обоснованием отбраковки слитков в мартеновском цехе.

Последнее, в частности, связано с повышением эффективности технологических процессов по внепечной обработке, разливке жидкого металла, разливки стали в слитки и эффективности использования парка сменного оборудования.

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, прежде всего, 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). Что, в свою очередь, означает возможность снижения температуры металла, передаваемого с печи-ковша на вакууматор, даёт возможность уменьшить время нагрева металла на LHF, снизить расходы электроэнергии и, в свою очередь, создаёт более благоприятные условия для службы и стойкости рабочей футеровки вакууматорных ковшей.

При сокращении времени разливки (увеличении скорости разливки) теоретически уменьшается объём усадки, питаемой в процессе разливки, и увеличивается объём усадки, которая должна быть скомпенсирована жидким металлом прибыльной части слитка в процессе его кристаллизации. При постоянном объёме металла прибыльной части слитка, который для данной конструкции слитка определяется высотой утеплительной вставки слитка и уровнем её наполнения, постоянном расходе теплоизолирующей смеси для отливки слитка, установке теплоизолирующих

вставок «заподлицо» с верхним торцом изложницы и отливке слитка до уровня совпадения поверхности смеси с верхней кромкой вставки, уровень налива металла в прибыль примерно постоянный. Условно постоянный и объём металла в прибыльной части слитка. Колебания этих величин при отливке слитков на 6-ти местных поддонах определяются допусками на высоту изложниц и горизонтальностью положения поддона в процессе разливки.

Математическое моделирование выполняется для номинальных условий разливки, т.е. не учитывает отмеченных колебаний, хотя их влияние также может быть оценено.

Приведенные выше результаты математического моделирования и влияния уменьшения времени наполнения слитка с 18 до 10 минут показали, что глубина усадочной раковины от уровня налива металла в прибыль увеличивается со 130 до 160 мм для слитков, отлитых в чугунные изложницы, и от 110 до 150 мм для слитков, отлитых в стальные изложницы.

Результаты математического моделирования показывают, что при уменьшении высоты вставки до 200 мм усадочная раковина находится в пределах объёма теплоизолирующей вставки.

На заводе неоднократно задавался вопрос о возможности уменьшения высоты вставки до 200 мм. Рассматривая этот вопрос с позиций возможности сосредоточения усадочной раковины в пределах объёма утеплительной вставки высотой 200 мм, на него может быть дан положительный ответ.

При этом следует иметь в виду, что такое решение ничего не даст для прямого решения вопроса – уменьшения расходного коэффициента металла на прокат. Общая масса слитка при этом не изменится, а уменьшение объёма прибыльной части слитка приведёт к увеличению отходов от тела слитка.

Однако, в ряде случаев на практике непосредственно подприбыльная поверхность слитка поражается «потёками» науглероженного металла из прибыльной части слитка, которые образуются вследствие прорыва «воротника» из шлакообразующей смеси, задерживающейся в заплечиках под вставкой. Это затрудняет отрезку

прибыльной части слитка от его тела и приводит к браку головных заготовок по «непрорезам». Этот момент технологии не может быть промоделирован, и целесообразность такого решения может быть оценена только экспериментальным путём.

При высоте утеплительной вставки 220 мм в ряде случаев на практике имело место прохождение первого реза непосредственно под нижней кромкой утеплительной вставки. При увеличенной скорости разливки (10 мин) номинально глубина усадочной раковины может составлять 150 – 160 мм. В этих случаях расстояние от первого реза до дна усадочной раковины во вставке составляет 60 – 70 мм. При уменьшении высоты вставки до 200 мм, в случае смещения раскроя слитка к головной части при увеличении высоты отрезаемого «доньшка» на 20 мм приведёт к тому, что расстояние от дна усадочной раковины в теле слитка до первого реза (до верхнего торца головной заготовки) уменьшится соответственно на 20 мм и составит всего 40 – 50 мм. Такое положение опасно тем, что зона подприбыльной ликвации приблизится к верхнему торцу головной заготовки и может проникнуть в нее. Это может привести к браку колёс из металла головных заготовок по макроструктуре.

В связи с отмеченным, уменьшение высоты вставки до 200 мм целесообразно опробовать лишь для увеличения длины тела слитка с целью уменьшения брака заготовок по «непрорезам» при строжайшем контроле соблюдения проектного раскроя слитка и высоты отрезаемого доньшка не более 60 мм. В противном случае, уменьшение брака головных заготовок по «непрорезам» может привести к увеличению брака колёс по макроструктуре.

Учитывая результаты математического моделирования и возможные на практике погрешности, связанные с допусками на размеры изложниц, колебаниями распределения уровня налива металла по изложницам на 6-ти местных поддонах в мартеновском цехе и дисциплины соблюдения проектного раскроя слитка следует признать на данном этапе высоту теплоизолирующих вставок 220 мм оптимальной.

#### 4.10. Результаты расчета усадочной раковины трубных слитков при различных технологических параметрах разливки слитка.

Глубина открытой усадочной раковины (УР) трубных слитков, отливаемых в сквозные, уширенные книзу изложницы без дополнительного бокового утепления прибыльной части, оказывает существенное влияние на качество внутренней поверхности труб.

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 используется математическая модель гидродинамических и теплофизических процессов в период разливки металла в изложницу и дальнейшего его формирования в ней (раздел 2). 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. После окончания заливки и образования усадочной рако-

вины, 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 4.2 при обычном получении слитка и при доливке расплава.

Таблица 4.2 – Расчет усадочной раковины при различных технологических параметрах разливки слитка

| Уровень наполнения, м | Время заливки, мин | ДТФ после заливки, % | Объем долива после 1,5 мин. выдержки, л | Объем открытой УР, м <sup>3</sup> | Объем закрытой УР, м <sup>3</sup> |
|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1,55                  | 10,5               | 0,45                 | 2,78                                    | 0,0059                            | 0,0039                            |
| 1,55                  | 10,5               | 0,45                 | не доливался                            | 0,00911                           | 0,0035                            |
| 1,55                  | 13,5               | 0,52                 | 2,08                                    | 0,00486                           | 0,0039                            |
| 1,55                  | 13,5               | 0,52                 | не доливался                            | 0,00781                           | 0,00304                           |
| 2,05                  | 15,5               | 0,57                 | 1,88                                    | 0,00575                           | 0,00528                           |
| 2,05                  | 15,5               | 0,57                 | не доливался                            | 0,00821                           | 0,00469                           |
| 2,05                  | 12,5               | 0,50                 | 2,82                                    | 0,00657                           | 0,00587                           |
| 2,05                  | 12,5               | 0,50                 | не доливался                            | 0,00939                           | 0,00587                           |

Результаты расчета показывают, что глубина УР уширенного книзу 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 Б.7).

#### 4.11. Выводы по разделу 4

1. Проведенные численные эксперименты позволили сократить время отливки круглых слитков колесной стали, рассчитать рациональные геометрические размеры слитка и утеплительной вставки, материала изложницы, что позволяет сократить ресурсо- и энергозатраты при производстве слитков колесной стали.
2. Разработанный пакет прикладных программ позволяет прогнозировать и минимизировать размеры УР круглых уширенных книзу (без бокового утепления головной части) слитков путем корректировки технологических параметров их отливки (продолжительности отливки и «подкачки»),

что сокращает энерго- и ресурсозатраты на производство слитков трубной стали.

## ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ современного состояния проблемы формирования слитков трубной и колесной стали с точки зрения трещиностойкости, величины усадочной раковины, сокращения ресурса- и энергозатрат. Для успешного ведения технологических процессов, применяемых в изготовлении бесшовных труб и железнодорожных колес, требуются весьма высокие качественные характеристики поверхности исходной заготовки, т.к. 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 отражается на перераспределении внутренних дефектов в слитке, в том числе усадочного происхождения. Актуальной является возможность уменьшения времени освобождения слитка из изложницы, что позволит увеличить количество плавок, не повлияв на качество слитка, и тем самым, повысить ресурса- и энергосбережение при производстве слитков трубной и колесной стали.

2. Математическая модель физических процессов, происходящих при расчете гидродинамических и теплофизических процессов при разливке и формировании слитков адаптирована для высоких цилиндрических стальных слитков. Модель базируется на системе нелинейных дифференциальных уравнений гидродинамики, теплопереноса, описывающих процессы передачи импульса и тепла в расплаве. Тепловые эффекты плавления и кристаллизации учитываются с помощью квазиравновесной двухфазной зоны.

3. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать объемы открытой и закрытой усадочной раковины для высоких цилиндрических слитков.

4. Разработанный программный комплекс был 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».

5. Математическая модель и ПО позволяют прогнозировать размеры УР круглых уширенных книзу (без бокового утепления головной части) слитков путем корректировки технологических параметров их отливки.

6. Проведенные численные эксперименты позволили сократить время отливки круглых слитков колесной стали, рассчитать рациональные геометрические размеры слитка и утеплительной вставки, материала изложницы, что позволяет сократить ресурсо- и энергозатраты при производстве слитков колесной стали.

7. При отливке транспортного металла в 8-ми заготовочные слитки сокращение продолжительности отливки слитка с 18 до 10 минут ведёт к уменьшению времени разливки плавки-ковша 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), что 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.

8. В ТИ НТЗ-М-02-2006 п.7.3.8 были внесены изменения по сокращению длительности отливки слитков до 14 – 16 мин и указанные рекомендации внедрены в производство.

9. Совместно с мартеновским цехом ОАО «Интерпайп – НТЗ», КПЦ и ЦЗЛ произведено изменение высоты утеплительных вставок с 270 до 220 мм. Изделия с указанными размерами производятся Северским заводом и внедрены в производство.

10. 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Математическое обеспечение и компьютерные технологии для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в металлургии: Монография / В.И. Бондаренко и др. – Донецк: Юго-Восток, 2013. – 210 с.
2. Затвердевание металлов и металлических композиций. Учебник для вузов / Ф.В. Недопекин и др. – Киев: Наукова думка, 2009. – 412 с.
3. Недопекин Ф.В. Тепломассоперенос в затвердевающем бинарном расплаве в условиях смешанной конвекции с учетом турбулентности / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов, И.Л. Повх // ИФЖ. – 1994. – Т. 67. – № 3-4. – С. 202-208.
4. Недопекин Ф.В. Обобщенная математическая модель гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических процессах / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов. – 2002.
5. Недопекин Ф.В. Донецкая школа моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в металлургических процессах / Ф.В. Недопекин, В.С. Бородин, В.В. Белоусов // Кристаллизация и компьютерные модели.—Ижевск: Изд-во Удм. унив. – 1994. – С. 85-89.
6. Бондаренко В.И. Расчет усадочной раковины в слитках трубной стали / В.И. Бондаренко, В.В. Белоусов // Труды научной конференции Донецкого национального университета по итогам научно-исследовательской работы за период 2003-2004 гг. – Донецк: ДонНУ, 2005. – С. 65-66.
7. Расчет гидродинамических и теплофизических процессов в слитках трубной стали / Н.Ф. Анищенко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 3. – С. 91-93.
8. Бондаренко В.И. Расчет усадочных раковин в слитках, уширенных книзу / В.И. Бондаренко // Международная научно-методическая конференция «Проблемы математического моделирования». Тезисы докладов. – Днепропетровск: ДГТУ, 2007. – С. 59-61.
9. Оценка влияния гидродинамических и теплофизических процессов на

- формирование усадочных раковин в круглых стальных слитках / В.И. Бондаренко и др. // Прикладные проблемы аэрогидромеханики и тепломассопереноса. 2 международная научная конференция. – Днепропетровск, 2008. – С. 72-74.
10. Bilousov V.V. V. Computer modeling of wheel steel ingots formation. / V.V. V. Bilousov, V.I.I. Bondarenko. – Jaremche, 2011. – 147-154 с.
  11. Бондаренко В.И. Computer modeling formation of wheel steel ingots / В.И. Бондаренко, В.В. Белоусов // Матеріали міжнародної наукової конференції «IV Українсько-Польські Наукові Діалоги». – Хмельницький-Яремче, 2011. – С. 164-165.
  12. Visualization of Process of Wheel Steel High Ingots Simulation / V.I. Bondarenko и др. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Т. 287.
  13. Разработка математического обеспечения для исследования процессов гидродинамики и тепломассопереноса в стальных изделиях / В.В. Белоусов и др. // 14-й Минский международный форум по тепломассообмену. – Минск, 2012. – Т. 2.-Ч. 1. – С. 21-26.
  14. 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.
  15. Бондаренко В.И. Обобщенная математическая модель для информационной технологии создания прикладных программ моделирования в металлургии / В.И. Бондаренко, В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин // Міждержавна науково-методична конференція Проблеми математичного моделювання. Тези доповідей. – Днепродзержинск, 2013. – С. 25-27.
  16. The mathematical model of hydrodynamics and heat and mass transfer at formation of steel ingots and castings / V.I. Bondarenko и др. // Archives of Foundry Engineering. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 13-16.
  17. Математическая модель гидродинамических и тепломассообменных процессов

- в агрегате печь-ковш / В.В. Белоусов и др. // 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.
18. Математическая модель определения оптимальной высоты кристаллизатора в установке непрерывной разливки стали / Ф.В. Недопекин и др. // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – № 1 (76). – С. 74-80.
  19. Математическое моделирование гидродинамических и теплофизических процессов при формировании круглого слитка колесной стали / В.И. Бондаренко и др. // Материалы международной научно-практического семинара «Научно-технический прогресс в металлургии». – Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 41-50.
  20. Математическая модель гидродинамических и тепломассообменных процессов в агрегате ковш – печь / В.В. Белоусов и др. // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2017. – № 1(76). – С. 20-27.
  21. Бондаренко В.И. Интерфейсная оболочка для задач моделирования процессов тепло-массопереноса / В.И. Бондаренко, В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин // Искусственный интеллект. – 1997. – № 1-2. – С. 86-90.
  22. Применение компьютерных технологий при моделировании аэродинамики газовых потоков в период слива чугуна из миксера в ковш / В.В. Белоусов и др. // Искусственный интеллект. – 1999. – № 1. – С. 90-93.
  23. Hydrodynamics and mass transfer in solidificating ingot with internal cooler / F. V Nedopekin и др. // Hongwai Jishu/Infrared Technology. – 1998. – Т. 20. – № 6. – С. 24-28.
  24. Гидродинамика и теплоперенос в формирующемся слитке с внутренним холодильником / Ф.В. Недопекин и др. // Изв.РАН. Металлы. – 1998. – № 5. – С. 24-28.
  25. Hydrodynamic and heat transfer in a solidifying ingot with internal cooling / F. V

- Nedopekin и др. // Russian Metallurgy (Metally). – 1998. – № 5. – С. 27-33.
26. Математическое моделирование тепломассопереноса при формировании многослойного слитка / Ф.В. Недопекин и др. // Известия РАН. Металлы. – 2001. – № 6. – С. 40-44.
  27. Mathematical simulation of heat and mass transfer up on the multilayer ingot forming / F. V Nedopekin и др. // Metally. – 2001. – № 6. – С. 40-44.
  28. 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.
  29. 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.
  30. Информационная система расчета задач тепломассопереноса / В.В. Белоусов и др. // Математическое моделирование. – 2005. – № 2 (14). – С. 8–14.
  31. 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.
  32. Бондаренко В.И. Программная система для моделирования задач тепломассопереноса / В.И. Бондаренко // Труды международного научно-практического семинара «Гидродинамика и экология». К 100-летию со дня рождения чл.-корр. НАН Украины – профессора И.Л. Повха / ред. А.Б. Ступин. – Донецк: ДонНУ, 2009. – С. 15-19.
  33. Бондаренко В.И. Применение математических моделей в информационной технологии создания прикладных программ моделирования гидродинамики и тепломассообменных процессов при производстве металлургических изделий / В.И. Бондаренко, В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин // Матеріали IV міжнародної конференції Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу. –

- Днепропетровск: ДНУ, 2012. – С. 219-221.
34. Бондаренко В.И. Информационная технология для разработки прикладных программ моделирования в металлургии / В.И. Бондаренко, Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов // XVII Международная конференция «теплотехника и энергетика в металлургии». – Днепропетровск: НМетАУ, 2014. – С. 19-20.
  35. Математическое моделирование аэродинамики бурого дыма при переливах чугуна из миксера в ковш с учетом струй азота / В.В. Бодряга и др. // 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. 335-338.
  36. Математическое моделирование процессов образования тонкой металлической стеклянной ленты / Ю.А. Баздырева и др. // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 2(4). – С. 143-147.
  37. Hydrodynamics and heat and mass transfer during formation of thin metal glass tape / Y.A. Bazdyreva и др. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Т. 192. – № 1.
  38. Повышение экологической безопасности при подавлении бурого дыма азотно-водным аэрозолем / В.В. Белоусов и др. // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – Т. 4-2(6). – С. 21-25.
  39. Интенсификация процесса десульфурации в агрегате ковш-печь / Ф.В. Недопекин и др. // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2017. – № 1. – С. 74-80.
  40. Визуализация процесса моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов в агрегате ковш-печь / В.В. Белоусов и др. // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 4-2(6). – С. 166-170.
  41. Белоусов В.В. Математический инструментарий для задач тепломассопереноса

- в металлургических процессах: Учебное пособие / В.В. Белоусов, В.И. Бондаренко. – Донецк: Цифровая типография, 2017. – 84 с.
42. Программный продукт «Математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в стальных слитках» / В.И. Бондаренко и др. – Украина: Свидетельство о регистрации авторского права на произведение №47898, 2013.
  43. Электронный учебник «Математическое моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в стальных слитках» / В.И. Бондаренко и др. // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 15-20.
  44. Электронный учебник «Математическое моделирование аэродинамики выбросов бурого дыма при переливах чугуна» / В.И. Бондаренко и др. // В сборнике: Информационные и педагогические технологии в современном образовательном учреждении. Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор Е.А. Смирнова. – Череповец: ЧГУ, 2017. – С. 137-143.
  45. Обучающая система для моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов в металлургии / В.И. Бондаренко и др. // 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.
  46. Трубное производство / Б.А. Романцев и др. – 2-е изд., – Москва: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 970 с.
  47. Осадчий В.Я. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец. – М: «Интермет инжиниринг», 2001. – 608 с.
  48. Килов А.С. Производство заготовок. Трубы. - Кн. 4. Производство, обработка, разрезка и соединение труб / А.С. Килов, Р.Ш. Мансуров. – Оренбург: ГОУ

ОГУ, 2007. – 216 с.

49. Ваткин Я.Л. Трубное производство / Я.Л. Ваткин, Ю.Я. Ваткин. – 1970. – 512 с.
50. Производство железнодорожных колес / Г.А. Бибик и др. – Москва: Металлургия, 1982. – 232 с.
51. Копперс У. Производство железнодорожных колес на высоком техническом уровне / У. Копперс, М. Кунц, М. Линденблатт // Черные металлы. – 2006. – № 3. – С. 75-79.
52. Стали для железнодорожных колес повышенной эксплуатационной стойкости / Г.А. Филиппов и др. // Металлург. – 2014. – № 3. – С. 88-96.
53. Кузовков А.Я. Опыт производства железнодорожных колес из непрерывнолитой заготовки / А.Я. Кузовков, Л.К. Федоров, А.А. Фетисов // Сталь. – 1998. – № 6. – С. 12-14.
54. Отчет по НИР «Развитие процессов непрерывной разливки и прессвалковой прошивки трубной заготовки за рубежом». – М.:Институт" Черметинформация", 1998. – 109 с.
55. Зимовец В.Г. Совершенствование производства стальных труб / В.Г. Зимовец, В.Ю. Кузнецов. – Москва: МИСиС, 1996. – 480 с.
56. Макаров О. Путь горячих колес / О. Макаров // Популярная механика. – 2012. – № 12(122). – С. 90-94.
57. Яковченко А.В. Проектирование профилей и калибровок железнодорожных колес: Монография / А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева, Р.А. Голышков. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 491 с.
58. Снитко С.А. Автоматизированное проектирование колес, калибровок, инструмента деформации и процессов в колесопрокатном производстве: Монография / С.А. Снитко, А.В. Яковченко, Н.И. Ивлева. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 342 с.
59. ПолигонСофт [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.poligonsoft.ru/> (дата обращения: 01.08.2018).
60. Монастырский А.В. Моделирование литейных процессов. Работаем в

- "ПолигонСофт" / А.В. Монастырский // Литейное производство. – 2009. – № 6. – С. 19-22.
61. Прогноз образования горячих трещин и расчет коробления отливок в СКМ ЛП «ПолигонСофт» / А.В. Монастырский и др. // Литейное производство. – 2009. – № 5. – С. 46-49.
  62. Тихомиров М.Д. Физико-математические основы компьютерного моделирования литейных процессов. Система моделирования «Полигон»: Сб. ЦНИИ Материалов--90 лет в материаловедении / М.Д. Тихомиров, Д.Х. Сабилов, А.А. Абрамов // Юбилейный выпуск. – 2002. – С. 151-176.
  63. Твердіння металів і металевих композицій. Підручник для ВНЗ / Ф.В. Недопьокін и др. – друге, доо. – Київ: Наукова думка, 2009. – 448 с.
  64. Тихомиров М.Д. Особенности постановки задач при моделировании литейных процессов / М.Д. Тихомиров // Численные методы. Преимущества и недостатки. Сб. Компьютерный анализ литейной технологии: проблемы и перспективы. Материалы семинара 15-19 октября 2007. – СПб: ЦНТИ «Прогресс», 2007. – С. 20-29.
  65. Тихомиров М.Д. Модели литейных процессов в САМ ЛП «Полигон» / М.Д. Тихомиров // литейные материалы, технология, оборудование.-Сб. науч. тр. ЦНИИМ, вып. 1. – СПб, 1995. – С. 21-25.
  66. Баст Ю. Использование системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПОЛИГОН» для исследования поля температур алюминиевых сплавов / Ю. Баст, Ю.В. Котова, М. Айцурадзе // Вестник ПГТУ, Машиностроение, материаловедение. – 2007. – № 139-144.
  67. Нехендзи Ю.А. Стальное литье / Ю.А. Нехендзи. – Москва: Metallurgizdat, 1948. – 481 с.
  68. Гуляев Б.Б. Литейные процессы / Б.Б. Гуляев. – Москва: Машгиз, 1960. – 274 с.
  69. Голод В.М. Проблема оптимизации питания отливок / В.М. Голод // Теплофизика процессов затвердевания стали. Сб. науч. тр. ИПЛ АН СССР. – Киев, 1979. – С. 139-153.

70. Борисов Г.П. Давление в управлении литейными процессами / Г.П. Борисов. – Киев: Наукова думка, 1988. – 272 с.
71. Котлярский Ф.М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов / Ф.М. Котлярский. – Киев: Наукова думка, 1990. – 230 с.
72. Койнов И.Л. Компьютерное исследование процессов питания в отливках из алюминиевых сплавов при литье в кокиль и песчаные формы / И.Л. Койнов // Кристаллизация и компьютерные модели.-Сб. науч. тр. – Ижевск: УдГУ, 1991. – С. 115-124.
73. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М: Мир, 1979. – 392 с.
74. Тихомиров М.Д. Приложение к журналу / М.Д. Тихомиров // Литейное производство. – 2001. – № 12. – С. 8-14.
75. ООО «НПО «ПРОМОДЕЛЬ». LVMFlow - моделирование литейных процессов [Электронный ресурс]. – URL: <http://lvmflow.ru/> (дата обращения: 01.08.2018).
76. Гиршович Н.Г. Чугунное литье / Н.Г. Гиршович. – М.: Металлургиздат, 1949. – 370 с.
77. Вольнов И.Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов – состояние, проблемы, перспективы / И.Н. Вольнов // Литейщик России. – 2007. – № 6. – С. 14-17.
78. MAGMA and Partners [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.magmaflow.de> (дата обращения: 01.08.2018).
79. ITT ProCast [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.procastparts.com> (дата обращения: 01.08.2018).
80. Flow-3D - CFD Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.flow3d.com/> (дата обращения: 01.08.2018).
81. Simtec inc [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.simtec-inc.com/>.
82. Engineering Simulation and 3D Design Software [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения: 15.08.2018).
83. Югов В.П. Решение задач теплообмена. ANSYS 5.7 Thermal Analysis Guide /

- В.П. Югов. – Перевод. – Москва: KAD-FEM GmbH, 2001. – 110 с.
84. COMSOL Multiphysic ПО для мультифизического моделирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения: 15.08.2018).
  85. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB / Г.В. Бирюлин. – СПб: ГУИТМО, 2006. – 77 с.
  86. Зимик В.Д. Турбулентная конвекция / В.Д. Зимик, П.Г. Фрик. – Москва: Наука, 1988. – 173 с.
  87. Garon A.M. Velocity and heat transfer measurements in thermal convection / A.M. Garon, R.J. Goldstein // Phys. Fluids. – 1973. – Т. 16. – № 11. – С. 1818-1825.
  88. Белоусов В.В. Гидродинамика и тепломассоперенос в больших стальных слитках: Докторская диссертация / В.В. Белоусов. – Институт технической теплофизики НАН Украины, 1996.
  89. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. кн.1 / Б. Гебхард и др. – Москва: Мир, 1991. – 528 с.
  90. Белоусов В.В. Численное исследование гидродинамических и теплофизических процессов при разливе стали сверху / В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин, И.В. Куликов // Изв.ВУЗов. Черная металлургия. – 1984. – № 7. – С. 56-59.
  91. Полежаев В.И. Математическое моделирование конвективного тепломассообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И. Полежаев, А.В. Буне, Н.А. Вerezуб. – Москва: Наука, 1987. – 271 с.
  92. Сугаванам А. Численное исследование отрывного обтекания профилей турбулентным потоком. / А. Сугаванам, Д. Ву // Ракетная техника и космонавтика. – 1982. – Т. 20. – № 5. – С. 20-27.
  93. Chapmen D.R. Computer vs wind tunnels for aerodynamicflow simulations / D.R. Chapmen, H. Mark, M.W. Pirtle // Aeronautics and Astronautics. – 1975. – Т. 13. – С. 21-30.
  94. Коваль В.П. Движение расплава в изложнице при сифонной заливке / В.П.

- Коваль, В.А. Шиловский // Изв.вузов.Черная металлургия. – 1981. – № 12. – С. 63-66.
95. Ву Д. Численный метод расчета турбулентных течений / Д. Ву, А. Сугаванам // Ракетная техника и космонавтика. – 1978. – Т. 16. – № 9. – С. 105-114.
96. Launder B.E. The numerical computation of turbulent flow / B.E. Launder, D.B. Spalding // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 1974. – Т. 3. – № 2. – С. 269-288.
97. Jones V.P. The prediction of laminarization with a 2 equation model of turbulence / V.P. Jones, B.E. Launder // International Journal of Heat and mass transfer. – Т. 15. – С. 301-314.
98. Harsha P.T. Prediction of free turbulent kinetic energy method, Free Turbulent Shear Flows / P.T. Harsha // Conference Proceeding, NASA report № SP-321, Vol.1. – С. 463-519.
99. Rodi W. The prediction of free turbulent boundary layers by use of a two-equation model of turbulence, Ph.D.dissertation / W. Rodi. – University of London, 1972.
100. Острач С. Естественная конвекция в замкнутых объемах / С. Острач // Современное машиностроение, Серия А. – 1989. – № 6. – С. 81-103.
101. Ostrach S. Natural convection inside a horizontal cylinder / S. Ostrach, R. Hantman // Chem.Engr.Comm. – 1981. – Т. 9. – С. 213-244.
102. Ян К.Т. Переходы и бифуркации при ламинарной термогравитационной конвекции в замкнутых полостях / К.Т. Ян // Современное машиностроение, Серия А. – 1989. – № 6. – С. 103-127.
103. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование гидродинамических и теплофизических процессов формирования отливок для энергомашиностроения. Разработка математической модели теплофизических и гидродинамических процессов при затвердевании отливки: Отчет о НИР (промежуточный) / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов. – Донецкий государственный университет, 1988. – 45 с.
104. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. – Москва: Мир,

1988. – 544 с.
105. Зекели Д. Анализ гидродинамических явлений в ковшах при холодном моделировании / Д. Зекели, Н.Х. Эль-Кадах, Д.А. Грэвет // Инжекционное моделирование 80. – Лелау, Москва: Металлургия, 1982. – С. 86–90.
  106. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – Москва: Наука, 1974. – 350 с.
  107. Турбулентность принципы и применения / ред. У. Фроста, Т. Молдена. – Москва: Мир, 1980. – 526 с.
  108. Маргинузи Р. Исследование применимости различных моделей турбулентности для расчета турбулентных течений в трубах. Часть 11. Алгебраические модели для напряжений и k-epsilon-модели / Р. Маргинузи, А. Поллард // Аэрокосмическая техника. – 1990. – № 9. – С. 43-53.
  109. Артюхов Л.Ю. О численном моделировании турбулентной полуограниченной струи / Л.Ю. Артюхов, И.В. Кошкариков, В.П. Локтионов // Тепломассоперенос в жидкостях и газах. – Алма-Ата: КазГУ, 1982. – С. 63-68.
  110. Kulacki F.A. Natural convection in plane layers and cavities with volumetric energy sources in: Natural convection fundamentals and applications / F.A. Kulacki, D.E. Richards. – Washington: Hemisphere publishing Corporation, . – 179-258 с.
  111. Фарук Б. Турбулентная тепловая конвекция в замкнутой полости с внутренним тепловыделением / Б. Фарук // Теплопередача. – 1988. – № 4. – С. 105-112.
  112. Овчинников М.И. Математическая модель турбулентного течения металла в ковше установки АСЕА-СКФ / М.И. Овчинников, В.А. Щербаков // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 7. – С. 37-39.
  113. Зекели Д. Теплопередача и массоперенос при перемешивании металла в разливочном ковше / Д. Зекели // Инжекционное моделирование 80. – Лелау, Москва: Металлургия, 1982. – С. 99-95.
  114. Зекели Д. Компьютерное конструирование( CAD-CAM-метод промежуточного разливочного устройства / Д. Зекели, Н. Эль-каддах //

- Инжекционное моделирование 80. – Лелау, Москва, 1982.
115. Эль-Кадах Н.Х. Турбулентность и перемешивание в технологических процессах в ковшевой металлургии / Н.Х. Эль-Кадах, Д. Зекели // Инжекционное моделирование 80. – Лелау, Москва: Металлургия, 1986. – С. 90-105.
  116. Гутри Р.И.Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплавов методом вдувания порошков / Р.И.Л. Гутри // Инжекционное моделирование 80. – Лелау, Москва, 1982. – С. 75-92.
  117. Роди В. Модели турбулентности окружающей среды / В. Роди // Методы расчета турбулентных течений. – Москва: Мир, 1984. – С. 227-322.
  118. Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики / О.А. Ладыженская. – Москва: Наука, 1973. – 334 с.
  119. Kulacki F.A. Steady and transient thermal convection in a fluid layer with uniform volumetric energy sources / F.A. Kulacki, A.A. Emara // J. of Fluid Mech. – 1977. – Т. 83. – С. 375-395.
  120. Peyret R. Computational methods for fluid flow / R. Peyret, T.D. Taylor. – Springer, 1983.
  121. Грязнов В.Л. Исследование некоторых разностных схем аппроксимацией граничных условий для численного решения уравнений тепловой гравитационной конвекции / В.Л. Грязнов, В.И. Полежаев. – Москва, 1974. – 66 с.
  122. F.E. H. Dynamics and heat transfer in the von Karman wake of a rectangular cylinder / H. F.E., J.. Fromm // Phys. of Fluids. – 1964. – № 8. – С. 1147-1156.
  123. Соболев В.В. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье / В.В. Соболев, П.М. Трефилов. – Москва: Металлургия, 1988. – 160с с.
  124. Недопекин Ф.В. Численное моделирование гидродинамики и тепломассопереноса в затвердевающем стальном слитке / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов, А.Я. Гриценко // Изв.ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. – № 7. – С. 70-73.

125. Недопекин Ф.В. Машинное моделирование химической неоднородности в затвердевающем стальном слитке / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов, А.Я. Гриценко // втоматизация пректирования и управления качеством отливок. – С.Петербург, 1991. – С. 38-42.
126. Belousov V.V. Hydrodynamics and heat and mass-transfer in the steel ingot mould system / V.V. Belousov, P.V. Nedopeokin // Heat and mass transfer tecnological processes. – Int.conf. Jurmala, 1991. – С. 73-74.
127. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики и затвердевании при формировании слитков и отливок / Ф.В. Недопекин // ИФЖ. – 1989. – Т. 57. – № 3. – С. 450-458.
128. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – Москва: Наука, 1989. – 616 с.
129. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. / Д. Андерсон, Д. Таннехилл, Р. Плетчер. – Москва: Мир, 1990. – 728 с.
130. Численное исследование гидродинамики расплава при сифонной заливке / С.П. Ефименко и др. // Изв.ВУЗов. Черная металлургия. – 1981. – № 12. – С. 63-66.
131. Шмрга Л. Завердевание и кристаллизация стальных слитков / Л. Шмрга. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
132. Повх И.Л. Техническая гидродинамика / И.Л. Повх. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 540 с.
133. Емельянов А.П. Технология литейной формы / А.П. Емельянов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
134. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – Москва: Металлургия, 1976. – 552 с.
135. Огурцов А.П. Процессы формирования стального слитка: математическое модели-рование заполнения и затвердевания / А.П. Огурцов, В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин. – Днепродзержинск: ДГТУ, 1994. – 180 с.
136. Недопекин Ф.В. Влияние газового зазора на процессы происходящие в

- затвердевающим расплаве / Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов // Изв.ВУЗов. Черная металлургия. – 1986. – № 7. – С. 157-158.
137. Огурцов А.П. Математическое моделирование процессов переноса в слитках и от-ливках с учетом внешних воздействий / А.П. Огурцов, Ф.В. Недопекин, В.В. Белоусов. – Днепродзержинск: ДГТУ, 1997. – 199 с.
138. Ресурсоэнергетические проблемы черной металлургии (в порядке обсуждения) / Г.М. Дружинин и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. – Т. 57. – № 1. – С. 3-8.
139. Макаров А.А. Объектно-ориентированный подход в программировании / А.А. Макаров, Ю.П. Лукашин. – Москва: Финансы и статистика, 2000. – 356 с.
140. Соммервилл И. Инженерия программного обеспечения (Software Engineering) / И. Соммервилл. – Москва, 2002. – 642 с.
141. Фокс Д. Программное обеспечение и его разработка / Д. Фокс. – Москва: Мир, 1985. – 368 с.
142. Иванов А.Г. Объектно-ориентированный подход технологии программирования / А.Г. Иванов, А.. Пятницкий, Ю.Е. Филинов. – Питер: СПб, 2003. – 443 с.
143. Marco C. Comparing OOP Languages: Java, C++, Object Pascal [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.marcocantu.com/papers/ooplang.htm> (дата обращения: 15.08.2018).
144. Martin H. Multithreading – The Delphi Way [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nickhodes.com/MultiThreadingInDelphi/ToC.html> (дата обращения: 20.08.2018).
145. Лисков Б. Использование абстракций и спецификаций при разработке программ / Б. Лисков, Д. Гатэг. – Москва: Мир, 1989. – 424 с.
146. Jackson M.-A. Program Design / M.-A. Jackson. – Academic Press, 1985.
147. Мандел Т. Разработка пользовательского интерфейса (Серия «Для программистов») / Т. Мандел. – Москва: ДМК Пресс, 2001. – 416 с.
148. Жарков С. Shareware: профессиональная разработка и продвижение

программ / С. Жарков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 320 с.

149. Nielsen J. 10 Usability Heuristics for User Interface Design [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/> (дата обращения: 19.08.2018).
150. ИНТЕРПАЙП НТЗ [Электронный ресурс]. – URL: <http://ntrp.interpipe.biz/ru> (дата обращения: 20.08.2018).
151. Мариупольский МК им. Ильича: Комбинат сегодня [Электронный ресурс]. – URL: <https://ilyichsteel.metinvestholding.com/ru/about/common> (дата обращения: 16.08.2018).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Основные компоненты системы проектирования

| Операции                                                                               | Результат                                                                                | Модели, методы                                                                                                                                                                                        | Средства                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Формирование геометрии слитка и расчетной области по чертежной документации заказчика. | Геометрия расчетной области. Построение сетки.                                           | Методы агрегирования, фиктивных областей и ступенчатой аппроксимации.                                                                                                                                 | Разработанный модуль «Область»                   |
| Формирование математической модели.                                                    | Подпрограммы расчета.                                                                    | Неявная монотонная конечно-разностная схема с привлечением методов интегро-интерполяционного, «возмущенного» оператора, разности против потока и прогонки. Алгоритм обобщенной математической модели. | Разработанный модуль математической модели.      |
| Инкапсуляция действий по расчету.                                                      | Набор классов «Задача»                                                                   | Методы объектно-ориентированного программирования. Алгоритм проведения расчета.                                                                                                                       | Средства разработки ПО                           |
| Преобразование данных математической модели.                                           | Операторы преобразования типов данных для сопряжения объектов.                           | Метод модульного программирования. Использование процедурных и функциональных типов и переменных.                                                                                                     | Специальный модуль-посредник.                    |
| Подготовка к выполнению моделирования конечным пользователем.                          | Пользовательский интерфейс, графическая визуализация процесса расчета и массивов данных. | Методы объектно-ориентированного программирования. Методология Human-Computer Interaction (HCI).                                                                                                      | Компоненты разработанной графической подсистемы. |

Таблица А.2 – Химический состав исследуемой колесной стали

| №№<br>пп | Марка<br>стали | Содержание химических элементов, масс. %% |               |               |        |        |               |               |       |               |       |                 |             |
|----------|----------------|-------------------------------------------|---------------|---------------|--------|--------|---------------|---------------|-------|---------------|-------|-----------------|-------------|
|          |                | C                                         | Mn            | Si            | P      | S      | Cr            | Ni            | Cu    | V             | Mo    | Al              | [H]         |
| 1.       | КП-2           | 0,57-<br>0,63                             | 0,65-<br>0,85 | 0,25-<br>0,42 | ≤0,020 | ≤0,018 | ≤0,25         | ≤0,25         | ≤0,25 | <0,10         | <0,08 | 0,010-<br>0,030 | ≤2,0<br>ppm |
| 2.       | КП-Т           | 0,65-<br>0,68                             | 0,70-<br>0,90 | 0,25-<br>0,40 | ≤0,025 | ≤0,020 | 0,15-<br>0,30 | 0,10-<br>0,25 | ≤0,30 | 0,08-<br>0,15 | <0,08 | 0,013-<br>0,030 | ≤2,0<br>ppm |
| 3.       | R 7            | 0,46-<br>0,49                             | 0,65-<br>0,76 | 0,25-<br>0,37 | ≤0,018 | ≤0,013 | 0,18-<br>0,25 | <0,25         | <0,25 | <0,05         | -     | 0,015-<br>0,030 | ≤2,0<br>ppm |
| 2.       | R 8            | 0,51-<br>0,55                             | 0,65-<br>0,76 | 0,25-<br>0,37 | ≤0,018 | ≤0,013 | 0,18-<br>0,25 | ≤0,25         | ≤0,25 | 0,01-<br>0,03 | -     | 0,015-<br>0,030 | ≤2,0<br>ppm |

Таблица А.3 – Размеры утепляющих вставок в изложницы для отливки колесного металла

| Изложница | Тип изложниц | Номер изделия | Размеры вставки, мм |     |     |    |    |                |
|-----------|--------------|---------------|---------------------|-----|-----|----|----|----------------|
|           |              |               | L                   | R   | a   | b  | C  | $\alpha^\circ$ |
| Колесная  | КП-6         | № 6           | 735                 | 240 | 290 | 20 | 5  | 60             |
| Колесная  | КП-8         | № 10          | 791                 | 252 | 220 | 20 | 10 | 60             |

Таблица А.4 – Продолжительность выдержки сталеразливочных составов в разливочном пролете и до начала раздевания слитков (для изложниц КП-6, КП-8)

| №№ п.п. | Марка стали                                               | Продолжительность выдержки сталеразливочного состава, час-мин |                      |
|---------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------|
|         |                                                           | в разливочном пролете                                         | до начала раздевания |
| 1       | КП-1                                                      | 1-00                                                          | 4-00                 |
| 2       | B2, B2N; B3N; B5; B5E; B5T; B6E; B6T; B7E; БЛ-2.          | 0-40                                                          | 4-00                 |
| 3       | КП-2; 3; T; R1N; R6T; R7T; R8T; R9T; Класс«В»; Класс «С». | 0-40                                                          | 4-00                 |

Таблица А.5 – Метрологический контроль технологического процесса

| Наименование процессов, место отбора пробы или измерения | Наименование контролируемого параметра          | Рабочий диапазон контролируемого параметра | Периодичность контроля    | Наименование и тип средства измерения или метода измерения | Погрешность средства измерения или метода измерения | Место регистрации параметров |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------|
| Сталеразливочный ковш                                    | Температура футеровки, $^{\circ}\text{C}$       | 500-1200                                   | Ежеплавочно               | Лазерный пирометр Raynger MX 4                             | $\pm 1\%$<br>или $1^{\circ}\text{C}$                | Паспорт плавки               |
| Сталеразливочный ковш                                    | Расстояние от шлака до верхней кромки ковша, мм | 500-1000                                   | Перед вакуумированием     | Визуально, по кирпичам кладки ковша                        | -                                                   | Паспорт плавки               |
| Сталеразливочный ковш                                    | Температура металла, $^{\circ}\text{C}$         | 1450-1660                                  | Ежеплавочно               | Блоки тип ТРП-0290М<br>Вторичный пр. тип DIGI-T/DTK        | $\pm 7^{\circ}\text{C}$                             | Паспорт плавки               |
| Сталеразливочный ковш                                    | Удельный расход аргона при продувке, л/мин.     | 0-500                                      | Ежеплавочно               | ARK – 500<br>TZA – 4                                       | $\pm 1\%$<br>$\pm 1\%$                              | Паспорт плавки               |
| Вакууматор                                               | Текущий уровень металла в ковше, мм             | 800-1000                                   | В процессе вакуумирования | Визуально                                                  | -                                                   | -                            |

|                                       |                                  |          |             |                            |                     |                |
|---------------------------------------|----------------------------------|----------|-------------|----------------------------|---------------------|----------------|
| Присадки легирующих и шлакообразующих | Масса, кг                        | 0-1000   | Ежеплавочно | Весо-дозировочный комплекс | $\pm 1\%$<br>от НПД | Паспорт плавки |
| Газонасыщенность стали                | Содержание водорода в стали, ppm | 0,5-10,0 | Ежеплавочно | Система "Hydriis"          | $\pm 0,4$ ppm       | Паспорт плавки |

Таблица А.6 – Теплофизические параметры стали КП2

| №/№ | Параметр                             | Значение           |             | №/№ | Параметр                         | Значение        |                   |
|-----|--------------------------------------|--------------------|-------------|-----|----------------------------------|-----------------|-------------------|
|     |                                      | Численное          | Размерность |     |                                  | Численное       | Размерность       |
| 1   | Теплопроводность жидкой стали КП-2   | $\lambda_{ж}=27,1$ | Вт/мК       | 5   | Плотность жидкой стали КП-2      | $\rho_{ж}=7000$ | Кг/м <sup>3</sup> |
| 2   | Теплопроводность твердой стали КП- 2 | $\lambda_{т}=33,9$ | Вт/мК       | 6   | Плотность твердой стали КП -2    | $\rho_{т}=7620$ | Кг/м <sup>3</sup> |
| 3   | Начальная температура расплава       | $T_0=1550$         | °С          | 7   | Теплоемкость жидкой стали КП-2   | $c_{ж}=699$     | $\frac{Дж}{кгК}$  |
| 4   | Температура ликвидус                 | $T_L=1474$         | °С          | 8   | Теплоемкость твердой стали КП -2 | $c_{т}=578$     | $\frac{Дж}{кгК}$  |

Таблица А.7 – Теплофизические параметры чугуновой (СЧ 15) и стальной (СТ 20) изложниц

| №/№ | Параметр                             | Значение       |                   | №/№ | Параметр                            | Значение      |                   |
|-----|--------------------------------------|----------------|-------------------|-----|-------------------------------------|---------------|-------------------|
|     |                                      | Численное      | размерность       |     |                                     | Численное     | размерность       |
| 1   | Высота изложницы                     | $L_z=3130$     | мм                | 6   | Температура нагрева изложницы       | $T_{из}=50$   | °С                |
| 2   | Внешний диаметр изложницы            | $L_{r1}=850$   | мм                | 7   | Внутренний диаметр изложницы        | $L_{r2}=500$  | мм                |
| 3   | Теплопроводность чугуновой изложницы | $\lambda=38,4$ | Вт/мК             | 8   | Теплопроводность стальной изложницы | $\lambda=51$  | Вт/мК             |
| 4   | Плотность чугуновой изложницы        | $\rho_t=7800$  | кг/м <sup>3</sup> | 9   | Плотность стальной изложницы        | $\rho_t=7900$ | кг/м <sup>3</sup> |
| 5   | Теплоемкость чугуновой изложницы     | $c_{из}=541$   | $\frac{Дж}{кгК}$  | 10  | Теплоемкость стальной изложницы     | $c_{из}=480$  | $\frac{Дж}{кгК}$  |

**Таблица А.8 – Геометрические и теплофизические параметры теплоизолирующих материалов**

| №/<br>№ | Параметр                  | Значение           |                  | № /<br>№ | Параметр              | Значение      |                   |
|---------|---------------------------|--------------------|------------------|----------|-----------------------|---------------|-------------------|
|         |                           | численное          | Размер-<br>ность |          |                       | численное     | Размер-<br>ность  |
| 1       | Высота вкладыша           | 200, 220, 250, 270 | мм               | 3        | Плотность вкладыша    | $\rho_1=2000$ | Кг/м <sup>3</sup> |
| 2       | Теплопроводность вкладыша | $\lambda_{ж}=2$    | Вт/мК            | 4        | Теплоемкость вкладыша | $c_{ж}=1380$  | $\frac{Дж}{кгК}$  |

**Таблица А.9 – Химический состав исследуемых плавов**

| № плавки | Содержание химических элементов, масс. % |      |      |       |       |      |      |      |       |       | Температура разливки, °С |
|----------|------------------------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|--------------------------|
|          | C                                        | Mn   | Si   | P     | S     | Cr   | Ni   | Cu   | Al    | V     |                          |
| 31527    | 0,65                                     | 0,83 | 0,34 | 0,009 | 0,010 | 0,28 | 0,11 | 0,05 | 0,023 | 0,083 | 1554                     |
| 32526    | 0,67                                     | 0,82 | 0,30 | 0,012 | 0,009 | 0,28 | 0,10 | 0,04 | 0,024 | 0,093 | 1554                     |
| 32527    | 0,66                                     | 0,82 | 0,34 | 0,013 | 0,008 | 0,27 | 0,11 | 0,05 | 0,023 | 0,083 | 1554                     |
| 31526    | 0,65                                     | 0,83 | 0,34 | 0,009 | 0,010 | 0,28 | 0,11 | 0,05 | 0,023 | 0,083 | 1554                     |

**Таблица А.10 – Параметры усадочной раковины в головных частях 8-ми заготовочных слитков колесной стали массой 4,2 тонны**

| № плавки | Условный номер заготовки в плавке | Высота от кромки короны до реза Н <sub>1</sub> головной заготовки от тела слитка, мм | Высота от кромки короны до тела слитка, Н <sub>2</sub> , мм | Высота от кромки короны до дна открытой усадочной раковины, Н <sub>3</sub> , мм | Структура по разлому           | Структура по поперечному огневому резу прибыльной части                              |
|----------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 31527    | 1                                 | 235                                                                                  | 190                                                         | 70                                                                              | Следов усадочной раковины нет  | Ниже дна усадочной раковины следов усадки нет, металл плотный                        |
|          | 2                                 | 235                                                                                  | 160                                                         | 160                                                                             | Пятно шлака диаметром 30-35 мм | -                                                                                    |
|          | 3                                 | 230                                                                                  | 180                                                         | 70                                                                              | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки нет, металл плотный                                                    |
| 32526    | 1                                 | 210-220                                                                              | 130-140                                                     | 120                                                                             | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки нет, металл плотный В дне УР слой расплавленного шлака толщиной 6-8 мм |
|          | 2                                 | 250                                                                                  | 160                                                         | 90 – 100                                                                        | Следов усадочной раковины нет  | -                                                                                    |
|          | 3                                 | 230                                                                                  | 180                                                         | 80                                                                              | Следов усадочной раковины нет  | -                                                                                    |
| 32527    | 1                                 | 240                                                                                  | 140                                                         | 100                                                                             | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки нет, металл плотный                                                    |
|          | 2                                 | 250 – 260                                                                            | 160                                                         | 100                                                                             | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки визуально не обнаружено                                                |
|          | 3                                 | 250                                                                                  | 160                                                         | 80                                                                              | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки нет, металл плотный                                                    |
| 31526    | 1                                 | 165                                                                                  | 135 – 140                                                   | 20 – 30                                                                         | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки нет, металл плотный                                                    |
|          | 2                                 | 240                                                                                  | 190                                                         | 80                                                                              | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки нет, металл плотный                                                    |
|          | 3                                 | 240                                                                                  | 190                                                         | 100                                                                             | Следов усадочной раковины нет  | Следов усадки нет, металл плотный                                                    |

Таблица А.11 – Динамика глубины жидкой лунки колесного слитка в процессе затвердевания

| №№<br>п п | Время<br>затвердевания<br>слитка, мин | Глубина жидкой лунки, мм                 |                       |                       |
|-----------|---------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|           |                                       | Эксперимент<br>(чугунная из-<br>ложница) | Расчет                |                       |
|           |                                       |                                          | Чугунная<br>изложница | Стальная<br>изложница |
| 1         | 45                                    | 1600                                     | 1720                  | 1348                  |
| 2         | 50                                    | 500                                      | 630                   | 465                   |
| 3         | 60                                    | 300                                      | 400                   | 310                   |
| 4         | 70                                    | 200                                      | 213                   | 236                   |

Таблица А.12 – Расчетное изменение температуры поверхности чугунных и стальных изложниц КП-8 при отливке и затвердевании слитков колесной стали массой 4,2 тонны (контрольные измерения). Температура начала разливки стали – 1555<sup>0</sup>С. Продолжительность отливки слитка – 16 мин.

| № замера | Время от<br>начала<br>отливки,<br>мин. | Температура поверхности, <sup>0</sup> С |        |                  |        |                    |             |                  |             |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------------------|--------|------------------|--------|--------------------|-------------|------------------|-------------|
|          |                                        | Чугунная изложница                      |        |                  |        | Стальная изложница |             |                  |             |
|          |                                        | низ                                     |        | середина         |        | Низ                |             | середина         |             |
|          |                                        | экспе-<br>римент                        | расчет | экспе-<br>римент | расчет | экспе-<br>римент   | рас-<br>чет | экспе-<br>римент | рас-<br>чет |
| 11-02    | 0                                      | 97                                      | 100    | 107              | 100    | 104                | 100         | 129              | 100         |
| 1        | 4                                      | 123                                     | 116    | 107              | 100    | 110                | 112         | 129              | 100         |
| 2        | 6                                      | 150                                     | 138    | 107              | 100    | 125                | 141         | 129              | 100         |
| 3        | 8                                      | 185                                     | 161    | 107              | 100    | 155                | 170         | 129              | 100         |
| 4        | 10                                     | 210                                     | 182    | 107              | 111    | 179                | 220         | 129              | 113         |
| 5        | 12                                     | 240                                     | 201    | 107              | 125    | 205                | 230         | 129              | 159         |
| 6        | 14                                     | 261                                     | 219    | 135              | 136    | 226                | 250         | 137              | 197         |
| 7        | 16                                     | 278                                     | 238    | 165              | 155    | 241                | 355         | 157              | 200         |
| 8        | 18                                     | 295                                     | 272    | 187              | 186    | 255                | 389         | 182              | 218         |
| 9        | 20                                     | 301                                     | 299    | 212              | 220    | 268                | 300         | 190              | 245         |
| 10       | 22                                     | 324                                     | 306    | 230              | 232    | 283                | 311         | 205              | 259         |
| 11       | 24                                     | 335                                     | 325    | 257              | 251    | 290                | 322         | 235              | 286         |
| 12       | 26                                     | 339                                     | 337    | 274              | 284    | 299                | 329         | 249              | 301         |
| 13       | 28                                     | 351                                     | 351    | 305              | 307    | 320                | 335         | 260              | 311         |
| 14       | 30                                     | 363                                     | 363    | 315              | 326    | 339                | 342         | 295              | 329         |
| 15       | 32                                     | 380                                     | 371    | 330              | 341    | 354                | 345         | 304              | 337         |
| 16       | 34                                     | 402                                     | 376    | 347              | 350    | 365                | 349         | 325              | 344         |
| 17       | 36                                     | 425                                     | 381    | 375              | 361    | 373                | 352         | 343              | 356         |
| 18       | 40                                     | 435                                     | 400    | 385              | 384    | 399                | 353         | 348              | 361         |
| 19       | 44                                     | 451                                     | 402    | 408              | 391    | 417                | 394         | 360              | 368         |
| 20       | 48                                     | 457                                     | 407    | 420              | 415    | 421                | 405         | 370              | 373         |
| 21       | 52                                     | 473                                     | 410    | 443              | 425    | 430                | 455         | 383              | 378         |
| 22       | 56                                     | 486                                     | 420    | 456              | 438    | 436                | 455         | 402              | 392         |
| 23       | 60                                     | 490                                     | 430    | 470              | 450    | 453                | 455         | 415              | 417         |
| 24       | 64                                     | 505                                     | 440    | 498              | 454    | 460                | 457         | 427              | 428         |
| 25       | 68                                     | 512                                     | 460    | 504              | 479    | 472                | 466         | 440              | 459         |
| 26       | 72                                     | 512                                     | 480    | 510              | 500    | 478                | 473         | 462              | 469         |
| 27       | 76                                     | 521                                     | 495    | 515              | 510    | 488                | 484         | 470              | 479         |
| 28       | 80                                     | 523                                     | 509    | 519              | 515    | 490                | 493         | 460              | 499         |
| 29       | 84                                     | 531                                     | 519    | 541              | 525    | 499                | 501         | 466              | 499         |
| 30       | 88                                     | 542                                     | 535    | 542              | 530    | 503                | 501         | 471              | 499         |
| 31       | 92                                     | 537                                     | 536    | 533              | 534    | 503                | 502         | 479              | 500         |
| 32       | 96                                     | 540                                     | 538    | 537              | 534    | 504                | 502         | 482              | 501         |
| 33       | 100                                    | 543                                     |        | 537              |        | 509                | 502         | 500              | 501         |

Таблица А.13 – Результаты математического моделирования изменения глубины усадочной раковины от скорости разливки стали и высоты теплоизолирующей вставки

| №№<br>пп | Высота<br>теплоизо-<br>лирующего<br>вкладыша,<br>мм | Время<br>отливки<br>слитка,<br>мин | Глубина усадочной ра-<br>ковины в слитке, мм |                                    | №№<br>пп | Высота<br>теплоизо-<br>лирующего<br>вкладыша,<br>мм | Время<br>отливки<br>слитка,<br>Мин | Глубина усадочной ра-<br>ковины в слитке, мм |                                    |
|----------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------|
|          |                                                     |                                    | Отлитом в<br>чугунную<br>изложницу           | Отлитом в<br>стальную<br>изложницу |          |                                                     |                                    | Отлитом в<br>чугунную<br>изложницу           | Отлитом в<br>стальную<br>изложницу |
| 1        | 250                                                 | 18                                 | 110                                          | 108                                | 11       | 200                                                 | 18                                 | 149                                          | 134                                |
| 2        |                                                     | 16                                 | 114                                          | 110                                | 12       |                                                     | 16                                 | 152                                          | 139                                |
| 3        |                                                     | 14                                 | 119                                          | 115                                | 13       |                                                     | 14                                 | 157                                          | 145                                |
| 4        |                                                     | 12                                 | 125                                          | 119                                | 14       |                                                     | 12                                 | 165                                          | 155                                |
| 5        |                                                     | 10                                 | 129                                          | 127                                | 15       |                                                     | 10                                 | 172                                          | 159                                |
| 6        | 220                                                 | 18                                 | 132                                          | 128                                | 16       | 190                                                 | 18                                 | 170                                          | 158                                |
| 7        |                                                     | 16                                 | 137                                          | 134                                | 17       |                                                     | 16                                 | 179                                          | 163                                |
| 8        |                                                     | 14                                 | 143                                          | 139                                | 18       |                                                     | 14                                 | 185                                          | 172                                |
| 9        |                                                     | 12                                 | 148                                          | 144                                | 19       |                                                     | 12                                 | 191                                          | 183                                |
| 10       |                                                     | 10                                 | 156                                          | 151                                | 20       |                                                     | 10                                 | 202                                          | 192                                |

Таблица А.14 – Математическое моделирование распределения температуры по сечению слитка при различном времени охлаждения его в изложнице при перегреве стали перед отливкой слитка на 79, 74, 69 °С

| №<br>№<br>пп | Время раз-<br>девания<br>слитка,<br>час | Исследуемое<br>сечение<br>слитка | Расстояние<br>от оси<br>слитка,<br>мм | Температура слитка, °С               |                                    |
|--------------|-----------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
|              |                                         |                                  |                                       | отлитом<br>в чугунную из-<br>ложницу | отлитом<br>в стальную<br>изложницу |
| 1            | 2                                       | 3                                | 4                                     | 5                                    | 6                                  |

Перегрев 79°С

|    |     |                                           |     |     |     |
|----|-----|-------------------------------------------|-----|-----|-----|
| 1  | 3   | 0,2 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0   | 553 | 532 |
| 2  |     |                                           | 50  | 550 | 530 |
| 3  |     |                                           | 100 | 535 | 513 |
| 4  |     |                                           | 150 | 521 | 487 |
| 5  |     |                                           | 200 | 472 | 448 |
| 6  |     |                                           | 250 | 413 | 382 |
| 7  |     | 1,5 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0   | 824 | 786 |
| 8  |     |                                           | 50  | 820 | 782 |
| 9  |     |                                           | 100 | 793 | 757 |
| 10 |     |                                           | 150 | 754 | 718 |
| 11 |     |                                           | 200 | 694 | 671 |
| 12 |     |                                           | 250 | 611 | 564 |
| 13 | 3,5 | 0,2 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0   | 483 | 459 |
| 14 |     |                                           | 50  | 481 | 457 |
| 15 |     |                                           | 100 | 468 | 444 |
| 16 |     |                                           | 150 | 448 | 422 |
| 17 |     |                                           | 200 | 397 | 382 |

|    |     |                                           |     |     |     |
|----|-----|-------------------------------------------|-----|-----|-----|
| 18 |     | 1,5 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 250 | 364 | 334 |
| 19 |     |                                           | 0   | 720 | 707 |
| 20 |     |                                           | 50  | 716 | 703 |
| 21 |     |                                           | 100 | 699 | 680 |
| 22 |     |                                           | 150 | 668 | 644 |
| 23 |     |                                           | 200 | 594 | 582 |
| 24 |     |                                           | 250 | 553 | 511 |
| 25 | 4,0 | 0,2 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0   | 428 | 404 |
| 26 |     |                                           | 50  | 426 | 402 |
| 27 |     |                                           | 100 | 418 | 391 |
| 28 |     |                                           | 150 | 398 | 372 |
| 29 |     |                                           | 200 | 357 | 339 |
| 30 |     |                                           | 250 | 322 | 298 |
| 31 |     | 1,5 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0   | 643 | 622 |
| 32 |     |                                           | 50  | 640 | 619 |
| 33 |     |                                           | 100 | 628 | 602 |
| 34 |     |                                           | 150 | 598 | 575 |
| 35 |     |                                           | 200 | 538 | 525 |
| 36 |     |                                           | 250 | 513 | 494 |

Перегрев 74<sup>0</sup>С

|          |          |                                           |          |          |          |
|----------|----------|-------------------------------------------|----------|----------|----------|
| 37       | 3,0      | 0,2 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0        | 547      | 523      |
| 38       |          |                                           | 50       | 545      | 521      |
| 39       |          |                                           | 100      | 530      | 505      |
| 40       |          |                                           | 150      | 506      | 479      |
| 41       |          |                                           | 200      | 464      | 423      |
| 42       |          |                                           | 250      | 389      | 378      |
| 34       |          | 1,5 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0        | 807      | 782      |
| 44       |          |                                           | 50       | 791      | 779      |
| 45       |          |                                           | 100      | 776      | 754      |
| 46       |          |                                           | 150      | 740      | 712      |
| <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b>                                  | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> |
| 47       |          |                                           | 200      | 696      | 626      |
| 48       |          |                                           | 250      | 600      | 552      |
| 49       | 3,5      | 0,2 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0        | 477      | 453      |
| 50       |          |                                           | 50       | 475      | 451      |
| 51       |          |                                           | 100      | 464      | 437      |
| 52       |          |                                           | 150      | 437      | 416      |
| 53       |          |                                           | 200      | 396      | 368      |
| 54       |          |                                           | 250      | 360      | 331      |
| 55       |          | 1,5 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0        | 707      | 686      |
| 56       |          |                                           | 50       | 704      | 683      |
| 57       |          |                                           | 100      | 686      | 664      |
| 58       |          |                                           | 150      | 656      | 632      |
| 59       |          |                                           | 200      | 588      | 560      |
| 60       |          |                                           | 250      | 541      | 494      |
| 61       | 4,0      | 0,2 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0        | 424      | 399      |
| 62       |          |                                           | 50       | 423      | 397      |
| 63       |          |                                           | 100      | 411      | 385      |
| 64       |          |                                           | 150      | 393      | 366      |
| 65       |          |                                           | 200      | 352      | 326      |
| 66       |          |                                           | 250      | 322      | 294      |
| 67       |          | 1,5 м высоты излож-<br>ницы<br>от поддона | 0        | 631      | 604      |
| 68       |          |                                           | 50       | 630      | 602      |
| 69       |          |                                           | 100      | 613      | 588      |
| 70       |          |                                           | 150      | 588      | 560      |
| 71       |          |                                           | 200      | 529      | 501      |
| 72       |          |                                           | 250      | 490      | 472      |

Перегрев 69<sup>0</sup>С

|     |     |                                   |     |     |     |
|-----|-----|-----------------------------------|-----|-----|-----|
| 73  | 3,0 | 0,2 м высоты изложницы от поддона | 0   | 542 | 516 |
| 74  |     |                                   | 50  | 540 | 514 |
| 75  |     |                                   | 100 | 526 | 499 |
| 76  |     |                                   | 150 | 501 | 434 |
| 77  |     |                                   | 200 | 444 | 417 |
| 78  |     |                                   | 250 | 406 | 374 |
| 79  |     | 1,5 высоты изложницы от поддона   | 0   | 788 | 772 |
| 80  |     |                                   | 50  | 785 | 760 |
| 81  |     |                                   | 100 | 754 | 743 |
| 82  |     |                                   | 150 | 729 | 704 |
| 83  |     |                                   | 200 | 646 | 619 |
| 84  |     |                                   | 250 | 588 | 546 |
| 85  | 3,5 | 0,2 м высоты изложницы от поддона | 0   | 474 | 446 |
| 86  |     |                                   | 50  | 473 | 444 |
| 87  |     |                                   | 100 | 459 | 432 |
| 88  |     |                                   | 150 | 439 | 411 |
| 89  |     |                                   | 200 | 379 | 362 |
| 90  |     |                                   | 250 | 357 | 328 |
| 91  |     | 1,5 м высоты изложницы от поддона | 0   | 696 | 669 |
| 92  |     |                                   | 50  | 694 | 666 |
| 93  |     |                                   | 100 | 676 | 648 |
| 94  |     |                                   | 150 | 647 | 618 |
| 95  |     |                                   | 200 | 576 | 546 |
| 96  |     |                                   | 250 | 528 | 483 |
| 97  | 4,0 | 0,2 м высоты изложницы от поддона | 0   | 421 | 392 |
| 98  |     |                                   | 50  | 419 | 390 |
| 99  |     |                                   | 100 | 408 | 379 |
| 100 |     |                                   | 150 | 380 | 362 |
| 101 |     |                                   | 200 | 350 | 322 |
| 102 |     |                                   | 250 | 319 | 290 |
| 1   | 2   | 3                                 | 4   | 5   | 6   |
| 103 | 4,0 | 1,5м высоты изложницы от поддона  | 0   | 623 | 592 |
| 104 |     |                                   | 50  | 621 | 582 |
| 105 |     |                                   | 100 | 606 | 574 |
| 106 |     |                                   | 150 | 581 | 549 |
| 107 |     |                                   | 200 | 523 | 491 |
| 108 |     |                                   | 250 | 473 | 457 |

Таблица А.15 – Результаты измерения температуры поверхности слитка при охлаждении слитков стали марки КП-2 в чугунной изложнице на высоте 1,5 м от поддона

| №№<br>пп | Марк<br>а<br>стали | Номер<br>плавки | Время, час                    |                               |                | Температура, °С              |                                             | Примечания |
|----------|--------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|------------------------------|---------------------------------------------|------------|
|          |                    |                 | Окон-ча-<br>ния раз-<br>ливки | раздевания                    |                | Слитка<br>(поверхно-<br>сти) | Изложницы<br>(поверхность<br>к центральной) |            |
|          |                    |                 |                               | Начала<br>(1-го под-<br>дона) | Оконч<br>а-ния |                              |                                             |            |
| 1        | 2                  | 3               | 4                             | 5                             | 6              | 7                            | 8                                           | 9          |

|   |       |       |       |       |       |                                                                     |                                                                     |           |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | КП-2  | 21741 | 10-30 | 14-00 | 14-18 | I – 556<br>II – 552<br>III – 553<br>IV – 552<br>V – 550<br>VI – 547 | I – 443<br>II – 443<br>III – 439<br>IV – 436<br>V – 438<br>VI – 434 | Канавы 23 |
| 2 | R – 7 | 2747  | 13-00 | 16-30 | 16-48 | I – 550<br>II – 555<br>III – 557<br>IV – 560<br>V – 553<br>VI – 558 | I – 440<br>II – 447<br>III – 443<br>IV – 445<br>V – 451<br>VI – 449 | Канавы 11 |

Таблица А.16 – Результаты промышленных исследований сокращения продолжительности разливки

| № плавки | Марка стали | № поддона | Количество слитков | Продолжительность разливки |         |                        | Замечания                                                                                                                        |
|----------|-------------|-----------|--------------------|----------------------------|---------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          |             |           |                    | начало                     | конец   | Продолжительность, мин |                                                                                                                                  |
| 1        | 2           | 3         | 4                  | 5                          | 6       | 7                      | 8                                                                                                                                |
| 42472    | КП2         | 2         |                    | 7:14:35                    | 7:28:51 | 14:16                  | t=15540C. Наехал с некрытым стопором. Нормально. Лейку не сбил. Лейка лопнула сразу в двух местах. Высота лейки примерно 100 мм. |
|          |             | 3         |                    | 7:30:30                    | 7:43:00 | 12:30                  | Лейка лопнула сразу. Настыль с самого начала разливки. Высота лейки >120 мм                                                      |
|          |             | 4         |                    | 7:44:38                    | 7:59:20 | 14:42                  | Лейка лопнула сразу. Высота лейки 50 мм. Щель 0,5 см.                                                                            |
|          |             | 1         |                    | 8:01:40                    | 8:13:45 | 12:05                  | Лейка лопнула сразу                                                                                                              |
|          |             |           |                    |                            |         |                        |                                                                                                                                  |
| 41742    | КП2         | 3         |                    |                            |         | 13:25                  |                                                                                                                                  |
|          |             | 2         |                    | 9:05:05                    | 9:17:52 | 12:47                  | Лейка лопнула сразу. Настыль с самого начала разливки. Высота лейки 70 мм                                                        |
|          |             | 1         |                    | 9:20:15                    | 9:33:40 | 13:25                  | Лейка лопнула сразу. Настыль с самого начала разливки. Высота лейки >120 мм                                                      |
|          |             | 4         |                    | 9:35:25                    | 9:49:30 | 14:05                  | Лейка лопнула сразу. Высота лейки -100 мм. После отливки поддона настыль довольно большая                                        |
|          |             | дв        |                    | 9:50:36                    | 9:57:45 | 7:07                   | Слиток будет помечен трубкой.                                                                                                    |
|          |             |           |                    |                            |         |                        |                                                                                                                                  |
| 32816    | R7          | 1         | 6                  | 12-00                      | 1-10    | 13-10                  |                                                                                                                                  |
| 1562     |             | 2         | 6                  | 13-10                      | 1-10    | 14-20                  |                                                                                                                                  |
|          |             | 3         | 6                  | 13-00                      | 1-35    | 14-35                  |                                                                                                                                  |
|          |             | 4         | 4                  | 12-00                      |         |                        |                                                                                                                                  |
|          |             |           | 22                 |                            |         |                        |                                                                                                                                  |
| 31816    | R7          | 1         | 5                  | 16-00                      | 2-00    | 18-00                  |                                                                                                                                  |
| 1557     |             | 2         | 6                  | 15-30                      | 2-10    | 17-40                  |                                                                                                                                  |

|       |        |           |    |             |      |       |                                                     |                                   |
|-------|--------|-----------|----|-------------|------|-------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|
|       |        | 3         | 6  | 16-05       | 2-00 | 18-05 |                                                     |                                   |
|       |        | 4         | 0  | -           | -    | -     |                                                     |                                   |
|       |        | 5         | 5  | 15-45       | 2-15 | 18-00 |                                                     |                                   |
|       |        |           | 22 |             |      |       |                                                     |                                   |
| 31819 | R7     | 1         | 5  |             |      | 12:40 | Фиксировалось ОТК. Данные занесены в книгу разливки |                                   |
|       |        | 2         | 6  |             |      | 12:25 |                                                     |                                   |
|       |        | 3         | 5  |             |      | 11:40 |                                                     |                                   |
|       |        | 4         | 1  |             |      | 12:05 |                                                     |                                   |
|       |        |           | 23 |             |      |       |                                                     |                                   |
| 32819 | R7     | 1         | 6  |             |      | 12:05 |                                                     |                                   |
|       |        | 2         | 6  |             |      | 12:40 |                                                     |                                   |
|       |        | 3         | 5  |             |      | 11:50 |                                                     |                                   |
|       |        | 4         | 6  |             |      | 12:10 |                                                     |                                   |
|       |        | 5         | 1  |             |      | -     |                                                     |                                   |
|       |        | 6         | 1  |             |      | -     |                                                     |                                   |
|       |        |           | 25 |             |      |       |                                                     |                                   |
| 31822 | R8     | 1         | 5  | 11-20       | 2-40 | 14-00 |                                                     |                                   |
|       |        | 2         | 6  | 12-00       | 2-00 | 14-00 |                                                     |                                   |
| 2     | 3      | 4         | 5  | 6           | 7    | 8     | 9                                                   |                                   |
|       |        | 3         | 5  | 11-40       | 2-05 | 13-45 |                                                     |                                   |
|       |        | 4         | 1  | -           | -    | н/ф   |                                                     |                                   |
|       |        | 5         | 6  | 12-20       | 2-00 | 14-20 |                                                     |                                   |
|       |        |           | 23 |             |      |       |                                                     |                                   |
| 32822 | R8     | 1         | 6  | 13-10       | 2-05 | 15-15 |                                                     |                                   |
|       |        | 2         | 6  | 13-05       | 2-00 | 15-05 |                                                     |                                   |
|       |        | 3         | 5  | 12-50       | 2-10 | 15-00 |                                                     |                                   |
|       |        | 4         | 6  | 13-15       | 2-05 | 15-20 |                                                     |                                   |
|       |        | 5         | 1  |             |      | н/ф   |                                                     |                                   |
|       |        |           | 24 |             |      |       |                                                     |                                   |
| 31861 | R7     |           |    | зад. 25 мин |      |       |                                                     |                                   |
|       | t=1562 | 1         | 6  | 10:02       |      | 13:00 | 12:0+1:0                                            | Через 8 мин – захлеб. Центровая   |
| изл.  | Чугун  | 2         | 6  |             |      | 10:30 | 9:0+1:30                                            |                                   |
|       | к-ва 8 | 3         | 6  |             |      | 13:50 | 12:10+1:40                                          |                                   |
|       |        | 4         | 4  |             |      | 13:10 | 11:35+1:35                                          |                                   |
|       |        |           | 22 |             |      |       |                                                     |                                   |
| 32861 | R7     | 1         | 6  |             |      | 13:10 |                                                     |                                   |
| изл   | стальн | 2         | 6  |             |      | 12:30 | 11:30+1:00                                          |                                   |
|       | 1563   | 3         | 6  |             |      | 13:30 | 12:0+1:30                                           |                                   |
|       | к-ва 7 | 4         | 5  |             |      | 12:00 |                                                     |                                   |
|       |        | 5 (2)     | 1  |             |      | 7:30  | 7:0+0:30                                            | о.5 м до прибыли – центр. Захлебн |
|       |        | бнд=2.1 м |    |             |      |       |                                                     | Изл. С попер. Тр.0,6Н снизу       |

Таблица А.17 – Результаты наблюдения общей продолжительности отливки 8-заготовочных слитков стали марки КП-Т

| № плавки | Продолжительность отливки по ходу разливки (№ поддона) |              |              |              |              |              |
|----------|--------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|          | 1                                                      | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            |
| 1        | 2                                                      | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            |
| 31019    | 16,42                                                  | 16,83        | 16,08        | 16,33        |              |              |
| 32019    | 17,00                                                  | 16,33        | 16,08        | 14,60        |              |              |
| 31014    | 16,17                                                  | <b>15,25</b> | <b>14,33</b> | <b>14,67</b> |              |              |
| 32014    | 16,08                                                  | 16,83        | <b>15,00</b> | <b>10,67</b> |              |              |
| 31017    | 17,33                                                  | 17,25        | 17,25        | 17,00        |              |              |
| 32017    | <b>14,83</b>                                           | <b>15,00</b> | <b>15,08</b> | <b>15,00</b> |              |              |
| 31018    | 20,08                                                  | 16,75        | 16,17        | <b>9,17</b>  |              |              |
| 32018    | 16,08                                                  | 17,25        | 17,67        | 16,92        |              |              |
| 31021    |                                                        | 16,25        | 16,42        | <b>14,17</b> |              | 16,92        |
| 32021    | 16,92                                                  | 17,25        | 17,17        | 16,67        |              |              |
| 31023    |                                                        | <b>14,92</b> | <b>14,42</b> | <b>15,67</b> |              | <b>15,25</b> |
| 32023    | <b>13,25</b>                                           | 18,17        | 16,17        | 19,17        |              |              |
| 31025    |                                                        | <b>15,33</b> | <b>15,25</b> | <b>15,00</b> |              | <b>15,08</b> |
| 32025    | <b>15,92</b>                                           | <b>15,92</b> | <b>15,50</b> | <b>15,58</b> |              |              |
| 31028    | <b>15,33</b>                                           | <b>15,08</b> | <b>15,00</b> | <b>15,00</b> |              |              |
| 32028    | <b>15,08</b>                                           | <b>15,00</b> | <b>15,25</b> | <b>14,92</b> |              |              |
| 31030    |                                                        | <b>15,92</b> | <b>14,25</b> | <b>14,33</b> |              | <b>15,75</b> |
| 32030    | 16,33                                                  | 17,75        | 17,25        | 17,00        |              |              |
| 2        | 3                                                      | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            |
| 31034    | 16,25                                                  | <b>15,58</b> | <b>15,50</b> |              | <b>15,33</b> |              |
| 32034    | 16,50                                                  | 16,58        | <b>15,17</b> | 16,00        |              |              |
| 31035    | 17,42                                                  | 16,17        | 17,33        |              | <b>14,17</b> |              |
| 32035    | 16,50                                                  | 17,00        | 17,25        | 17,08        |              |              |
| 31036    | 16,25                                                  | 16,33        | 16,33        |              | 16,33        |              |
| 32036    | 16,17                                                  | <b>15,58</b> | 16,33        | 16,50        | <b>11,00</b> |              |
| 31037    | н.д                                                    | н.д          | н.д          | н.д          | н.д          |              |
| 32037    | <b>14,08</b>                                           | 18,92        | 16,58        | 16,75        |              |              |
| 31038    | 17,00                                                  | 17,25        | 16,33        | 17,00        |              |              |
| 32038    | 17,25                                                  | <b>14,08</b> | 17,42        | <b>14,08</b> |              |              |
| 31039    | 16,25                                                  | <b>14,08</b> |              | <b>14,50</b> | <b>13,5</b>  |              |
| 32039    |                                                        | <b>15,58</b> |              | <b>14,33</b> |              | 16,67        |
| 31040    |                                                        | <b>15,50</b> | <b>15,67</b> | 17,08        |              | 18,33        |
| 32040    | 17,33                                                  | 18,17        | 19,58        | 17,25        |              |              |
| 31041    | 16,17                                                  | 16,08        | 16,33        | <b>15,92</b> |              |              |
| 32041    | <b>15,33</b>                                           | 16,00        | <b>15,50</b> |              |              |              |
| 31042    |                                                        | <b>15,50</b> | <b>13,75</b> |              | 16,67        | <b>15,25</b> |
| 32042    | 16,92                                                  | 16,50        | <b>15,75</b> |              |              | <b>15,67</b> |
| 32044    | 18,00                                                  | 18,25        | 17,92        | 17,33        | <b>10,67</b> |              |
| 31045    |                                                        |              |              |              |              |              |
| 32045    | <b>15,75</b>                                           | <b>15,58</b> | <b>15,83</b> | 16,33        |              |              |

Примечание: В таблице жирным курсивом выделены продолжительности отливки поддонов менее 16 мин при регламентированной длительности в пределах 16 – 18 мин

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

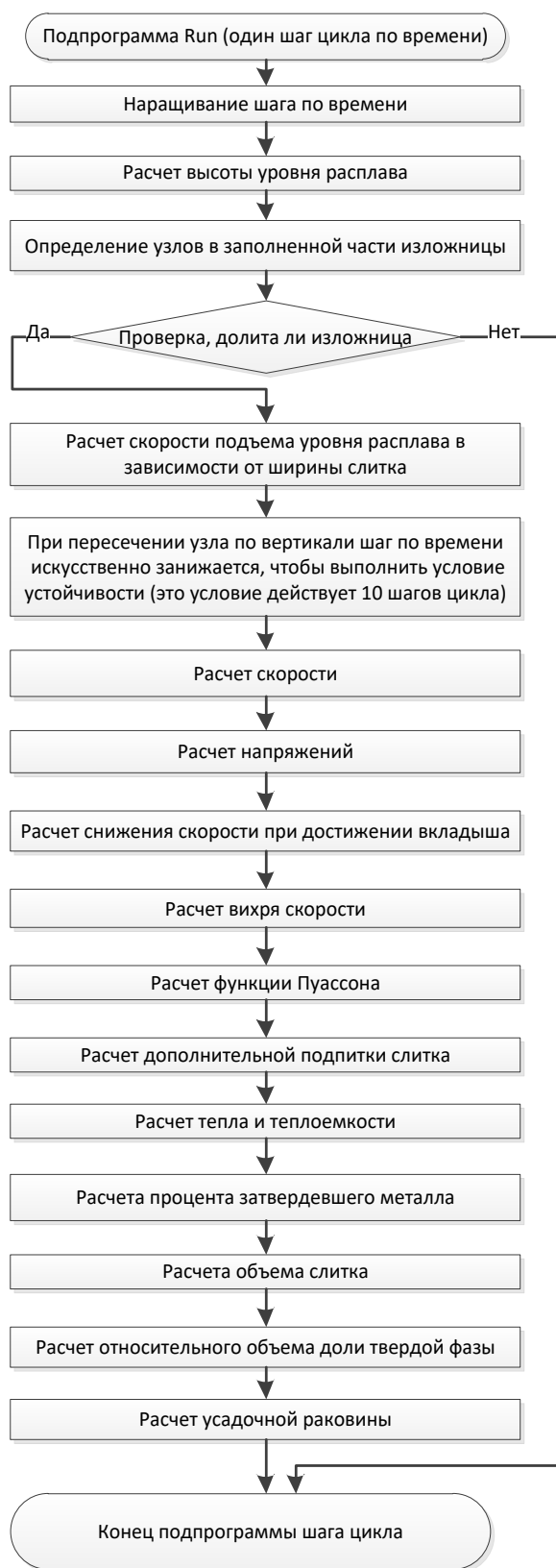
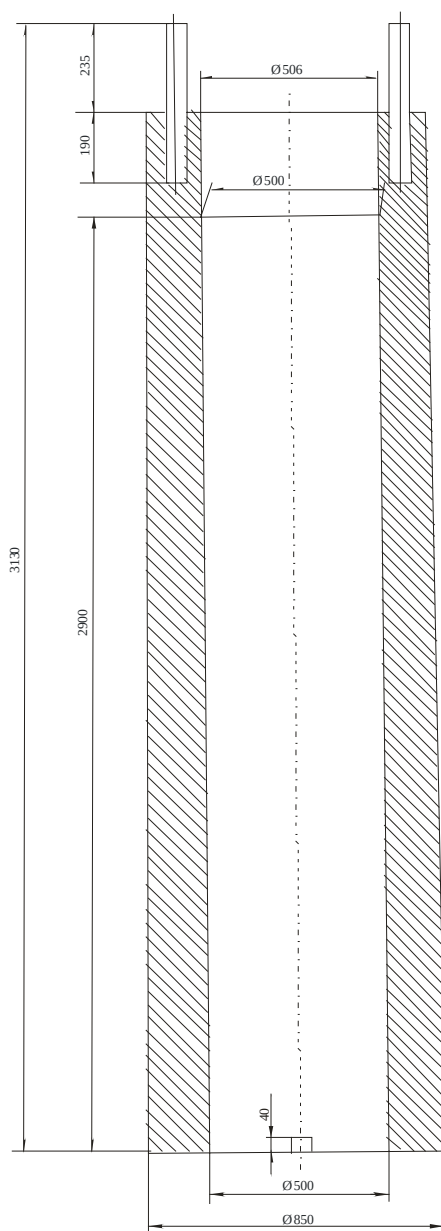
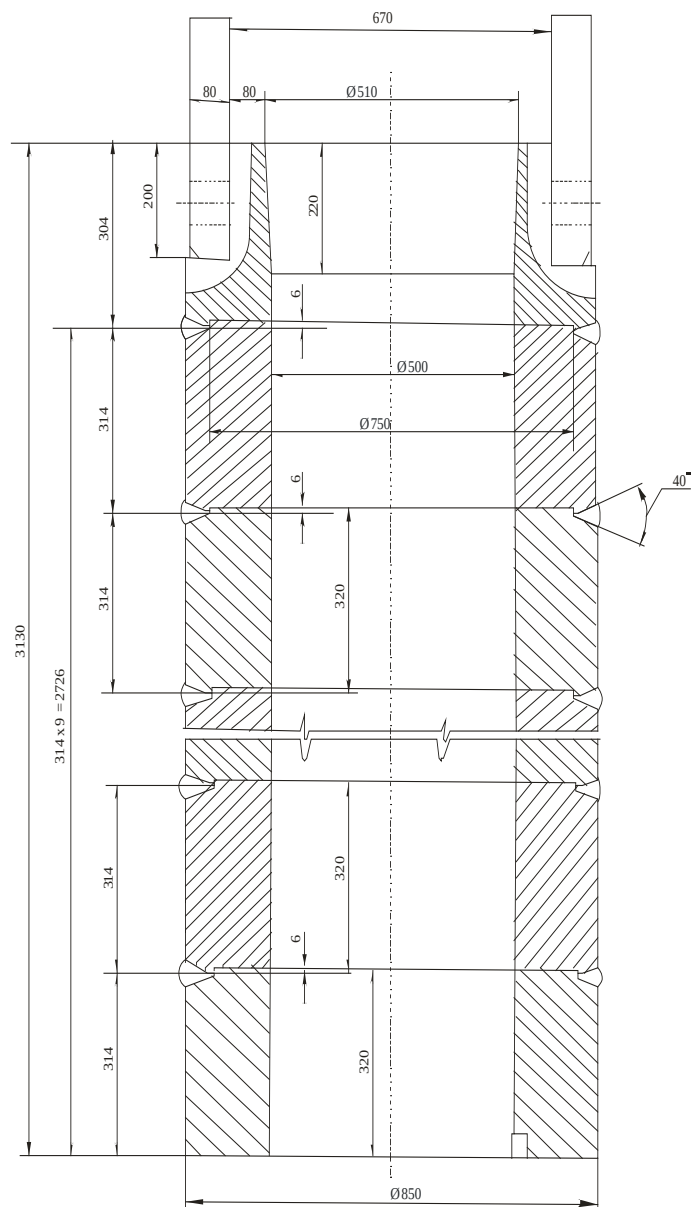


Рисунок Б.1 – Сокращенный алгоритм подпрограммы шага цикла по времени



а



б

Рисунок Б.2 – Геометрические параметры чугунной (а) и стальной (б) изложниц

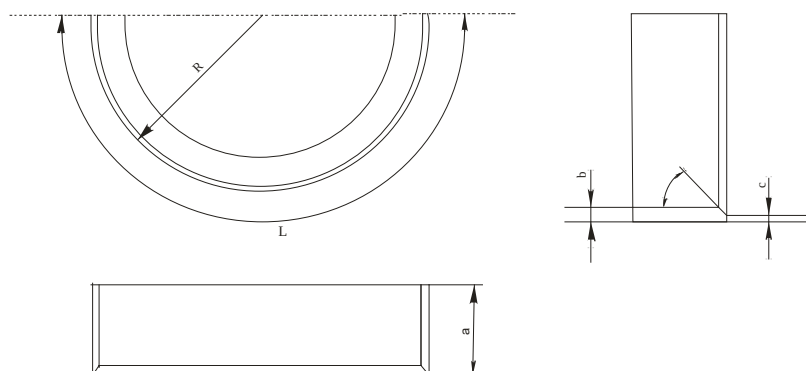


Рисунок Б.3 – Теплоизолирующие вставки МКРВ-340





Рисунок Б.4 – Усадочные раковины в 8-ми заготовочных слитках колесной стали

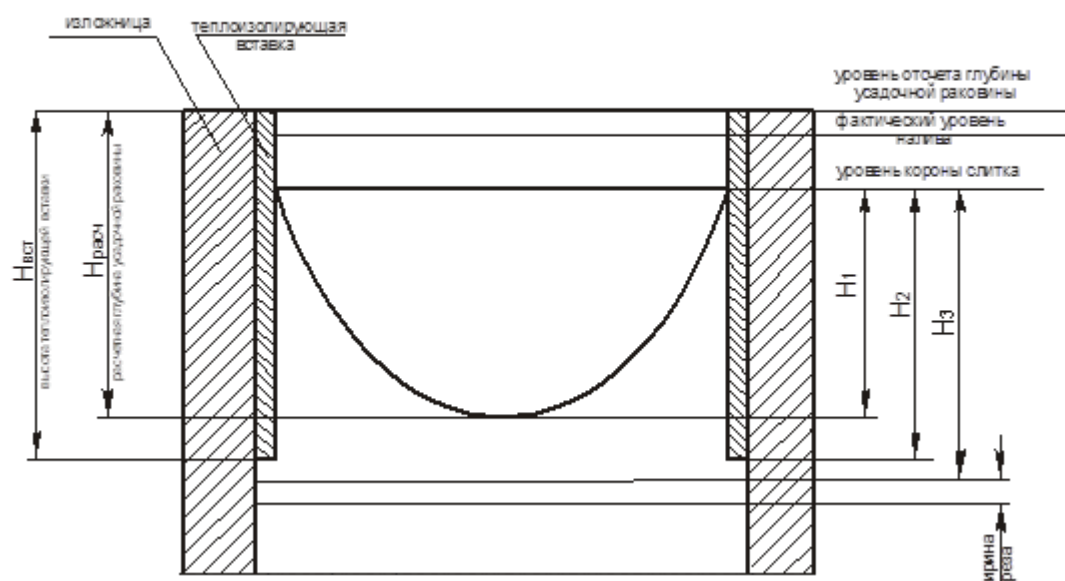


Рисунок Б.5 – Схема к замерам глубины усадочной раковины

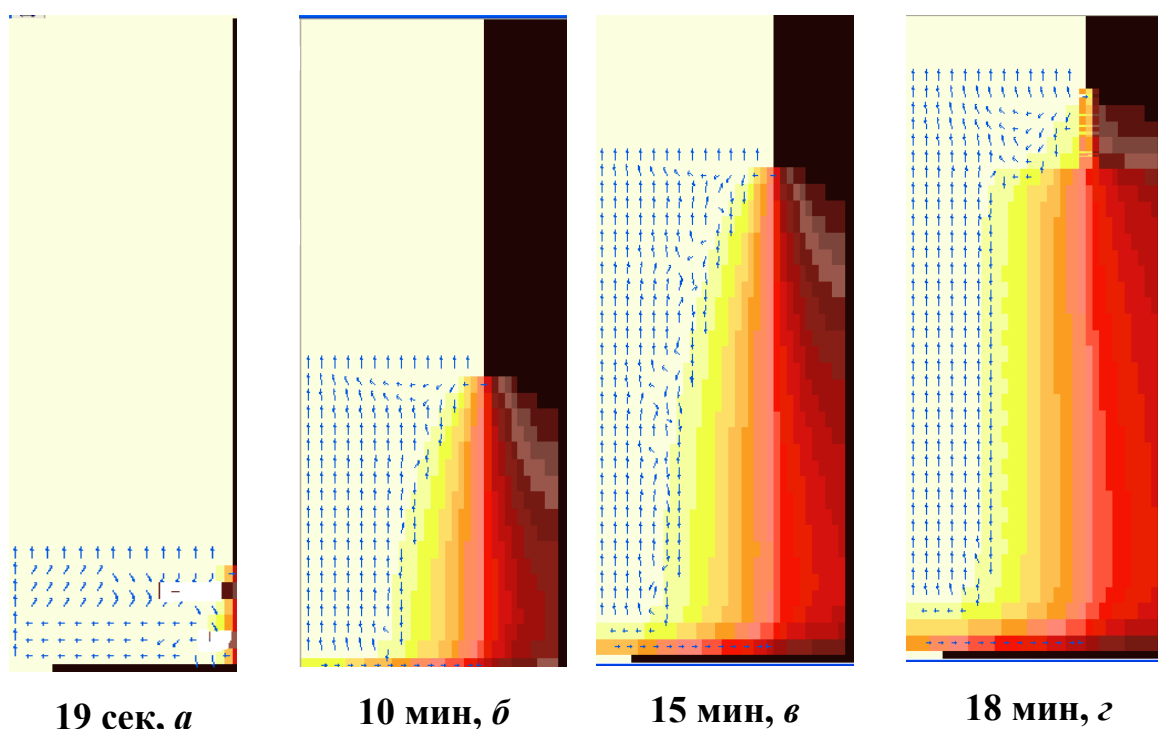


Рисунок Б.6 – Вектора вертикальной компоненты скорости и кинетика затвердевания слитка в различные моменты времени его наполнения (19 сек – а, 10 мин. – б, 15 мин – в, 18 мин – з).

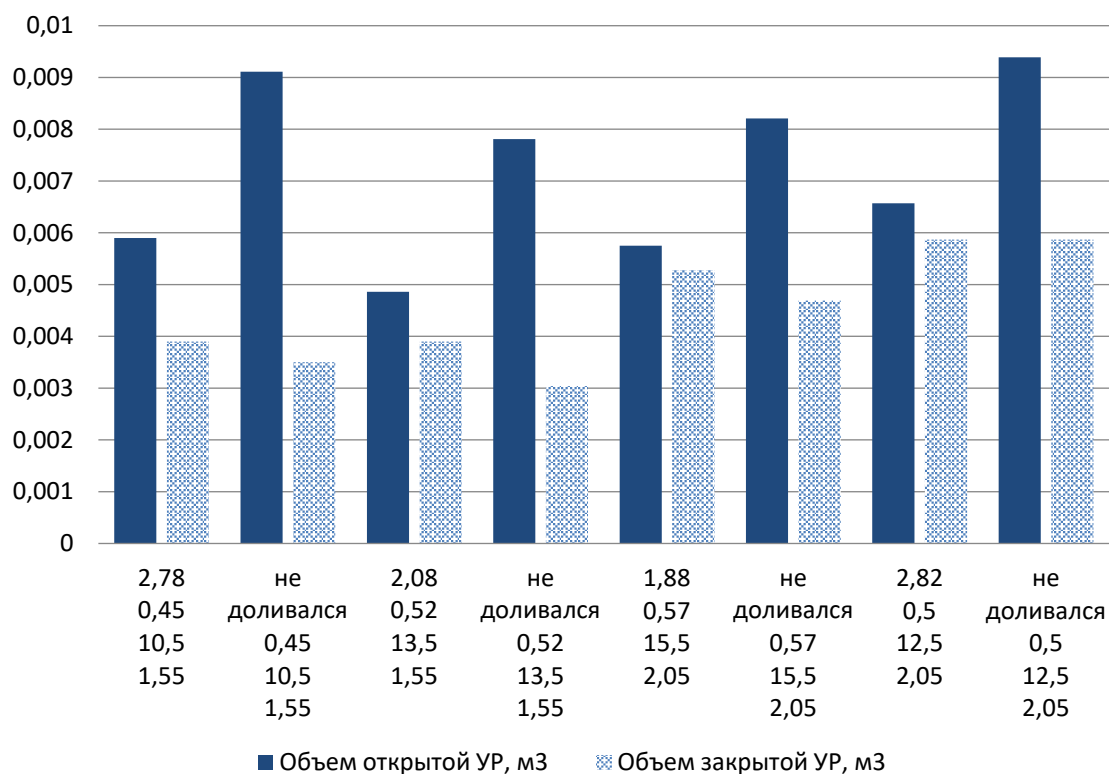


Рисунок Б.7 – Диаграмма расчета усадочной раковины при различных технологических параметрах разливки слитка

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2</p> <p>времени охлаждения слитков в стальных изложницах до «раздевания» до 3 часов 30 минут по сравнению с 4-мя часами в чугунной изложнице.</p> <p>Внесены изменения в ТИ НТЗ-М-02-2006, п.7.3.8 по сокращению длительности отливки слитков до 14-16 мин и в ТИ НТЗ-М-04-2007, п. 5.1.1 по сокращению времени охлаждения слитков в стальных изложницах до «раздевания» до 3 час 30 мин.</p> <p>Изготовлена опытно-промышленная партия слитков стали марок КП-2, КП-1, R-7, R-8, в объеме более 1440 тонн. 42 слитка отлиты в течение 10-12 мин, 3 слитка отлиты в течение 7 мин. 30 сек. Все слитки прошли контроль ОТК мартеновского цеха и переланы в колесопроткатный цех.</p> <p>Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы при массовом производстве колесной стали составит 102 400 грн. в год.</p> <p>Никаких финансовых обязательств по этому акту завод «ИНТЕРТАЙП НТЗ» не несет.</p> <p>Заключение: Использование разработанного при выполнении НИР «Энергосбережение при разливе стали» пакета прикладных программ моделирования затвердевания стальных слитков в чугунной или стальной изложнице позволяет рекомендовать его для использования на промышленных предприятиях при отработке технологии отливки слитков из углеродистых марок сталей.</p> | <p>От «ИНТЕРТАЙП НТЗ»</p> <p>От Донецкого национального университета</p> <p>И.о. заведующего НИЧ</p> <p>И.о. заведующего цеха</p> <p>Е.Н.Марьян</p> <p>Начальник мартеновского цеха</p> | <p>И.о. заведующего НИЧ</p> <p>Научный руководитель НИР, профессор кафедры ФНПМ/Э</p> <p>Профессор кафедры ФНПМ/Э</p> <p>Старший научный сотрудник</p> <p>Научный сотрудник</p> <p>И.о. начальника центральной заводской лаборатории</p> <p>С.К. Монченко</p> <p>Недопекин Ф.В.</p> <p>Белоусов В.В.</p> <p>Бондаренко В.И.</p> <p>Комаров В.Ф.</p> | <p>УТВЕРЖДАЮ</p> <p>Проректор по научной работе</p> <p>Донецкого национального университета</p> <p>«25» 04 2012 г.</p> <p>Г.А.Польский</p> <p>«25» 04 2012 г.</p> <p>Г.А.Польский</p> <p>АКТ</p> <p>внедрения результатов научно-исследовательской работы</p> <p>"Энергосбережение при разливе стали" (12-1ав/26)</p> <p>(«Энергосбережение при разливе стали»)</p> <p>Мы, нижеподписавшиеся, представители Донецкого национального университета (ДонНУ) в лице и.о. заведующего научно-исследовательской частью Радио С.В., научного руководителя г/б темы №12-1ав/26, профессора Недопекина Ф.В., ответственного исполнителя г/б темы №12-1ав/26, профессора Белоусова В.В., старшего научного сотрудника Бондаренко В.И. и научного сотрудника Комарова В.Ф. с одной стороны, и представители Нижнеднепровского трубопрокатного завода «ИНТЕРТАЙП НТЗ» в лице главного инженера Польского Г.Н., начальника мартеновского цеха Марьяна Е.Н., и.о. начальника центральной заводской лаборатории Монченко С.К. Составили настоящий акт о том, что в «ИНТЕРТАЙП НТЗ» апробирован вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ по определению влияния температуры, скорости разлива колесной стали и времени ее охлаждения на образование усадочных дефектов в круглых 8-ми заготовках слитков для изготовления железнодорожных колес.</p> <p>Разработанный пакет прикладных программ адаптирован для персональных IBM-совместимых компьютеров. В качестве исходной информации для расчета затвердевания слитка используется: тоннаж слитка, скорость наполнения изложницы расплавом стали, температура перетвора, температура окружающей среды, а также теплофизические параметры литейной формы, разливаемой стали и углистых материалов.</p> <p>Применение алгоритма и программ освобождает пользователя от проведения трудоемких, дорогостоящих экспериментальных работ по выбору оптимальных параметров выплавки стали, разливки и затвердевания слитков различной конструкции.</p> <p>Моделирование процесса затвердевания слитков в чугунной или стальной изложнице позволило прогнозировать развитие гидродинамических и теплообменных процессов, а также динамику формирования усадочной раковины в слитке колесной стали, исследовать влияние скорости разлива, температуры перетвора и времени до стрипперования слитка, высоты углистых вкладышей на структуру металлопродукции.</p> <p>Результаты математического моделирования показали, что при отливке в стальные изложницы формирование осевой части слитка находится в более благоприятных условиях, чем при отливке в чугунные изложницы.</p> <p>В результате проведенных работ рекомендовано сокращение времени отливки 8-ми заготовочных слитков с 16-18 мин до 10-16 мин, сокращение</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ГОУ ВПО «ДонНУ»)

ул. Университетская, 24, г. Донецк, 283001, тел: приемная (062) 302-07-22, справочная служба (062) 302-06-00, факс: (062) 302-07-49  
e-mail: donnu.ector@mail.ru Идентификационный код 02070803

12.09.18. № 229/01-27/6.д.о

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Г

Г

Диссертационный совет Д 01.016.03  
при ГОУ ВПО «Донецкий  
национальный университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Бондаренко Виталия Ивановича на тему «Энергоресурсосберегающие  
технологии при производстве высоких цилиндрических стальных слитков»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика.

Результаты, полученные при выполнении диссертационного исследования  
Бондаренко В.И., используются при выполнении научно-исследовательской  
работы «Математическое моделирование гидродинамических и  
тепломассообменных процессов в агрегате ковш печь» (г/б тема 17-1вв/26) при  
проведении численного эксперимента.

Первый проректор  
д.э.н., профессор



*[Handwritten signature]*

В.Н. Тимохин

002146