

«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОЕКТНО-
КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО МАШИНО-
СТРОЕНИЯ ИМЕНИ АКАДЕМИКА ЦЕЛИКОВА»



На правах рукописи

Краснянский Михаил Викторович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
РЕЖИМА ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ В КОВШАХ МАЛОЙ
ВМЕСТИМОСТИ**

специальность 05.16.02 — «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

к. т. н. Кац Я. Л.

Москва 2014 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 – СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	9
1.1 Способы подогрева сталеразливочных ковшей	10
1.1.1 Сушка и подогрев футеровки ковшей газовыми горелками	10
1.1.2 Применение топливно-кислородных горелок для подогрева футеровки стальной ковшей	14
1.1.3 Электрический подогрев футеровки стальной ковшей	16
1.2 Применение теплоизоляционных крышек	19
1.3 Другие методы снижения тепловых потерь.....	23
1.4 Математические модели тепловых процессов внепечной обработки металла в стальной ковше	27
1.4.1 Модели распределения температуры в футеровке стальной ковша	27
1.4.2 Комплексные модели прогнозирования температуры металла в ковше.....	28
1.4.3 Модели подогрева футеровки ковшей.....	32
1.5 Промежуточные выводы.....	33
ГЛАВА 2 – РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОГО КОВША ВО ВРЕМЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ.....	36
2.1 Характеристика объекта исследования	37
2.2 Основные уравнения	38
2.3 Основные допущения.....	41
2.4 Определение начальных и граничных условий.....	41
2.4.1 Субмодель охлаждения металла в ковше	42
2.4.2 Субмодель охлаждения пустого стального ковша	42
2.4.3 Субмодель подогрева пустого стального ковша	42
2.5 Методика вычислений.....	51
2.6 Лабораторные и промышленные измерения.....	52
2.6.1 Определение коэффициента черноты периклазоуглеродистой футеровки	52
2.6.2 Промышленные измерения.....	57

2.7	Верификация модели.....	60
2.7.1	Верификация субмодели электрического нагрева ковшей.....	60
2.7.2	Верификация субмодели подогрева ковша газовыми горелками	62
2.7.3	Верификация субмодели охлаждения пустого ковша	64
2.7.4	Верификация субмодели охлаждения металла в ковше	65
ГЛАВА 3 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ МЕТАЛЛА В КОВШЕ		69
3.1	Влияние температуры металла на выпуске.....	69
3.2	Исследование влияния типа и толщины футеровки на тепловые потери металла в ковше	70
3.2.1	Влияние толщины рабочего слоя	70
3.2.2	Влияние типа огнеупора	72
3.2.3	Влияние теплоизоляционного слоя.....	74
3.3	Исследование влияния межплавочного простоя на скорость охлаждения металла в ковше.....	75
3.4	Влияние толщины слоя шлака и крышки на охлаждение металла в ковше	79
3.5	Влияние схемы эксплуатации ковшей.....	81
3.6	Исследование эффективности газового подогрева по сравнению с альтернативными способами подогрева футеровки.....	83
3.6.1	Моделирование подогрева футеровки стальной ковшей	83
3.6.2	Расчет экономической эффективности различных способов подогрева оборотных ковшей.....	85
3.7	Разработка рекомендаций по оптимизации теплового режима внепечной обработки на ГУП «ЛПЗ».....	87
ГЛАВА 4 – РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО СПОСОБА СУШКИ ФУТЕРОВКИ КОВШЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ		91
4.1	Основные концепции процесса сушки новой футеровки стальной ковшей	91
4.2	Энергосберегающий способ сушки футеровки ковшей с помощью электронагревателей	92
4.3	Математическое моделирование процесса сушки и подогрева ковша	94
ГЛАВА 5 – РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ.....		98

5.1	Разработка прогнозной тепловой модели ковша.....	98
5.1.1	Основные уравнения, начальные и граничные условия и допущения модели	98
5.1.2	Реализация модели	104
5.1.3	Верификация модели.....	105
5.2	Разработка статистических моделей усвоения кремния и марганца при ковшовой обработке стали	106
5.2.1	Обработка данных	107
5.2.2	Разработка регрессионных моделей	110
5.2.3	Исследование влияния параметров внепечной обработки на усвоение кремния и марганца.....	115
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	120
	ПРИЛОЖЕНИЕ А – КОНСТРУКЦИЯ ФУТЕРОВКИ 30-Т СТАЛЬКОВША ГУП «ЛПЗ».....	127
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б – КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДОГРЕВА ФУТЕРОВКИ СТАЛЬКОВШЕЙ	128
	ПРИЛОЖЕНИЕ В – СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР	129

ВВЕДЕНИЕ

Еще в 1983 году в своем докладе [1] в президиуме Академии наук СССР директор и основатель ВНИИМЕТМАШ академик А. И. Целиков сформулировал предпосылки создания нового типа металлургического производства – сортового мини-завода малой производительности. Строительство таких заводов должно удовлетворить потребности конкретных регионов, удаленных от крупных производителей, в арматуре, т.к. региональная концентрация производства стали приводит к увеличению ее стоимости пропорционально удаленности от потребителя. Усугубляют ситуацию и высокие транспортные тарифы. Кроме того, удаленность региона от крупных производителей металлопродукции также позволяет использовать на таких заводах накопившийся металлолом. Примером сортового мини-завода малой производительности является запущенный в 2007 г. ГУП «Литейно-прокатный завод» (ГУП «ЛПЗ») в г. Ярцево Смоленской области, главным подрядчиком при строительстве которого выступил ВНИИМЕТМАШ. Первая очередь завода рассчитана на производство 200 тыс. т сортового проката в год. В состав завода, размещенного в цехах бывшего филиала АМО ЗИЛ, входят электросталеплавильный, прокатный и вспомогательные цеха. Электросталеплавильный цех оборудован дуговой сталеплавильной печью вместимостью 30 т по выпуску (ДСП-30) и агрегатом ковш-печь (АКП-30). Разливка стали производится на двухручьева радиальной машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Технология производства стали на «ЛПЗ» предусматривает выплавку жидкого полупродукта в ДСП, получение жидкой стали заданных химического состава и температуры на АКП с последующей разливкой на МНЛЗ.

В период опытно-промышленной эксплуатации ДСП-30 и АКП-30 на ГУП «ЛПЗ» были выявлены проблемы, затрудняющие выход на расчетную производительность:

- повышенный удельный расход электроэнергии в ДСП;
- увеличенная продолжительность цикла плавки в ДСП;
- ускоренное охлаждение металла в стальковше.

Это связано с тем, что на заводе используются сталеразливочные ковши (СК) малой вместимости (30 т). Особенностью таких ковшей в отличие от более крупных агрегатов является их высокая удельная поверхность. Например, удельная поверхность 20-т СК составляет $0,8 \text{ м}^2/\text{т}$, а 250-т – $0,2 \text{ м}^2/\text{т}$ [2]. Именно по этой причине тепловые потери металла в ковшах малой вместимости значительно выше, чем в крупных агрегатах. По данным Кньюппеля [3], скорость охлаждения металла в таких ковшах в 1,5-2 раза превышает этот показатель для крупных ковшей.

По этой причине принятые в современной металлургии энерготехнологические режимы выплавки и внепечной обработки, предназначенные для сортовых заводов, нельзя применять для агрегатов малой вместимости без изменений. Агрегаты малой вместимости до последнего времени использовались на предприятиях, специализирующихся на выплавке специальных, инструментальных и нержавеющей сталей, например, заводы «Ижсталь» (ДСП вместимостью 40 т) и «Электросталь» (ДСП вместимостью 20 т), где технология выплавки и внепечной обработки заметно отличается от комбинатов и заводов, производящих рядовые марки стали. ГУП «ЛПЗ» один из немногих в стране сортовых заводов, где используются агрегаты малой вместимости совместно с МНЛЗ. Однако, так как идеология, по которой построен «ЛПЗ», набирает популярность (яркий пример – запущенный в 2009 г. микрозавод CMC Steel Arizona, США, по выпуску продукции для обслуживания местного рынка и использование местного лома черных металлов [4]), разработка новых, рациональных энерготехнологических режимов выплавки и внепечной обработки, специально для таких заводов является актуальной задачей.

Цель работы: исследование влияния конструктивных и технологических параметров внепечной обработки на тепловые потери металла во время внепечной обработки и разработка энергосберегающего теплового режима обработки металла в сталковшах малой вместимости.

Задачи работы:

1. Разработка энерго- и ресурсосберегающего энергетического режима внепечной обработки в ковшах малой вместимости, включающего в себя рациональный цикл эксплуатации сталковшей.
2. Разработка комплексной тепловой модели сталковша, учитывающей весь цикл его эксплуатации, включая подогрев футеровки ковшей разными способами. Проведение лабораторных и промышленных экспериментов для идентификации и верификации модели.
3. Исследование с помощью разработанной модели влияния различных параметров внепечной обработки, таких как начальная температура металла и футеровки, наличие крышки, толщина слоя шлака и т.д., на тепловые потери металла в ковшах малой вместимости.
4. Определение технологической и экономической эффективности электрического подогрева футеровки и его сравнение с газовым нагревом.

Научная новизна работы:

1. Впервые определена эффективная степень черноты периклазоуглеродистых огнеупоров, применяемых в рабочем слое футеровки сталковша на большинстве металлургических предприятий, составляющая от 0,74 до 0,91 в зависимости от температуры и состояния поверхности.
2. Установлено количественное влияние конструктивных параметров ковшей малой вместимости, таких как толщина и тип футеровки, и технологических параметров внепечной

обработки, например, толщины шлака, длительности межплавочного простоя, температуры предварительного подогрева и количества и типа добавок на тепловые потери металла во время выпуска из ДСП и выдержки в ковше.

3. Впервые теоретически описан и исследован процесс подогрева футеровки стальной электрическими нагревателями и доказана возможность разогрева футеровки ковша до 1400 °С. Показано, что повышение температуры футеровки 30-т стальной перед выпуском на каждые 100 °С позволяет экономить до 4 кВт·ч электроэнергии на т стали.

4. Разработана детерминированная математическая модель охлаждения металла в стальной во время выпуска и выдержки, которая обладает высокой точностью (± 10 °С) и, в отличие от аналогов, учитывает начальное тепловое состояние футеровки ковша, а также потери струей металла при выпуске.

Практическая значимость результатов работы:

1. Применение ряда рекомендаций, разработанных по результатам настоящего исследования в ЭСПЦ ГУП «ЛПЗ» позволило снизить средний удельный расход электроэнергии на агрегате ковш-печь с 66 до 60 кВт·ч/т стали, что эквивалентно 3 млн. руб. в год.

2. Результаты исследования использованы для определения параметров тиристорного источника питания установки электрического нагрева «УЭНК-20» для завода «Электросталь», г. Электросталь.

3. Показано, что регулирование окислительного потенциала атмосферы во время сушки периклазоуглеродистой футеровки электрическими нагревателями позволяет уменьшить выгорание углерода из огнеупоров. Разработан энерго- и ресурсосберегающий режим сушки и подогрева периклазоуглеродистой футеровки стальной электрическими нагревателями, позволяющий повысить ее стойкость на 15-20 % (заявка на патент № 2014116659 от 25.04.2014).

4. Разработанный алгоритм и математическое описание процесса охлаждения металла в ковше могут быть использованы в АСУ ТП плавки для расчета оптимальной температуры металла на выпуске из ДСП.

Апробация результатов работы. Основные положения данного исследования докладывались и обсуждались на XII Международном конгрессе сталеплавателей (г. Выкса, 22–26 октября 2012 г.), XIII Международном конгрессе сталеплавателей (г. Полевской, 12–18 октября 2014 г.), VI Международной конференции «Металлургия-ИНТЕХЭКО-2013» (г. Москва, 26-27 марта 2013 г.), VII Международном форуме «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» (г. Москва, НИТУ «МИСиС», 15-17 октября 2014 г.).

Публикации.

По результатам работы опубликовано 9 печатных работ в научно-технических журналах и сборниках трудов, 3 из которых в журналах, рекомендованных ВАК.

1. Эффективность электронагрева сталеразливочных ковшей / Краснянский М.В., Кац Я.Л., Бершицкий И.М. // *Металлург.* 2012. №5. С. 48-53.

2. Статистические модели усвоения кремния и марганца при ковшовой обработке стали / Краснянский М.В., Кац Я.Л., Мягков К.А. // *Металлург.* 2011. №11. С. 42-48.

3. Краснянский М.В., Кац Я.Л. Разработка энерго- и ресурсосберегающего режима эксплуатации сталеразливочных ковшей методами математического моделирования. Труды VI международной конференции «Металлургия-Интехэко-2013», Москва, 2013. С. 35-38.

4. Краснянский М.В., Кац Я.Л., Бершицкий И.М. Оптимизация температурного режима внепечной обработки стали методами математического моделирования: Труды XII конгресса сталеплавателей. М.: *Металлургиздат*, 2013. С. 161-164

5. Statistical models of the assimilation of silicon and manganese in the ladle treatment of steel / M. V. Krasnyanskii, Ya. L. Kats, K. A. Myagkov // *Metallurgist.* 2012. Vol. 55. № 11-12. P. 790-798.

6. Efficiency of electrically heating the lining of steel-pouring ladles / M. V. Krasnyansky, Ya. L. Katz, I. M. Bershitsky // *Metallurgist.* 2012. Vol. 56. № 5-6. P. 357-365.

7. Определение интегрального коэффициента теплового излучения периклазоуглеродистой футеровки / Краснянский М. В., Кац Я. Л. // *Металлург.* 2014. №5. С. 57-59.

8. Determination of the Integral Emissivity of a Periclase-Carbon Lining / M. V. Krasnyanskii, Ya. L. Kats // *Metallurgist.* 2014. Vol. 58. № 5-6. P. 388-391.

9. Повышение эффективности производства стали на электрометаллургических заводах малой производительности / Белковский А. Г., Краснянский М. В., Кац Я. Л. // Сборник трудов XIII международного конгресса сталеплавателей. Москва-Полевской, 2014. С. 457-467.

Достоверность результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов и методик исследования, достаточной сходимостью лабораторных и промышленных экспериментов (расхождение менее 10 %) с расчетными данными; адекватностью математических моделей.

Структура диссертационной работы: работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 93 наименований. Диссертация изложена на 130 стр. машинописного текста, содержит 28 табл., 65 рис. и 3 приложения.

ГЛАВА 1 – СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Для разработки методов снижения тепловых потерь металла, необходимо выяснить, какие факторы влияют на тепловые потери полупродукта в стальковше. Жидкая сталь остывает в ковше в основном из-за нестационарной теплопроводности через футеровку ковша, конвекции и излучения через верх ковша и плавления ферросплавов, добавляемых туда. Потери тепла через верх ковша зависят от толщины шлака, типа покровной засыпки и её распределения, а также использования теплоизоляционной крышки. Падение температуры за счет плавления ферросплавов зависят от их количества, теплоемкости и теплоты плавления. Потери тепла за счет теплопроводности футеровки ковша сильно зависят от начального распределения температуры в футеровке. Этот процесс зависит от теплового состояния ковша, который в свою очередь зависит от условий и времени доставки пустого ковша с МНЛЗ и наличия подогрева.

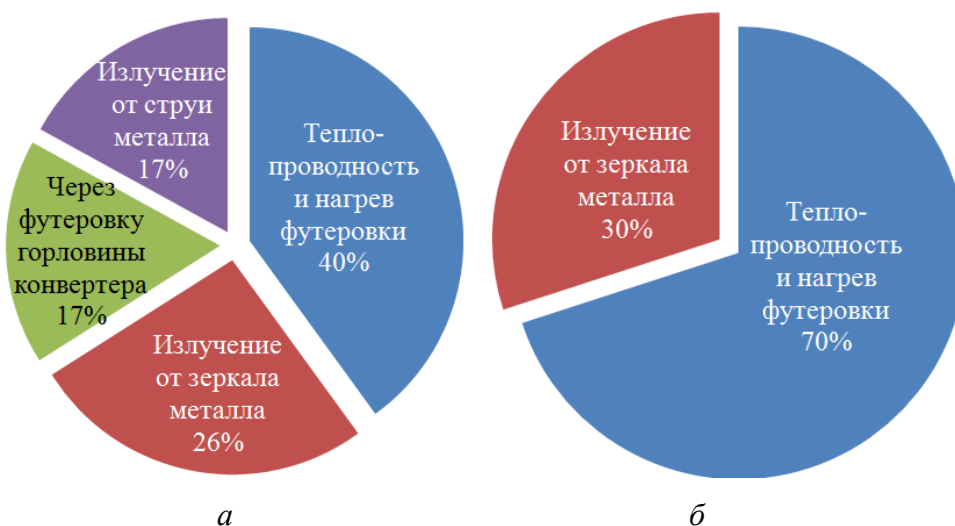


Рисунок 1.1 – Соотношение различных видов тепловых потерь металла в ковше во время выпуска (а) из конвертера и последующей выдержки (б)

Авторы [5] определили соотношение различных видов тепловых потерь металла в ковше во время выпуска из конвертера и последующей выдержки (рис. 1.1). Видно, что доля тепловых потерь из-за аккумуляции тепла футеровкой при выпуске составляет ~40 %, а в дальнейшем возрастает до ~70 %. Потери излучением составляют от ~25 до ~30 %. Таким образом, исходя из диаграмм на рис.1.1, самыми эффективными методами снижения тепловых потерь металла в ковше являются повышение теплосодержания футеровки ковша перед выпуском, т.е. его предварительный подогрев, снижение теплоемкости футеровки и утепление открытой поверхности металла теплоизолирующими материалами или крышками. Ниже приведено исследование состояния вопроса по снижению тепловых потерь металла в стальковшах,

включающее обзор литературных данных по новейшим способам подогрева футеровки и утепления ковшей.

1.1 Способы подогрева сталеразливочных ковшей

1.1.1 Сушка и подогрев футеровки ковшей газовыми горелками

В настоящее время подогрев футеровки ковшей на большинстве металлургических предприятий производится на стендах сушки и подогрева при помощи газовых горелок. Главной задачей стенда сушки и нагрева футеровки СК является высокотемпературный подогрев ковша перед первым циклом работы или если ковш долго не использовался. После разливки с ковша снимается крышка, сливается шлак, и он проходит текущий ремонт. Если ковш не используется в течении определенного времени, его необходимо подогреть во избежание слишком низкой температуры футеровки во время следующей плавки. Слишком низкая температура футеровки может привести к термическому удару, когда ковш наполнится жидкой сталью, и разрушению футеровки. Температура нагрева футеровки ковшей колеблется от 800 до 1100 °С.

Другой важной функцией стенда подогрева является сушка новой футеровки ковша. После некоторого количества плавов рабочий слой футеровки ковша разрушается. Для дальнейшего его использования, старая футеровка снимается и выкладывается новая. Основными огнеупорами, используемыми в футеровке рабочего слоя ковшей является периклазоуглеродистые кирпичи на органической связке. В качестве связующих композиций используется различные фенолформальдегидные смолы, каменноугольные пеки и ряд других добавок, повышающих эксплуатационные характеристики периклазоуглеродистых огнеупоров. В процессе сушки и обжига происходит полимеризация фенолформальдегидной связки, а каменноугольный пек трансформируется в пековый кокс в виде зерен углерода, что повышает износостойкость и пластичность огнеупора [6]. Этот процесс проходит очень медленно, и сушка может длиться несколько суток. По этой причине на многих заводах установлены отдельные стенды сушки ковшей. Обычно они отличаются пониженной мощностью горелки и вертикальным положением ковша при сушке (рис. 1.2). На таком стенде футеровка ковша нагревается до 600-800 °С, после чего ковш передают на стенд высокотемпературного подогрева.

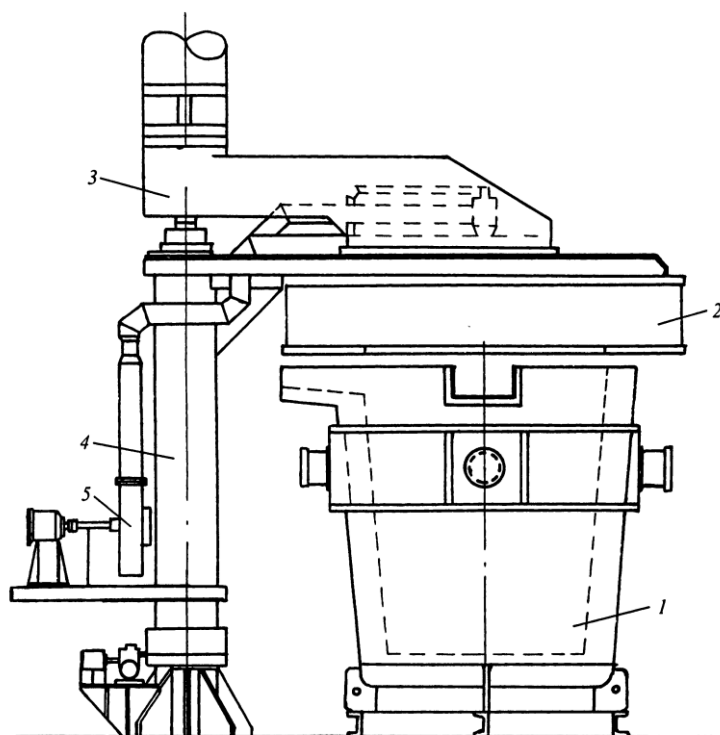


Рисунок 1.2 – Стенд сушки футеровки с поворотной крышкой: 1 – ковш; 2 – крышка с горелкой; 3 – дымоотводящий тракт; 4 – поворотная стойка; 5 – вентилятор

В процессе нагрева пустой ковш сначала опускают на тележку, после чего устанавливается под крышкой с горелкой. Крышка опускается, оставляя зазор с краем ковша примерно равный 10-15 см. Система отопления на стендах строится с использованием одной высокоскоростной горелки с широкими пределами регулирования. Горелка может быть установлена на неподвижной крышке, под которую заезжает ковш либо на поворотной крышке. Система отопления обычно имеет программное устройство, обеспечивающее автоматическое регулирование расхода топлива и соотношения "топливо-воздух" в соответствии с графиком сушки и разогрева. Эвакуация продуктов сгорания осуществляется в зазор между крышкой-сводом и ковшом [7].

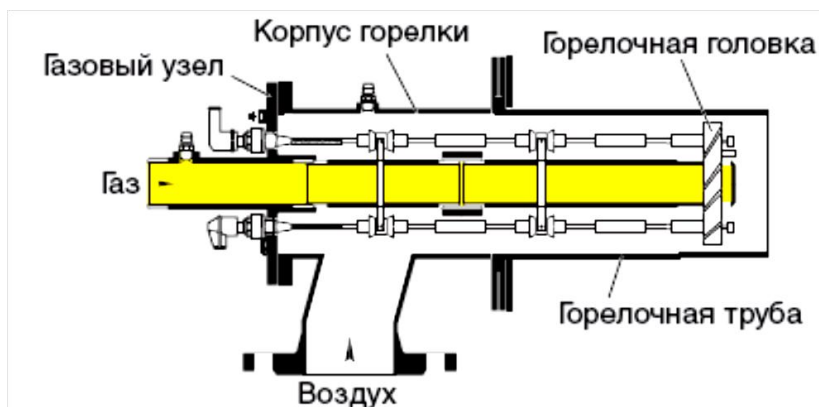


Рисунок 1.3 – Схема газозвушной горелки

Обычно на стендах сушки и подогрева используются газовоздушные горелки без предварительного смешения, так называемые пламенные горелки. Они состоят из 3-х модулей: корпуса горелки, газового узла и комплекта горелочной трубы. Схема горелки приведена на рис. 1.3. Автомат управления горелкой открывает газовые и воздушные клапаны, и газ подается в газовый узел, а воздух проходит через корпус горелки. Горючая газовоздушная смесь образуется за горелочной головкой. В конструкции горелочной головки предусмотрены щели и отверстия, которые влияют на степень и характер закручивания воздушного потока и определяют форму пламени. Газовоздушная смесь воспламеняется с помощью прямого электророзжига от электрода или пилотной горелки. В качестве топлива для горелок обычно используется природный газ, на комбинатах полного цикла есть возможность использовать доменный или коксовый газы.

Преимуществом такого способа нагрева являются низкая удельная стоимость топлива ($\sim 0,35$ руб/кВт·ч) и относительная простота исполнения. Однако при газовом подогреве средняя температура внутренней поверхности футеровки ковша не превышает 1100°C . Авторы [8] измеряли температуру горячей поверхности футеровки ковша двумя инфракрасными камерами. В результате 65-минутного разогрева футеровки с начальной температуры 863°C газовыми горелками, использующими в качестве топлива коксовый газ максимальная температура футеровки составила 1157°C . Причиной этого является КПД нагрева, составляющий по разным данным от 10 до 30 % [5]. Такой низкий КПД объясняется главным образом тем, что топливо сгорает в воздухе, а значит большая часть энергии от его сжигания уносится с отходящими газами, главным образом, с азотом воздуха (рис. 1.4). Кроме того, эффективность газовоздушного нагрева уменьшает низкая светимость факела (его степень черноты колеблется от 0,15 до 0,3 в зависимости от используемого газа [8, 9]). Также газовый подогрев приводит к неравномерному распределению температуры футеровки. Так как горелка расположена сверху, то прилегающие к ней области футеровки в верхней части ковша нагреваются до высоких температур, в то время как нижние области футеровки стенки ковша и днище прогреваются недостаточно.

По приведенным выше причинам газовоздушный подогрев ковшей не позволяет быстро (за 30-60 мин) нагревать футеровку ковшей до необходимой температуры $1100-1200^\circ\text{C}$, и на многих предприятиях (в том числе и ГУП «ЛПЗ») оборотные ковши перед плавкой вообще не подогреваются в связи с тем, что ковши, после подогрева бывают более холодными, чем те, что ставились под крышку.

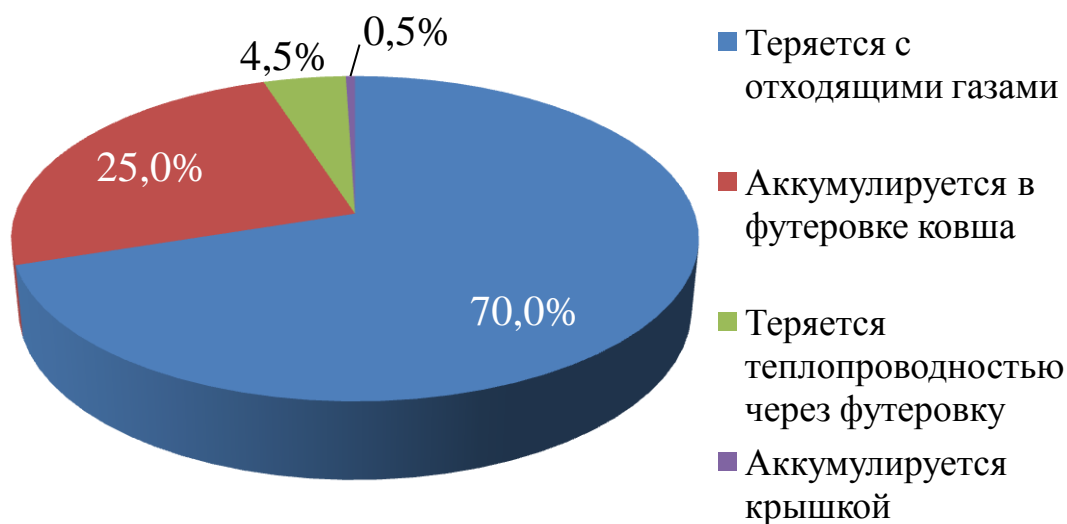


Рисунок 1.4 – Соотношение расходных частей теплового баланса газового подогрева футеровки сталковша [5]

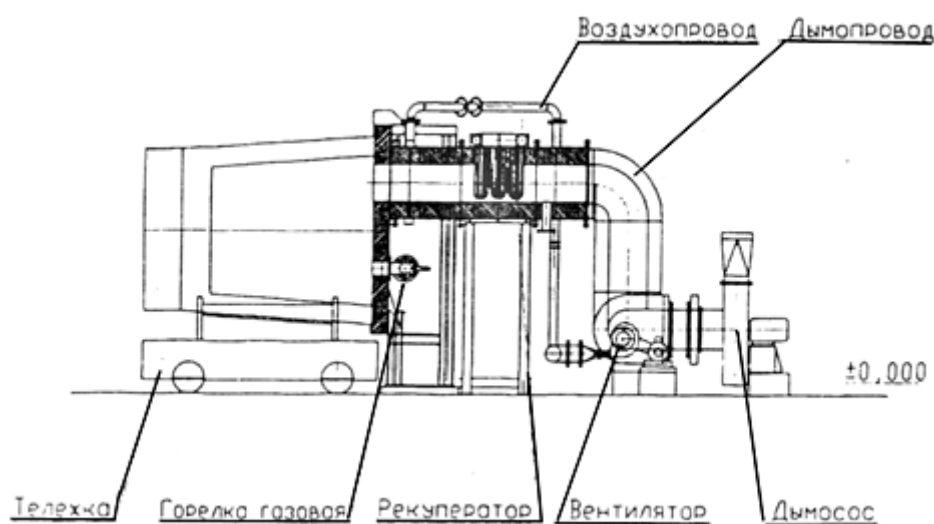


Рисунок 1.5 – Горизонтальная установка высокотемпературного нагрева футеровки 30-т сталеразливочных ковшей [10]

За последнее время было разработано множество способов повышения эффективности газового подогрева ковшей, например, использование тепла отходящих газов. «Стальпроект» предложил новую конструкцию горизонтальных стенов высокотемпературного подогрева футеровки сталковшей (рис. 1.5) [10]. Крышка с горелкой в таких стенов вплотную прилегает к горловине ковша, а дымовые газы удаляются с помощью дымососа. При этом на дымопроводе установлен рекуператор, в котором подаваемый воздух предварительно нагревается до 100-400 °С теплом отходящих газов, что позволяет повысить температуру горения топлива на 100-200 °С. ЗАО «Концерн «Струйные технологии» [11] предложило для стенов сушки и подогрева

ковшей горелку со схемой двойной закрутки потоков энергоносителей, обеспечивающая улучшенное смешение топлива и окислителя, благодаря чему при любой мощности горелки достигается режим наиболее экономичного использования газа. Авторы [12] использовали на стенде сушки и подогрева футерованную крышку вместо металлической для уменьшения потерь теплопроводностью через крышку и через зазор между ней и горловиной 480-т ковша. В результате средняя температура внешнего слоя футеровки увеличилась на 185 °С по сравнению с использованием нефутерованной крышки и достигла 900 °С. Кроме того, уменьшился градиент температур футеровки по высоте ковша и снизился расход природного газа на сушку и нагрев.

Авторы [13] разработали новый способ отопления стендов для сушки и разогрева футеровки металлургических ковшей, основанный на использовании периодической (импульсной) подачи энергоносителей в рабочее пространство ковша. При использовании импульсного отопления в результате целенаправленного управления тепловым потоком, передаваемым от факела и продуктов сгорания топлива к поверхности футеровки ковша имеет место увеличение температурного напора и поверхности теплообмена, а также коэффициента конвективной теплоотдачи. В результате этого повышаются эффективность использования топлива и КПД процесса. Кроме того, зона максимальных температур факела непрерывно перемещается относительно футеровки, что повышает равномерность прогрева последней и снижает вероятность возникновения локальных перегревов, приводящих к ухудшению качества сушки и нагрева футеровки. Разработка внедрена на стендах для сушки и разогрева 220-т сталеразливочных ковшей мартеновского цеха ОАО «ММК «Азовсталь». После внедрения наблюдалось снижение суммарного расхода природного газа на 5-12 %, увеличение средней температуры нагрева на ~50 °С и повышение стойкости футеровки на ~5 %.

Другим способом повышения эффективности нагрева ковшей пламенными горелками является использование керамических излучателей, установленных поверх сопла горелки. Такие излучатели используются на многих современных горелках [14, 15]. Пламя горелки подогревает керамическую трубу, и она начинает излучать тепловую энергию, что повышает эффективность теплопередачи от дымовых газов к футеровке ковша.

1.1.2 Применение топливно-кислородных горелок для подогрева футеровки стальковшей

Новшеством в технологии сушки и подогрева футеровки ковшей является использование топливно-кислородных горелок (ТКГ). Такую технологию предлагает, например, фирма Praxair [16, 17]. При использовании горелок системы «DOC» («сжигание в разбавленном кислороде»)

горючий газ и кислород вводятся раздельно с помощью высокоскоростных горелок, осуществляющих быстрое перемешивание топлива и окислителя с отходящими газами (рис. 1.6). Это перемешивание и разбавление приводит к равномерному выделению тепла и снижению максимальной температуры факела. Кроме того, благодаря уменьшению количества отходящих газов повышается КПД нагрева, а значит, появляется возможность повысить среднюю температуру футеровки и снизить длительность подогрева по сравнению с использованием топливно-воздушных горелок.



Рисунок 1.6 – Схема работы газокислородной горелки по технологии «DOC»

Авторы [17] проводили сравнение горелок, работающих по технологии «DOC» с обычными топливно-воздушными горелками на одном из заводов Японии. В первом эксперименте холодные ковши в течение 4 часов подогревались соответственно топливно-воздушной горелкой и ТКГ. Каждые 20 мин замерялись составы топлива и температура горячей стенки, причем последняя замерялась с помощью термопары, выступающей от поверхности футеровки на 100 мм. Результаты измерений приведены на рис. 1.7.

Видно, что с помощью ТКГ с технологией «DOC» горячая стенка ковша уже через час достигает заданной температуры, после чего расход топлива постепенно уменьшают. Ковш, нагреваемый традиционной горелкой не достигает заданной температуры и за 4 часа, а расход топлива остается постоянно высоким. В результате другого эксперимента газокислородная горелка нагрела поверхность футеровки ковша с 228 °С до 986 °С за 3 ч, в то время как при использовании газовой горелки в течении 5 ч 40 мин футеровка нагрелась с 300 °С до 900 °С. При этом затраты горючего газа составили 184 нм³ против 440 нм³ для газокислородной и газовой горелки соответственно. Различия в результатах этих экспериментов возможно объясняются методом измерения температуры горячей стенки футеровки. В первом случае показания термопары скорее относятся к дымовым газам горелки, чем к футеровке,

тогда как во втором эксперименте приводится действительная температура горячей стенки, измеренная с помощью пирометра.

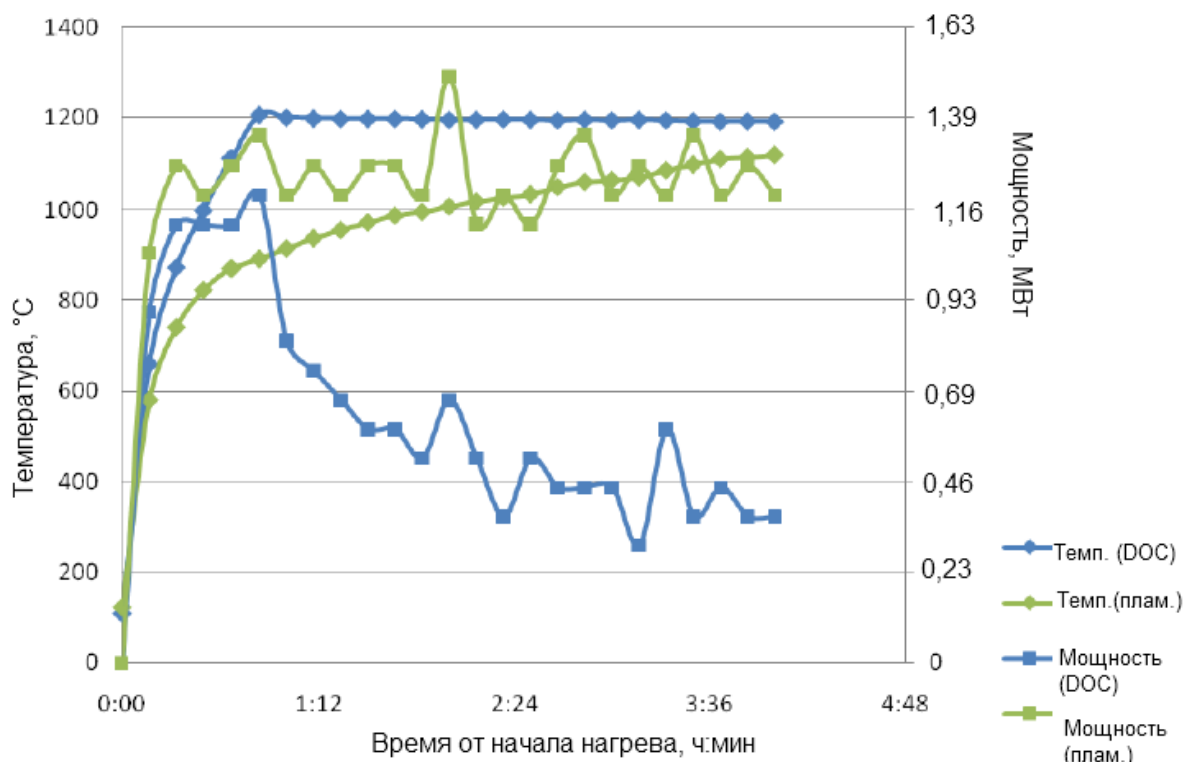


Рисунок 1.7 – Результаты эксперимента по сравнению эффективности работы газокислородной и газовоздушной горелок

Из этих экспериментов можно сделать вывод, что газокислородные горелки действительно позволяют повышать температуру футеровки быстрее и эффективнее, чем газовоздушные, при этом экономя топливо и выбрасывая в атмосферу меньше вредных газов. Однако использование в них кислорода, кроме дополнительных затрат на него, усложняет как конструкцию стенда нагрева, так и его эксплуатацию, что также влечет за собой дополнительные затраты. Кроме того, достигнутая температура нагрева (986 °C) гораздо ниже заявленной авторами [16] 1200 °C.

1.1.3 Электрический подогрев футеровки стальковшей

Альтернативой подогрева футеровки ковшей газовыми горелками является электрический нагрев. В работах [18, 19] описываются установки электроподогрева ковшей с карбидокремниевыми нагревателями, которые отличаются высоким тепловым КПД $\approx 90\%$, а температура футеровки достигает 1200-1400 °C и равномерно распределяется по всей рабочей поверхности. При этом исключаются динамическое воздействие факела на футеровку,

конденсация водяных паров, образующихся при сгорании газа, и химическое загрязнение футеровки серными, сажистыми и другими вредными соединениями; отсутствуют газодыбросы в атмосферу цеха и обеспечивается взрывобезопасность. Авторы приводят следующие показатели электронагревателей:

- скорость нагрева футеровки изменяется от 250 до 650 °C/ч в зависимости от геометрии ковша и величины вводимой мощности;
- расход электроэнергии на нагрев до 1200 °C составляет 25-45 кВт·ч/т стали и уменьшается по мере увеличения вместимости ковша (рис.1.8), при этом с увеличением мощности установки расход электроэнергии на нагрев футеровки уменьшается (рис. 1.9).

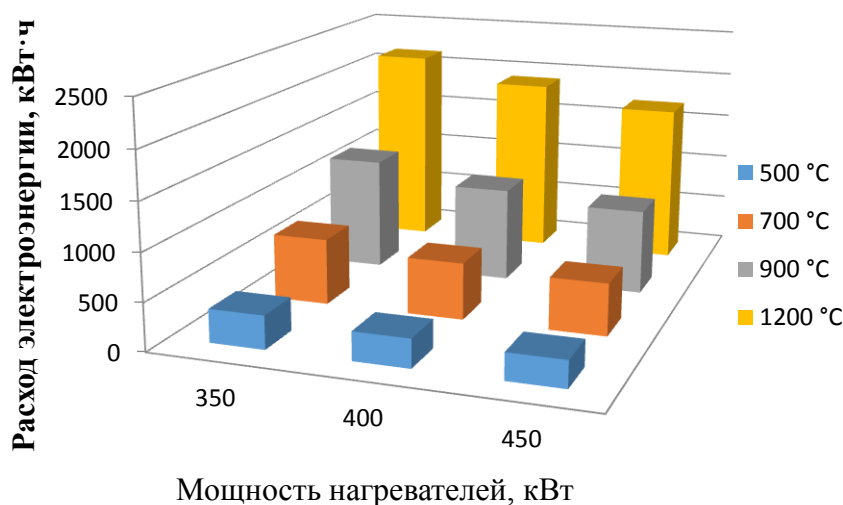


Рисунок 1.8 – Расход электроэнергии на нагрев футеровки 40-т ковша при различной мощности нагревателей

В установке используются U-образные карбидокремниевые нагревательные элементы Global производства фирмы "Kanthal" (рис. 1.10). Поскольку водяные пары необратимо разрушают карбид кремния, на нагреватели наносится защитная глазурь, которая проникает в пористую структуру элемента и предотвращает реакцию карбида кремния с водой во всем объеме горячей зоны нагревателя, позволяя значительно увеличить его ресурс.

Для осуществления процесса нагрева сталеразливочный ковш краном устанавливается на тележку, после чего оператор нажимает кнопку пуска, и далее все операции выполняются в автоматическом режиме. Механизм горизонтального перемещения подает ковш под центр крышки и фиксирует его в этом положении. Крышка с нагревателями опускается до стыковки с ковшом, и они оказываются внутри него. Включается тиристорный источник питания и выполняется сушка или разогрев футеровки ковша в автоматическом режиме по любому графику, заложенному в систему управления.

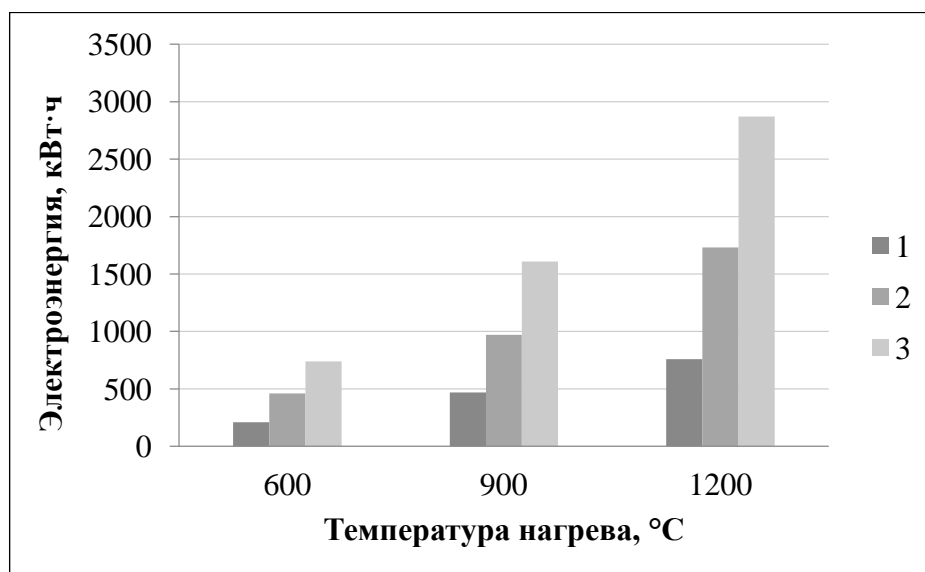


Рисунок 1.9 – Зависимость расхода электроэнергии на нагрев футеровки (без учета ее влажности) ковшей: 1 — 15 т; 2 — 40-т; 2 — 110-т при мощности нагревателей установки соответственно 250; 450 и 800 кВт

По окончании нагрева футеровки выполняется обратный порядок действий: отключение нагревателей; перемещение их вместе с крышкой в верхнее положение, где они помещаются в специальный теплозащитный экран для уменьшения градиента температур при остывании (рис. 1.11). Это благоприятно влияет на ресурс нагревателей, а также защищает обслуживающий персонал от теплового излучения; последующее выкатывание ковша из-под установки на позицию разгрузки.



Рисунок 1.10 – Общий вид крышки с нагревателями



Рисунок 1.11 – Установка электрического подогрева с защитным экраном

Электрический подогрев футеровки сталковшей является перспективной технологией благодаря высокому КПД и доступности электрической энергии. Однако до сих пор этот способ нагрева не был достаточно исследован. В литературе не было найдено информации об его технологической и экономической эффективности. Результаты работы установок электрического подогрева также не представлены ни в отечественных, ни зарубежных источниках.

1.2 Применение теплоизоляционных крышек

Для снижения тепловых потерь металла в ковше через открытую поверхность на металлургических предприятиях используются покровные смеси и теплоизолирующие крышки. Покровные смеси, например, распространенная зола рисовой шелухи (лузги) позволяет уменьшить температуру теплоотдающей поверхности, а значит снизить и тепловые потери металла. Однако по данным авторов [20] теплоизоляционные крышки гораздо эффективнее снижают тепловые потери металла. На рис. 1.12 приведены тепловые потоки через верх ковша с защитным слоем только из рисовой шелухи по сравнению с использованием теплоизолирующих крышек с различной футеровкой. Видно, что крышки минимум в 2 раза позволяют снизить тепловой поток по сравнению со смесями. Кроме того, смеси можно добавлять только перед разливкой, в то время как при выдержке стали в ковше перед обработкой на АКП или вакууматоре используются в основном только крышки. По этим

причинам в настоящем работе покровные смеси подробно не рассматриваются, а больший упор делается на использовании крышек.

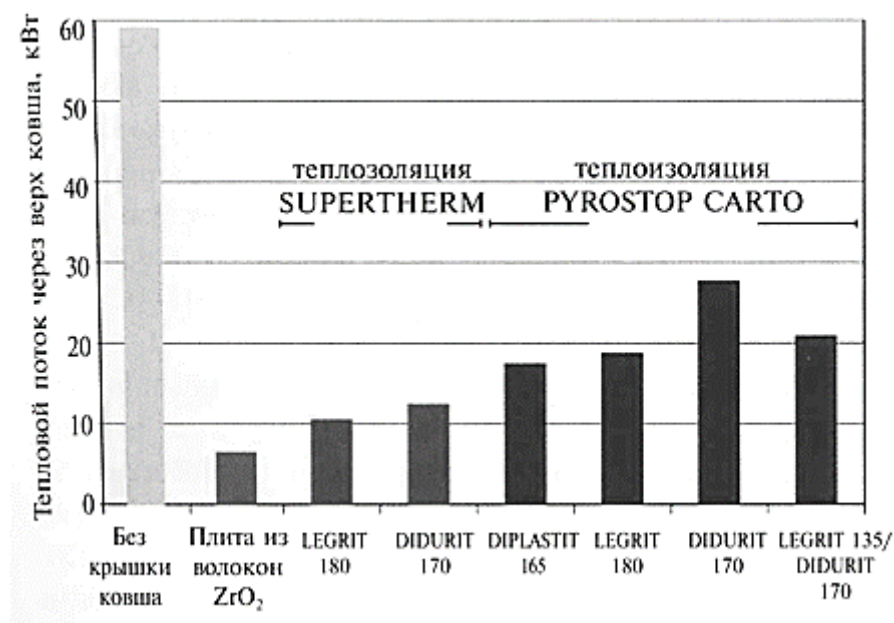


Рисунок 1.12 – Тепловые потери через верх ковша при использовании различных утеплительных материалов

Конструкции теплоизоляционных крышек можно разделить на два вида: крышки, футерованные формованными и неформованными огнеупорами и футерованные плитами из керамического волокна. Первый тип крышек – самый распространенный. Такие крышки предлагает, например, компания «RHI». На рис. 1.13 представлена крышка конструкции «RHI» с двумя вариантами футеровки: вариант 1 – с применением теплоизоляционных материалов PYROSTOP CARTO и LEGRIT, а также слой коррозионностойкой массы DIDURIT; вариант 2 – без слоя LEGRIT. Теплопроводность этих материалов представлена в табл. 1.1. По информации компании эти крышки имеют высокую стойкость к агрессивным ковшовым шлакам и механическим ударным нагрузкам. Однако у огнеупорных крышек имеются серьезные недостатки. Основным недостатком является их достаточно высокая теплопроводность и теплоемкость. На рис. 1.14 приведены распределения температур в крышке для обоих вариантов рис.1.13. Видно, что внешняя сторона крышки нагревается до относительно высоких температур 300-350 °С, что увеличивает тепловые потери. Кроме этого, огнеупорные материалы, представленные выше имеют достаточно высокую плотность, что увеличивает вес конструкции крышки, а значит усложняется крепеж материалов на крышке и увеличивается мощность механизмов для перемещения крышек. Тем не менее, по данным авторов [20] при использовании футерованных крышек во время транспортировки ковша до и после внепечной обработки конечная расчетная температура разливки равнялась 1558 °С при температуре

выпуска из конвертера 1625 °С и без подогрева на АКП, в то время как для ковшей, не накрытых крышкой, конечная температура разливки была равна 1550 °С при температуре выпуска 1660 °С и с дополнительным вводом 6 кВт·ч/т электроэнергии на АКП. Таким образом, применение теплоизоляционных крышек позволило сэкономить 35 °С на выпуске, что эквивалентно 7 кВт·ч/т, и 6 кВт·ч/т на АКП.

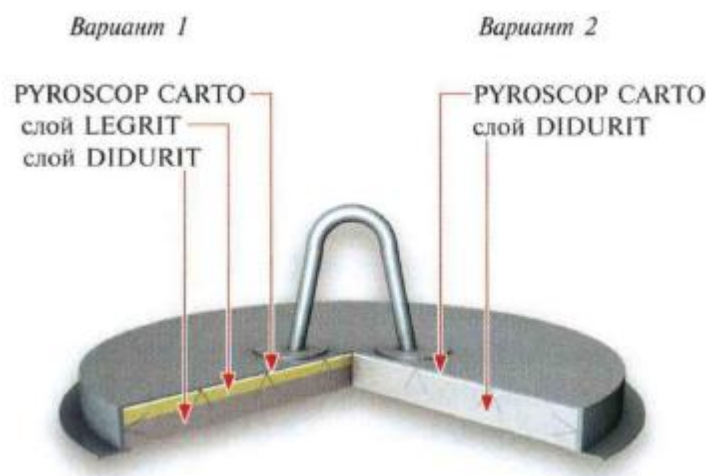


Рисунок 1.13 – Схема теплоизолирующей крышки конструкции фирмы RHI

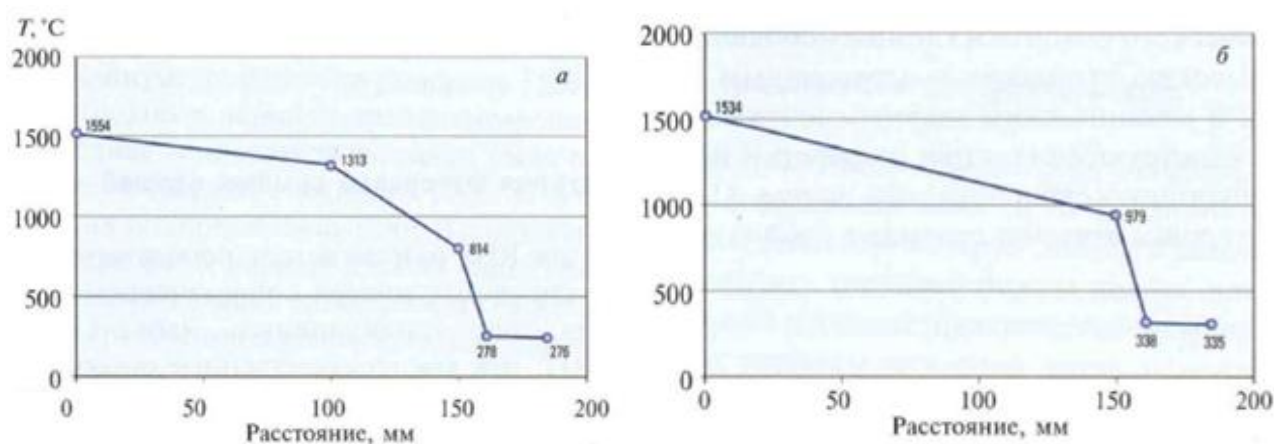


Рисунок 1.14 – Распределение температуры по футеровке крышек, футерованных по варианту 1 (а) и варианту 2 (б)

Таблица 1.1 – Теплофизические свойства огнеупорных материалов фирмы RHI

	Теплопроводность (при 1000 °С), Вт/(м·К)	Основное сырье
PYROSTOP CARTO 125	0,21	Керамическое волокно
LEGRIT 135-1,3 0-4	0,54	Легковесная огнеупорная глина
DIDURIT 170 0-6	2,00	Боксит

Однако, в последнее время все большее распространение получают крышки с футеровкой из керамо-волоконистых материалов [21, 22]. Крышки, футерованные муллитокремнеземистым войлоком или другими керамо-волоконистыми материалами, имеют низкие показатели теплопроводности ($0,1 - 0,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), а кроме того обладают достаточными огнеупорными свойствами (до 1300°C). Благодаря низкой теплопроводности и теплоемкости такая футеровка практически не аккумулирует тепло, а температура внешней стороны крышки незначительно превышает температуру окружающей среды. Также положительной особенностью волоконистых огнеупорных материалов является их пластичность и гибкость, что позволяет сократить потери тепла излучением даже при наличии настелей шлака и металла на торцевой части стенки ковша.

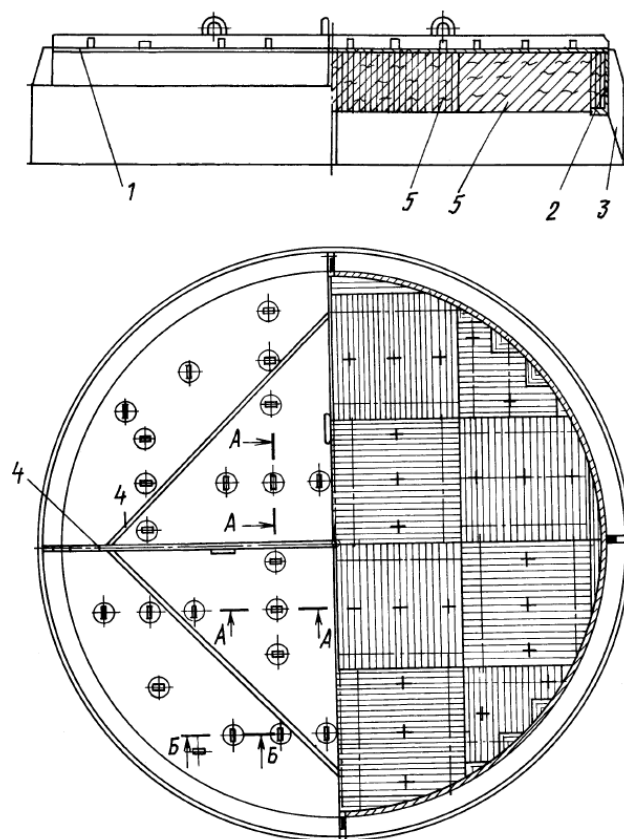


Рисунок 1.15 – Конструкция теплоизоляционной крышки фирмы «ТЭК-98»

Конструкции таких крышек также отличается от классических. На рис. 1.15 представлен чертеж крышки, предлагаемой компанией «ТЭК-98». Футеровка в виде блоков волоконистых огнеупоров крепится на каркасе из оребренного стального листа, снабженного кольцевым бортом с направляющими косынками. Для снижения тепловых потерь излучением через щели между крышкой и ковшом в случае наличия значительных настелей применяется кольцевой металлический экран, установленный на направляющих косынках [23]. Малый вес конструкции облегчает эксплуатацию крышек, а высокая теплостойкость войлока повышает срок службы. К

недостаткам модульных блоков, выполненных из муллитокремнеземистых рулонных материалов (вата, войлок, фетр), является их «осыпание» в металл при длительной эксплуатации. Это связано в основном с образованием стекловидной фазы (охрупчивание) коротких волокон в процессе эксплуатации. Тем не менее крышки конструкции «ТЭК-98» используются на ГУП «ЛПЗ» уже в течение 5 лет без замены волокнистых огнеупорных блоков, что подтверждает их надежность и эффективность.

Новшеством в теплоизоляции крышек ковшей является применение комбинированной футеровки из теплоизоляционных керамоволокнистых плит (рис. 1.16) [21]. Такие плиты имеют такие же показатели теплопроводности и теплоемкости, что и муллито-кремнеземистый войлок, а благодаря уплотнению волокон у них повышается огнеупорность и термостойкость. Футеровка монтируется съемными сегментами, выполненными из керамоволокнистой плиты. Горизонтальные слои плит проклеиваются специальным клеем. Плиты монтируются на подслое одеяла из керамического волокна на шпильки и фиксируются углубленными шайбами и гайками. Углубления заполняются огнеупорной массой на основе распушенной ваты из керамического волокна, глиняного шликера и жидкого стекла. Слои боковых блоков дополнительно анкеруются стержнями. Наружная поверхность футеровки покрывается защитной жаростойкой обмазкой. Многослойная футеровка плитами позволяет хорошо противостоять действию частых теплосмен, предотвращая осыпания в металл стекловидной фазы.



Рисунок 1.16 – Теплоизоляционные керамоволокнистые плиты.

1.3 Другие методы снижения тепловых потерь

Как уже было отмечено во введении, на тепловое состояние футеровки ковша, кроме наличия подогрева, должны оказывать влияние также длительность и характер её охлаждения в период ожидания следующей плавки. После разливки из ковша сливается шлак, и он поступает на стенд подготовки, где происходит его очистка от «закозлившегося» металла и шлака на

днище, а также промывка канала шиберного затвора кислородом. После этого ковш может еще длительное время ожидать готовности сталеплавильного агрегата. Этот период времени, между окончанием разливки и началом выпуска следующей плавки, в иностранной литературе принято называть «turn-around time». Подходящими терминами в русском языке являются обратное время или межплавочный простой. Снижение тепловых потерь футеровки пустого ковша в течение простоя позволит сократить последующие тепловые потери металла в этом ковше.

Одним из предложенных способов снижения тепловых потерь футеровки пустого ковша является применение описанных выше теплоизоляционных крышек в течение ожидания готовности плавильного агрегата. Как показало исследование [20], крышки способствуют снижению тепловых потерь порожнего ковша и равномерному распределению температуры его футеровки (рис. 1.17). При использовании крышек тепловые потери футеровки ковша в течении обратного времени снизились в два раза за первые 30 мин (с 8 до 4 %), а при часовом ожидании – уже с 13,2 до 6 %.

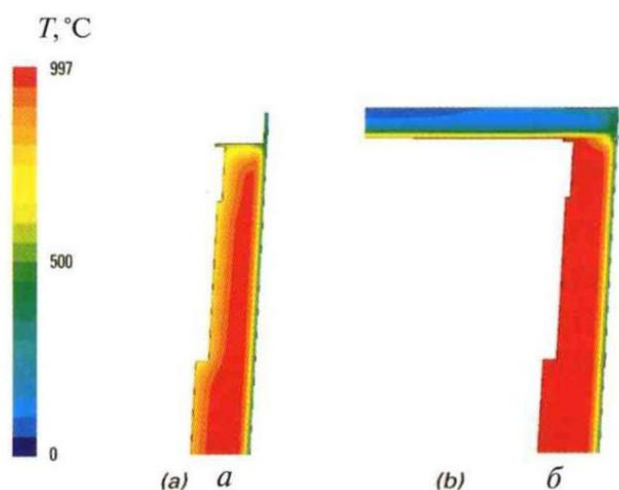


Рисунок 1.17 – Термограммы футеровки ковша после охлаждения при отсутствии (а) и наличии (б) теплоизоляционной крышки

На рис. 1.18 показано влияние длительности обратного времени на последующую скорость падения температуры в период ожидания разливки на одном из металлургических заводов [16]. Видно, что с увеличением времени от конца разливки до выпуска повышается и скорость падения температуры, а также расширяется интервал этих скоростей. По данным авторов [16] это связано с непостоянным использованием крышек и предварительного подогрева. Ковши с обратным временем более 120 мин постоянно подогревались и поэтому показывали лучший температурный контроль, чем ковши с обратным временем в интервале от 90 до 120 мин. Когда ожидаемое обратное время составляет от 60 до 90 мин, операторы отмечают, что ковши, которые ставились на подогрев, были более холодными, чем те, что

ставились под крышку. Изменение практики с тем чтобы все ковши с оборотным временем больше 90 мин ставились на подогрев повышало единообразие температуры.

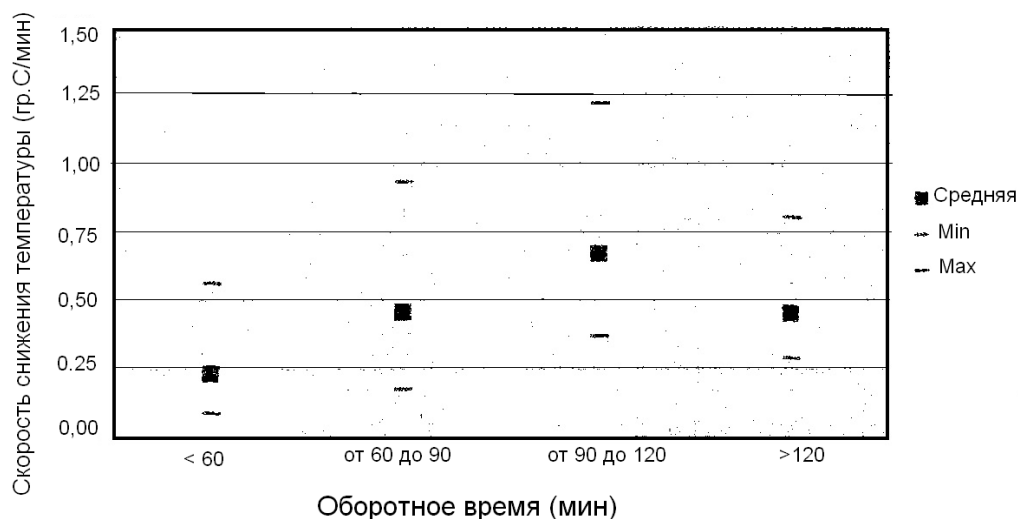


Рисунок 1.18 – Зависимость скорости охлаждения металла в ковше от длительности оборотного времени [16]

Таким образом, контроль теплового состояния футеровки сталковша перед выпуском также является действенным способом снижения тепловых потерь жидкой стали. Однако в литературе не было найдено достаточного количества исследований влияния начального теплового состояния ковша на скорость охлаждения металла в нем. В работе [5] получена зависимость между длительностью оборотного времени и снижением температуры в ковше после выпуска и после обработки металла на установке продувки аргоном (УПА) (рис. 1.19). Видно, что влияние на падение температуры после выпуска гораздо ниже, что скорее всего связано с малой длительностью ожидания ковша перед обработкой на УПА по сравнению с ожиданием разливки. Данная зависимость получена из модельных расчетов и не проверена промышленными или опытными плавками, однако подтверждает данные о заметном влиянии низкого начального теплосодержания футеровки ковша на охлаждение металла. Представленные данные получены для ковшей большой вместимости (130 т). Ковши малой вместимости из-за высокой удельной поверхности должны охлаждаться быстрее, а значит влияние оборотного времени на охлаждение стали в таких ковшах будет еще значительнее. Однако данных по исследованию ковшей малой вместимости найдено не было.

Еще меньше сведений было найдено о связи температуры подогрева ковша и скорости охлаждения стали в нем. Кньюппель в своей монографии [3] приводит зависимости температуры нагрева футеровки и падения температуры стали в ковше для ковшей различной вместимости (рис. 1.20). Видно, что для 10-тонного ковша подогрев футеровки до 1200 °С значительно снижает скорость охлаждения стали, а с повышением вместимости ковша влияние подогрева

снижается. Однако данные зависимости были получены еще в 70-е годы прошлого века, когда для сталеразливочных ковшей использовалась в основном глиноземная и шамотная кирпичная футеровка с достаточно низкими показателями теплопроводности (1-2 Вт/(м·К)).

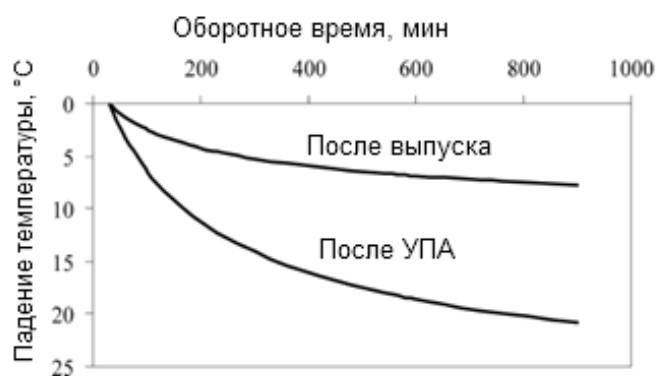


Рисунок 1.19 – Зависимость падения температуры металла в ковше после выпуска и после обработки на УПА от длительности оборотного времени

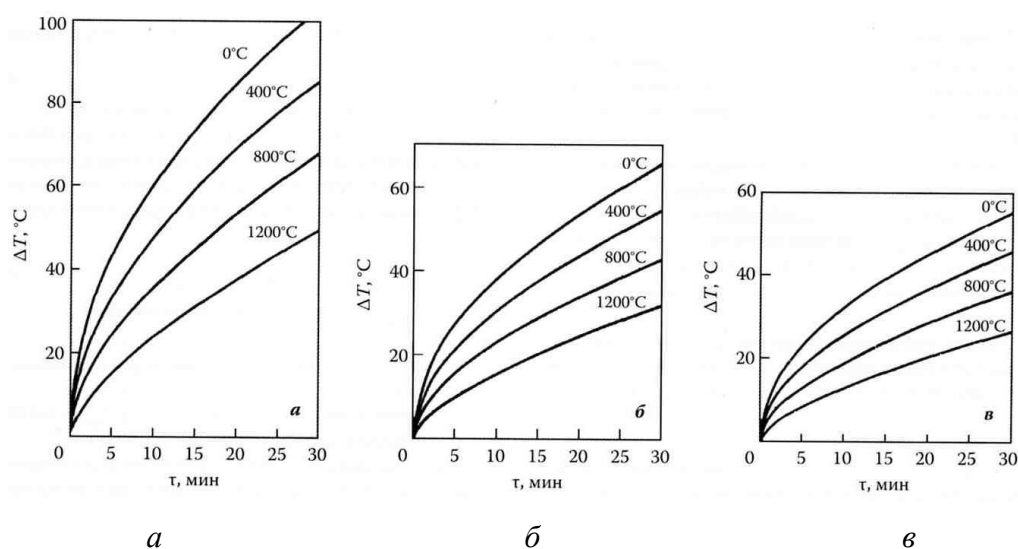


Рисунок 1.20 – Охлаждение металла в ковшах вместимостью 10 (а), 40 (б) и 80 (в) т в зависимости от температуры подогрева футеровки [2]

В работе [24] авторы изучали влияние начальной температуры футеровки 105-т ковша. На рис. 1.21 приведена расчетная зависимость между температурой подогрева футеровки и величиной падения температуры металла в ковше. Если сравнивать рис. 1.21 и 1.22 видно, что зависимости схожи. Это можно объяснить тем, что футеровка рабочего слоя исследуемого ковша, так же как ковши времен Кньюппеля выполнена из высокоглиноземистых огнеупорных кирпичей с коэффициентом теплопроводности $\lambda=1,65$ Вт/(м·К). Современные же огнеупорные материалы, с повышенной стойкостью и увеличенным сроком службы в термическом плане хуже, чем традиционные огнеупоры, т.е. их теплопроводность и теплоемкость выше, в результате чего повышаются тепловые потери стали. Поэтому необходимо изучение влияния

подогрева ковшей, футерованных современными огнеупорами: периклазоуглеродистыми или доломитовыми кирпичами, а также монолитной футеровкой разного состава, теплопроводность которых в зависимости от температуры колеблется от 5–10 Вт/(м·К).

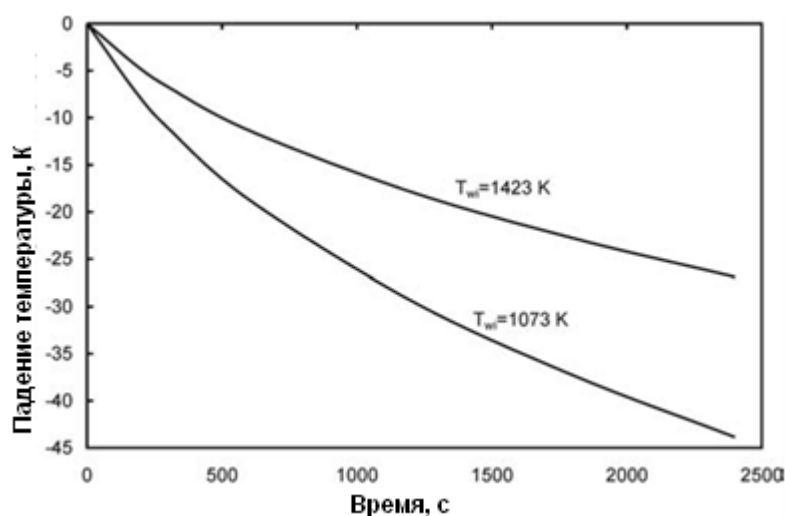


Рисунок 1.21 - Охлаждение металла в ковше вместимостью 105 т в зависимости от температуры подогрева футеровки [24]

1.4 Математические модели тепловых процессов внепечной обработки металла в сталковше

В связи с высокими температурами и сложностью измерения технологических параметров для изучения тепловых процессов, происходящих во время ковшовой обработки стали активно используется математическое моделирование. За последние годы было опубликовано множество работ, в которых представлены тепловые модели как различных процессов ковшовой обработки, так и полные модели всех ее этапов.

1.4.1 Модели распределения температуры в футеровке сталковша

Как было отмечено ранее, начальное тепловое состояние футеровки ковша значительно влияет на тепловые потери металла в нем, поэтому во многих работах представлены отдельные модели распределения температуры в футеровке ковша [25-32].

Например, Волкова с коллегами [25] разработала комплексную модель распределения температуры в футеровке сталковшей в течение всего цикла его работы, основанную на решении одномерного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных разностей. С помощью разработанной модели сравнивались тепловые

характеристики различных типов футеровки рабочего слоя сталковша. Авторы [31] разработали двумерную модель для оценки распределения температуры в футеровки ковшей. Для решения двумерной задачи нестационарной теплопроводности использовался метод конечных элементов. Модель можно использовать при проектировании футеровки ковша, т.е. для анализа поведения новых огнеупорных материалов в качестве футеровки. Результаты модели довольно хорошо согласуются с практическими наблюдениями и с измеренными значениями, полученными с помощью термопар в футеровке ковша во время кампании.

1.4.2 Комплексные модели прогнозирования температуры металла в ковше

Наибольший интерес, однако, представляют собой модели прогнозирования температуры стали во время внепечной обработки, т.к. они позволяют изучать влияние различных технологических факторов на охлаждение металла в ковше.

Современные методы прогнозирования температуры можно разделить на два подхода: математический и статистический. Математические модели обычно основаны на термодинамических законах, описывающие различные виды теплообмена: теплопроводность, конвекцию и излучение. В связи со сложностью математического описания некоторых явлений, например, нестационарной теплопроводности в футеровке ковша, которое описывается дифференциальным уравнением второго порядка,

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_n$$

в таких моделях часто используются численные методы решения. Основная идея численных методов состоит в замене непрерывных функций и их производных по времени и координатам, а также граничных условий их приближенными значениями в отдельных точках (узлах) сетки. В результате такой замены дифференциальное уравнение сводится к системе алгебраических уравнений относительно искомых параметров в узлах и ячейках сетки.

В таблице 1.2 представлен обзор представленных в литературе тепловых моделей.

Таблица 1.2 – Литературные источники

Методика модели	Ссылки
Одномерные модели с МКР	33-46
Двухмерные модели, основанные на МКР/МКЭ	47, 48
Двухмерные CFD-модели	24, 49-58
Трёхмерные CFD-модели	59-61

Видно, что большинстве работ представлены простые одномерные модели нестационарной теплопроводности с использованием метода конечных разностей (МКР) [33-

46]. Например, авторы [44] разработали математическую модель охлаждения стали в ковше в зависимости от массы расплава в ковше, начальной температуры расплава и футеровки ковша, основанную на МКР. С помощью предложенной модели авторы изучали влияние толщины рабочего слоя футеровки на скорость охлаждения стали в ковше во время внепечной обработки [45].

Белковский и Кац [46] предложили модель охлаждения стали в стальковше и промковше от выпуска до разливки. В модели учитываются тепловые потери струи во время выпуска, что отличает её от других исследований. Для моделирования нестационарной теплопроводности в футеровке ковша используется приближенное уравнение из [3], что снижает точность модели. Кроме того, в модели сделано допущение о достижении футеровки ковша стационарного состояния уже после 45 мин внепечной обработки, что, по данным других исследователей [25, 31, 32], далеко от истины.

Только несколько моделей используют двухмерное приближение. Авторы [47] используют метод переменных направлений, основанный на методе конечных разностей, а авторы [48] использовали метод конечных элементов (МКЭ) для решения двумерного динамического уравнения теплопроводности для футеровки ковша совместно с уравнением энергетического баланса для идеально перемешанного ковша. Также в модель были добавлены тепловые потери излучением от шлака. Таким образом, излучение, конвекция, а также теплопроводность в футеровке учитывались на каждом шаге времени в решении уравнения энергетического баланса для жидкой стали.

Такие модели достаточно просты в реализации и удобны для моделирования процесса в режиме реального времени, т.к. время вычислений не превышает нескольких минут. Однако точность их ограничена из-за большого числа допущений, принимаемых при моделировании. Главными из них является приближенное описание процесса конвективного теплообмена, что значительно понижает точность прогнозирования температуры металла, а также полное отсутствие математического описания массообмена. По этой причине невозможно определить температурный градиент в ванне жидкого металла, так называемое явление термической стратификации (расслоения). Кроме того, для одномерных и двумерных моделей невозможно учесть влияние радиационного теплообмена между поверхностями ковша. Поэтому для более точного моделирования тепловых потерь жидкой стали в ковше последнее время часто используются методы вычислительной гидроаэродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD), которые позволяют численно решать частные дифференциальные уравнения типа Навье-Стокса, описывающие явления массо- и теплопереноса, таким образом позволяя получать модели потоков и распределение температуры металла в ковше. Программные продукты, использующие методы CFD позволяют успешно решать указанные и многие другие задачи с

весьма высокой достоверностью и с любой необходимой степенью детализации [62]. Однако, как отмечают авторы [62], в отличие от зарубежного опыта, в нашей стране методы вычислительной гидродинамики и программные продукты используются ограничено.

CFD-модели не используются для моделирования в режиме реального времени, т.к. сложные вычисления занимают слишком большое количество времени. Чаще всего такие модели применяют, например, для подробных исследований теплового состояния ванны жидкого металла, явления термической стратификации и влияния технологии на охлаждение стали. Например, авторы [49] провели анализ нестационарных процессов распределения температуры и скорости течения стали во время выдержки и опорожнения ковша при помощи разработанной двумерной CFD-модели. Авторы определили влияние скорости охлаждения ковша, времени выдержки, скорости разливки и геометрии ковша на температуру потока стали при разливке. Однако в предложенной модели не учитывалась футеровка стального ковша, а вместо этого тепловые потери через футеровку были приняты постоянными. Для изучения термической стратификации и уточнения работы [49] авторы [50] предложили двухмерную CFD-модель, учитывающую тепловые потери через футеровку, однако игнорирующую потери через открытую поверхность металла. Авторы [24] разработали двумерную тепловую CFD-модель охлаждения стали в ковше во время выдержки. Модель использовалась для изучения влияния толщины шлака и начальной температуры футеровки на развитие термической стратификации стали в ковше. Однако принятое допущение об одинаковой начальной температуре футеровки ковша по толщине и высоте снижает точность моделирования. Авторы [54] также разработали двумерную CFD-модель разливки металла из стального ковша. В модели конвективная теплопередача между жидкой сталью и футеровкой учитывалась с помощью коэффициента конвективной теплопередачи. С помощью модели изучалось влияние теплопроводности шлака на температуру и скорость движения стали в ковше во время разливки.

Трёхмерное приближение используется только в нескольких CFD-моделях. Авторы [61], используя разработанные в Днепродзержинском государственном техническом университете трёхмерные CFD-модели провели численное исследование теплового состояния ковшовой ванны при обработке на АКП. Авторы [62] предложили трёхмерную модель охлаждения, основанную на методах вычислительной гидродинамики и с ее помощью изучали влияние различных параметров ковшовой обработки на снижение температуры стали в ковше. Однако допущения, сделанные при моделировании сильно снижают ее точность и значимость результатов. Авторы пренебрегли свободной конвекцией в жидкой ванне, а также зависимостью теплотехнических свойств жидкой стали и огнеупоров от температуры, что значительно снизило точность определения тепловых потерь теплопроводностью через футеровку. Кроме того, в работе было сделано допущение, что начальное тепловое состояние

нового, свежезафутерованного ковша после предварительного подогрева выше, чем у ковша в обороте, что опровергается многочисленными исследованиями [25, 32, 33].

Другим способом описания тепловых потерь в ковше является статистические модели, в которых используются эмпирические и полуэмпирические выражения. Авторы [63] предложили статистическую модель, основанную на многофакторной регрессии, не уступающей по точности физическим моделям ковша. Авторы [64] разработали прогнозную модель температуры стали на АКП. Она использует разновидность нейронных сетей, так называемая «сверхвысоко обучаемая машина (COM)» и прогнозирует температуру на основе вводимой мощности, начальной температуры, состояния ковша и т.д. В целом, прогнозы статистической модели гораздо быстрее, чем у физической, основанной на теплотехнических расчетах. Авторами [65] предложена статистическая модель для прогнозирования температуры жидкой стали с помощью самонастраивающегося фильтра (разновидность нейронных сетей). Предложенная модель отличается от других статистических моделей тем, что прогнозирует температуру с неким распределением, физическим смыслом которого является неравномерность распределения температуры по объему жидкой ванны, т.е. термическая стратификация. Хотя в модели используется гораздо больше вычислений, чем в методах точечной оценки, общее время вычислений все же так мало, что возможно прогнозирование в реальном времени.

Также можно выделить отдельный тип прогнозных тепловых моделей, в которых используются как термодинамические, так и статистические зависимости, обозначенные в иностранной литературе как «модели серого ящика» (gray-box models, т.е. объект исследования с частично неизвестными или частично не принимаемыми во внимание свойствами), по аналогии с моделями черного ящика, т.е. чисто статистическими моделями. Авторы статьи [66] разработали комплексную модель для контроля перегрева стали перед разливкой, включающую в себя как математические, так и статистические зависимости. С помощью метода конечных разностей моделировались потери тепла во время выдержки ковша перед продувкой аргоном, а для описания сложных нелинейных процессов охлаждения во время разливки использовались регрессионные уравнения. В результате предложенная модель показывала лучшую сходимость с промышленными данными по сравнению с моделями, использующими только термодинамическое описание процессов. Лившиц и др. [67] предложили модель для расчета снижения температуры металла в процессе внепечной обработки, основанную на полуэмпирических зависимостях для тепловых потерь излучением и аккумуляцией футеровкой ковша, получив при этом хорошую сходимость с промышленными данными. Авторы [68] предложили модель для прогнозирования температуры в промковше, в которой результаты термодинамических расчетов дополняются статистической моделью на основе нейронных

сетей. Затем полученная модель сравнивалась с термодинамической и обычной статистической моделью. В результате проверки адекватности моделей измеренным значениям температуры стали в промковше модель серого ящика имела наибольшее значение коэффициента корреляции R , что подтверждает ее точность. Авторы [69] разработали температурную модель АКП с частично линейной структурой, которая получена путем детального анализа тепловой работы АКП и дальнейшего подбора неизвестных коэффициентов термодинамических уравнений с помощью классических нейронных сетей.

К плюсам статистических моделей можно отнести их относительную точность, растущую с увеличением используемого массива данных, а также возможность их использования в режиме реального времени, т.к. в них не применяется итерационных и пошаговых методов решения. Однако использование статистических зависимостей приводит к тому, что изменение параметров технологии ковшовой обработки, не учтенных в модели, например, смена типа футеровки ковша или применение крышки приводит к резкому снижению точности прогнозирования температуры. По этим причинам статистические модели и модели «серого ящика» широко используются в системах автоматизации агрегатов ковш-печь, где нужно быстро предоставить примерную температуру стали в промковше для определения необходимой температуры на выпуске или после обработки на АКП. Для более глубоких исследований тепловых процессов, где необходимо учитывать влияние различных технологических параметров процесса, статистические модели применяются редко.

1.4.3 Модели подогрева футеровки ковшей

Кроме комплексных тепловых моделей работы сталковшей в отечественных и зарубежных изданиях широко представлены отдельные модели разогрева ковшей. Авторы [70] разработали полуэмпирическую модель для симуляции динамических тепловых явлений в свежезафутерованном ковше завода China Steel Corporation. Сушка и нагрев ковша моделируется с учетом свободной конвекции и излучения. Авторы [71] разработали динамическую модель для процесса нагрева ковша. Теплопередача внутри стенки ковша описывалась одномерным уравнением нестационарной теплопроводности. На внутренней границе тепловой поток к футеровке ковша описывалась только излучением. На внешней границе принимались во внимание конвекция и излучение. Авторы [13] разработали модель для описания пульсационного режима стенов сушки и нагрева сталеразливочных ковшей. Математическая модель основана на системе дифференциальных уравнений и соответствующих граничных условий для теплопередачи. Также использовалось уравнение, описывающее движение фронта сушки внутри футеровки ковша. Модель подогрева,

представленная в [72], основана на одномерном уравнении нестационарной теплопроводности. На внутренней границе использовалось уравнения излучения, основанное на коэффициенте черноты и температуре газа, которое использовалось для описания теплового потока от продуктов сгорания к футеровке ковша. Использовался поправочный коэффициент для описания экспериментальных данных. Потоки газа в ковше не учитывались. Волкова и коллеги [73] изучали процесс нагрева 240-тонного ковша. Использовались три различных программных пакета для моделирования горения природного газа, газовых потоков и нестационарного распределения температуры по футеровке ковша. На внутренней поверхности футеровки в качестве граничных условий использовались уравнения конвекции и излучения. Авторы [12] использовали разработанную простую математическую модель нагрева ковша газовоздушными горелками для изучения влияния футерованной крышки на стенде разогрева. Модель основана на одномерном уравнении для нестационарной теплопроводности и уравнении теплового баланса. Потоки газа в ковше также не учитывались, а температура газа была принята постоянной в любой точке ковша. Авторы [74] разработали модель подогрева ковша газовыми горелками. В основе модели положена двухмерная модель нестационарной теплопроводности. Граничные условия на внешней стенке ковша описывались законами конвекции и излучения. Передача энергии от факела к футеровке описывалась законом Стефана-Больцмана. Кроме того, учитывался массо- и теплоперенос в газовой фазе внутри ковша.

Авторы [16] разработали простую модель подогрева ковшей топливно-кислородными горелками. Она основана на уравнении, полученном из [75] для теплопередачи при постоянном тепловом потоке через бесконечную пластину с начальной температурой, равной комнатной.

Моделей электрического подогрева стальной ковшей ни в отечественной, ни в зарубежной литературе найдено не было.

1.5 Промежуточные выводы

Аналитический обзор литературы по теме работы позволил сделать следующие выводы:

1. Жидкая сталь остывает в ковше в основном из-за нестационарной теплопроводности через футеровку ковша и излучения через верх ковша, поэтому повышение начального теплосодержания футеровки и использование теплоизоляционных крышек – основные способы снижения тепловых потерь.

2. Скорость охлаждения стали в ковше также зависит от его вместимости, т.к. с уменьшением вместимости растет удельная теплоотдающая поверхность металла. По этой причине в ковшах малой вместимости металл охлаждается быстрее и необходимы дополнительные меры для утепления таких ковшей.

3. Использование теплоизоляционных крышек во время ожидания и транспортировки жидкого металла в ковше позволяет снизить тепловые потери через открытую поверхность металла. Кроме того, при использовании крышек во время разливки и охлаждения пустого ковша сохраняется аккумулированное тепло футеровки, что позволяет экономить на подогреве ковша.

4. Подогрев футеровки ковшей на большинстве металлургических предприятий производится на стендах сушки и подогрева при помощи газовых горелок. Однако при газовом подогреве температура внутренней поверхности ковша не превышает 1100 °С. Причиной этого является КПД нагрева, составляющий по разным данным от 10 до 30 %. Качественно новым способом подогрева ковшей является использование электрических нагревателей. Такие нагреватели, изготовленные из карбида кремния с высокой степенью черноты и температурой около 1400 °С по данным изготовителей, способны быстро нагревать футеровку ковша до температуры 1200-1400 °С. Однако исследований, доказывающих эти цифры, ни в отечественной, ни в зарубежной литературе найдено не было.

5. Несмотря на подтверждения многими авторами значимости влияния начального теплового состояния футеровки ковша на скорость охлаждения стали в нем, подробных исследований этого вопроса в литературе найдено не было.

6. В связи с невозможностью постоянных замеров параметров внепечной обработки, таких как температура жидкой ванны и футеровки, для изучения тепловых процессов широко используется математическое моделирование. За последние годы представлены десятки тепловых моделей процессов внепечной обработки. В результате анализа работ, представленных в отечественной и зарубежной литературе были сделаны следующие выводы:

- простые термодинамические и статистические модели используются для моделирования в реальном времени, например, для прогнозирования температуры стали перед разливкой;

- для подробного изучения тепловых процессов, происходящих в ковше во время внепечной обработки и учета влияния различных факторов технологии на эти процессы используются модели, основанные на вычислительной гидродинамике (CFD). Однако трехмерных моделей, учитывающих все виды теплопередачи без значительных допущений крайне мало;

- моделей электрического подогрева стальной ковшей ни в отечественной, ни в зарубежной литературе найдено не было;

- несмотря на то, что начальное тепловое состояние ковша оказывает сильное влияние на охлаждение металла, в большинстве моделей не учитывается футеровка ковша или учитывается с допущениями, снижающими точность моделирования. Для точного расчета начального

теплового состояния футеровки необходимо смоделировать весь цикл работы ковша, включая его охлаждение во время и после разливки, а также подогрев. Таких комплексных моделей, учитывающих эти процессы без серьезных допущений в литературе найдено не было.

ГЛАВА 2 – РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬКОВША ВО ВРЕМЯ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Была поставлена задача разработать высокоточную комплексную тепловую модель стальковша с использованием методов вычислительной гидродинамики. Основными требованиями к модели изложены ниже.

Модель должна быть трехмерной, чтобы учесть влияния лучистого теплообмена между поверхностями ковша. Для учета влияния начального теплового состояния ковша на тепловые потери металла без снижающих точность прогнозирования допущений, в дополнение к основной модели охлаждения стали в ковше необходимо разработать дополнительные модели охлаждения пустого ковша (открытого и накрытого крышкой), и его подогрева (газового, электрического), также основанные на методах вычислительной гидродинамики. Кроме того, в моделях должен учитываться конвективный теплообмен между текучими средами, такими как горячий воздух и жидкая сталь с футеровкой ковша.

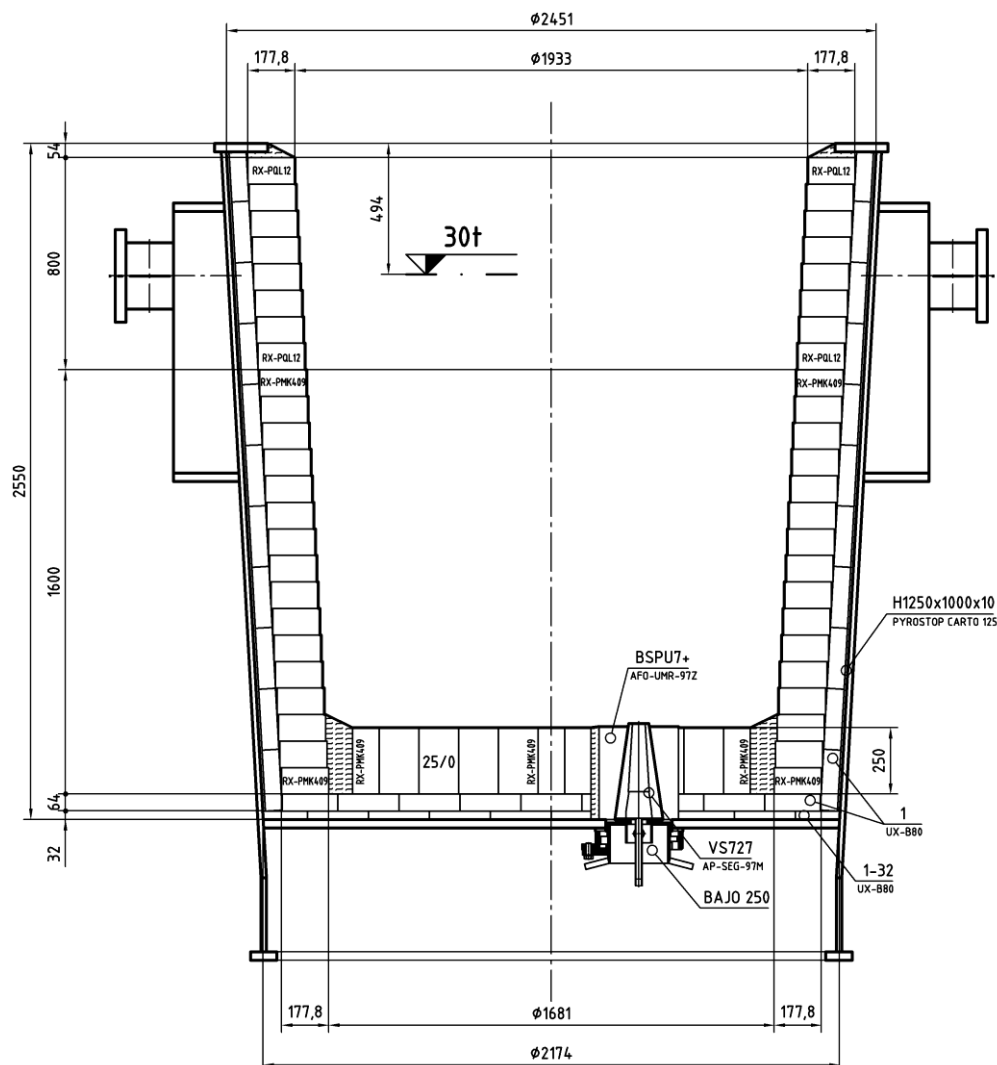


Рисунок 2.1 – Схема футеровки 30-т стальковша ГУП ЛПЗ

2.1 Характеристика объекта исследования

Объектом исследования являются 30-тонные сталеразливочные ковши ГУП «ЛПЗ» (рис. 2.1). Ковши имеют коническую форму с высотой 2,55 м, внешним диаметром 2,45 м сверху и 2,17 снизу. Ковш наполнен жидкой сталью на 2,15 м от дна, весом до 34 тонн. Боковая стенка толщиной 0,25 м состоит из трех слоев различных огнеупоров. Чертежи ковша и футеровки приведены в Приложении А. Во время разливки ковш накрывается теплоизоляционной крышкой, состоящей из стального каркаса толщиной 20 мм, покрытого волокнистым огнеупором толщиной 200 мм. Теплофизические свойства жидкой стали, шлака, стального кожуха и огнеупоров, используемые в расчете, представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. – Теплофизические свойства огнеупорных материалов, жидкой стали и шлака, используемые в моделировании (по данным фирмы RHI)

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Плотность, кг/м ³		Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Периклазоуглеродистые блоки (рабочий слой)	500°C	9,5	2830		1300
	750 °C	8,5			
	1000 °C	6,5			
	1200 °C	6			
	1400 °C	5,5			
Высокоглиноземистые блоки (арматурный слой)	1,8		2750		1100
Картон на основе керамического волокна (теплоизоляционный слой)	400 °C	0,08	480		835
	600 °C	0,1			
	800 °C	0,15			
	1000 °C	0,21			
Сталь 3 (кожух)	50		7800		480
Жидкая сталь	30		1520 °C	6800	840
			1550 °C	6780	
			1600 °C	6750	
			1650 °C	6700	
Шлак	3		3000		2090
Муллитокремнеземистый войлок (крышка)	0,12		200		1075

2.2 Основные уравнения

В используемом CFD-пакете движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Кроме того, используются уравнения состояния компонентов текучей среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры. Этими уравнениями моделируются турбулентные, ламинарные и переходные (между ламинарными и турбулентными переход определяется критическим значением числа Рейнольдса) течения. Для моделирования турбулентных течений упомянутые уравнения Навье–Стокса усредняются по Рейнольдсу, т. е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени. В результате уравнения имеют дополнительные члены – напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания этой системы уравнений используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках k - ε модели турбулентности [76].

Эта система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет следующий вид в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат $(x_i, i=1,2,3)$, вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через ее начало:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P) u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (2.3)$$

где t — время, u — скорость текучей среды, ρ — плотность текучей среды, P — давление текучей среды, S_i — внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды: $S_{iporous}$ — действие сопротивления пористого тела, $S_{igravity}$ — действие гравитации, $S_{irotation}$ — действие вращения системы координат, т. е.

$$S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irotation} \quad (2.4)$$

E — полная энергия единичной массы текучей среды, Q_H — тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме текучей среды, τ_{ik} — тензор вязких сдвиговых напряжений, q_i — диффузионный тепловой поток,

Нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Для ньютоновских текучих сред тензор вязких сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.5)$$

где $\mu = \mu_l + \mu_t$, μ_l – коэффициент динамической вязкости, μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, δ_{ij} – дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$), k – кинетическая энергия турбулентности. В соответствии с $k - \varepsilon$ моделью турбулентности, μ_t определяется через величины кинетической энергии турбулентности k и диссипации этой энергии ε :

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (2.6)$$

где $f_\mu = (1 - e^{-0,025 R_y})^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T}\right)$; $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_l}$; $R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon}$, y – расстояние от поверхности стенки, $C_\mu = 0,09$.

Кинетическая энергия турбулентности k и диссипация этой энергии ε определяются в результате решения следующих двух уравнений:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon, \quad (2.8)$$

где $S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_l P_B$.

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_l C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (2.9)$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_l \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.10)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \quad (2.11)$$

где g_i – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении x_i , $\sigma_B = 0,9$, $C_B = 1$ при $P_B > 0$ и $C_B = 0$ при $P_B \leq 0$, $f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu}\right)^3$, $f_2 = 1 - e^{-R_T^2}$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $\sigma_k = 1$.

Диффузионный тепловой поток моделируется с помощью уравнения:

$$q_k = - \left(\frac{\mu_l}{Pr} + \frac{\mu_l}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k=1,2,3, \quad (2.12)$$

где $\sigma_c = 0,9$, Pr – число Прандтля, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, T – температура текучей среды.

Для моделирования ламинарных течений данная система уравнений несколько модифицируется, а именно полагается $\mu_t = 0$ и $k = 0$. С помощью функции f_μ моделируется переход ламинарного течения в турбулентное и турбулентного в ламинарное.

Ламинарные и турбулентные пограничные слои течения около поверхностей твердого тела, а также переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный и, наоборот, турбулентного в ламинарный моделируются с высокой точностью с помощью модифицированных универсальных пристеночных функций.

Теплопередача в твердых телах моделируется с помощью дифференциального уравнения Фурье:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad (2.13)$$

где c – удельная теплоемкость, T – температура, λ – теплопроводность, Q_H – удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла

Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей жидкостью рассчитывается по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$q_k = \alpha \cdot (T - T_{o.c.}), \quad (2.14)$$

При этом, коэффициент конвективной теплоотдачи α высчитывается при моделировании пограничного слоя потока текучей среды.

Радиационный теплообмен между поверхностями моделируется в соответствии с законом Стефана-Больцмана:

$$q_k = \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_{o.c.}^4) \quad (2.15)$$

где ε – степень черноты поверхности, σ_0 — постоянная Стефана – Больцмана.

При этом рассматривается только интегральное, т. е. суммарное по всем длинам волн, излучение. Излучающие тепло поверхности задаются абсолютно черными, абсолютно белыми или идеально серыми, так что, в соответствии с законом Ламберта, их излучение предполагается диффузным, т. е. с независимой от направления излучения яркостью. Соответственно моделируется поглощение и/или отражение радиационного тепла участвующими в радиационном теплообмене поверхностями. Аналогично излучению от твердых поверхностей моделируется излучение тепла в расчетную область от расположенных в текучей среде границ расчетной области. В результате для каждой участвующей в радиационном теплообмене поверхности определяется (с учетом рассчитываемого фактора

видимости) разность между приходящими и уходящими (т. е. отраженными и излучаемыми) радиационными тепловыми потоками [76].

2.3 Основные допущения

С помощью используемого CFD-пакета невозможно смоделировать выпуск металла в ковш и добавление легирующих и раскислителей, поэтому тепловые потери струи металла во время выпуска и за счет легирования в настоящей модели не учитываются. Однако, основанная задача настоящей модели – оценка влияния различных факторов технологии внепечной обработки стали на охлаждение металла в ковше, а не прогнозирование температуры металла. Т.к. эти потери не меняются от плавки к плавке, допущено, что отсутствие их учета не влияют на характер общих тепловых потерь металла.

По окончании рабочего цикла (перед разливкой) тепловое состояние ковша стационарное, т.е. футеровка не аккумулирует тепло.

Начальное состояние металла в ковше полностью гомогенное по температуре, что соответствует состоянию металла в ковше после выпуска.

Стоит отметить, что в настоящей модели не делается допущений о теплопередаче между сталью и внутренней поверхностью стенок ковша. Тепловые потери от стали через футеровку вычисляются согласно закону сохранения энергии. Таким образом, настоящий подход должен дать более точное решение для реальных процессов теплопередачи в ковше во время периода выдержки.

2.4 Определение начальных и граничных условий

На всех этапах цикла работы ковша для внешней поверхности кожуха ковша учитывались конвективные и радиационные граничные условия (3-го рода) с помощью уравнений (2.14) и (2.15), причем коэффициент конвективной теплоотдачи α высчитывается при моделировании пограничного слоя потока текучей среды. Степень черноты кожуха была принята равной 0,98 по данным [77]. Принято, что температура окружающей среды равна 25 °С.

На внутренней поверхности футеровки ковша также было принято граничное условие 3-го рода с учетом конвекции и излучения при пустом ковше и только конвекции при заполненном металлом. Степень черноты горячей футеровки была принята равной 0,88, исходя из результатов приведенных ниже экспериментов (см. раздел 2.6.1).

2.4.1 Субмодель охлаждения металла в ковше

Начальное тепловое состояние футеровки ковша высчитывается отдельно, с помощью субмоделей охлаждения пустого ковша и подогрева ковша, о которых подробнее будет написано ниже. Начальное состояние жидкого металла полностью гомогенное, с заданной температурой. На поверхности раздела футеровки и металла принято граничное условие 3-го рода с учетом конвекции. Металл покрывает слой шлака с заданной толщиной, начальная температура шлака равна температуре металла. Степень черноты шлака, покрывающего зеркало металла принята равной 0,8 по данным [74].

2.4.2 Субмодель охлаждения пустого стальковша

Субмодель разработана для расчета начального теплового состояния футеровки стальковша перед выпуском плавки при отсутствии предварительного подогрева. Таким образом результаты субмодели являются начальными условиями для субмодели охлаждения металла в ковше.

Начальными условиями для этой модели служит допущение о стационарном тепловом состоянии футеровки оборотного ковша перед разливкой, что подтверждается другими исследованиями [25, 32]. Таким образом, температура равномерно распределена по всем слоям футеровки в зависимости от их теплопроводности и расстояния от горячей стенки. Температура горячей стенки задается равной температуре жидкого металла перед разливкой, т.е. ~ 1600 °C.

На горячей стенке футеровки были приняты граничные условия 3-го рода с учетом конвекции и излучения. Охлаждение пустого ковша также может вестись под теплоизолирующей крышкой, описанной выше. Степень черноты внутренней поверхности теплоизоляционной крышки бралась равной 1, по данным [22].

2.4.3 Субмодель подогрева пустого стальковша

Эта субмодель разработана для расчета начального теплового состояния футеровки стальковша перед выпуском плавки для случая, когда он предварительно подогревается.

Начальным тепловым состоянием футеровки ковша могут быть как результаты моделирования охлаждения пустого ковша, если происходит подогрев оборотного ковша, так и температура окружающей среды при подогреве ковша, который долгое время не использовался.

В зависимости от нагревательного элемента изменяются начальные и граничные условия модели, поэтому можно разделить субмодель подогрева стальной ковша на три отдельные субмодели:

- субмодель подогрева ковша топливно-воздушной горелкой;
- субмодель подогрева ковша топливно-кислородной горелкой;
- субмодель подогрева ковша электрическими нагревателями.

Модели подогрева ковша топливно-воздушной и топливно-кислородной горелками

Процесс подогрева сталеразливочных ковшей с помощью горелок включает в себя явления теплопроводности, конвекции, излучения и горения. Для того чтобы математически сформулировать эти процессы необходимо вводить некоторые допущения. Горение подробно не моделировалось, вместо этого температура внешней части факела взята в качестве граничного условия. Форма факела для упрощения модели была принята цилиндрической. Длина и диаметр факела были взяты из паспорта горелки «KromSchroeder» марки ZIO200RB-50/35-(20)D, используемой на стендах подогрева на ГУП «ЛПЗ» (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Технические характеристики газовой горелки «KromSchroeder» марки ZIO200RB-50/35-(20)D [14]

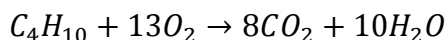
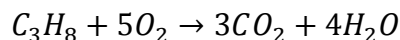
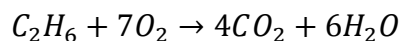
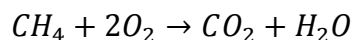
Характеристика	Значение
Мощность горелки, кВт	1000
Диаметр горелочной трубы (D), мм	200
Длина факела, мм	1000
Диаметр факела, мм	(1...2) D
Максимальная температура пламени, °C	1600

Для субмоделей топливно-воздушного и топливно-кислородного подогрева футеровки необходимо определить температуру факела и его светимость (степень черноты). Эти параметры рассчитывались по методике, приведенной в [9]. Исходными данными для расчета является состав топлива, конструкция горелки и температура подогрева воздуха и газа.

Как уже было упомянуто, на стенде высокотемпературного подогрева ГУП «ЛПЗ» установлена пламенная горелка фирмы «KromSchroeder» марки ZIO200RB-50/35-(20)D. В качестве топлива используется природный газ с примерным составом, % масс.: 93,2 CH₄, 0,7 C₂H₆, 0,6 C₃H₈, 0,6 C₄H₁₀, 4,9 N₂. Калорийность газа определяется по формуле:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 127,7\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 + 590\text{C}_2\text{H}_4 + 555\text{C}_2\text{H}_2 + 636\text{C}_2\text{H}_6 + 913\text{C}_3\text{H}_8 + 1185\text{C}_4\text{H}_{10} + 1465\text{C}_5\text{H}_{12} + 234\text{H}_2\text{S} \quad (2.16)$$

Расчет температуры горения факела начинается с определения расхода воздуха и состава продуктов сгорания. Реакции горения природного газа приведены ниже:



Количество кислорода, необходимое для окисления компонентов природного газа находится исходя из стехиометрических коэффициентов уравнений реакций по формуле:

$$V_{O_2} = 0,01 \left[0,5(CO + H_2 + 3H_2S) + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n \right] \quad (2.17)$$

Так как в качестве окислителя используется кислород воздуха, необходимое количество воздуха определяется по формуле:

$$V_b = n(1 + k)V_{O_2},$$

где k – отношение объемных долей N_2 и O_2 в дутье (для воздуха $k=79/21=3,762$); n – коэффициент расхода воздуха.

Объем продуктов сгорания определяется по формулам 2.18-2.21:

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CO + \sum m C_m H_n) \quad (2.18)$$

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2O + H_2 + 0,5 \sum n C_m H_n) \quad (2.19)$$

$$V_{N_2} = 0,01N_2 + nkV_{O_2} \quad (2.20)$$

$$\dot{V}_{O_2} = 0,01N_2 + nkV_{O_2} \quad (2.21)$$

Результаты расчетов состава продуктов сгорания представлен в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчетов состава продуктов сгорания

Природный газ		Воздух, м ³			Продукты сгорания, м ³				
Состав топлива	Объем, м ³	O ₂	N ₂	Всего	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	Всего
CH ₄	93,2	186,4	736,39	932,14	93,2	186,4		736,39	
C ₂ H ₆	0,7	2,45			1,4	2,1			
C ₃ H ₈	0,6	3			1,8	2,4			
C ₄ H ₁₀	0,6	3,9			2,4	3			
N ₂	4,9							4,9	
n=1,1	м ³	100	215,32	810,03	1025,35	98,8	193,9	19,57	814,93
	%	100	21	79	100	8,77	17,20	1,74	72,30
									1127,20
									100,00

Допуская, что все тепло от сжигания топлива идет на нагрев продуктов сгорания, их истинная энтальпия i_0 определяется по формуле:

$$i_0 = c_{\text{п.с}} t_K = \frac{Q_H^p + V_B c_B t_B + c_T t_T}{V_{\text{п.с}}} \quad (2.21)$$

Учитывая, что воздух и газ поступают в горелку без подогрева:

$$i_0 = \frac{35 \cdot 10^6}{11,27} = 3111,2 \text{ кДж/м}^3$$

Энтальпия продуктов сгорания при заданной температуре определяется по формуле:

$$i_{t_K} = \frac{i_{CO_2}^{t_K} V_{CO_2} + i_{H_2O}^{t_K} V_{H_2O} + i_{N_2}^{t_K} V_{N_2} + i_{O_2}^{t_K} V_{O_2}}{V_{\text{п.с}}} \quad (2.22)$$

где i – энтальпии продуктов сгорания, см. табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Энтальпии продуктов сгорания природного газа, кДж/м³ в зависимости от температуры

T, К	CO ₂	N ₂	O ₂ '	H ₂ O
373	172	130,13	131,93	150,18
473	361,67	260,6	267,38	303,47
573	564,24	392,41	407,48	461,36
673	777,44	526,89	551,85	623,69
773	1001,78	664,58	700,17	791,55
873	1236,76	805,06	851,64	964,68
973	1475,41	940,36	1005,24	1143,64
1073	1718,95	1094,65	1162,32	1328,11
1173	1972,43	1243,55	1319,67	1517,87
1273	2226,75	1393,86	1480,11	1713,32
1373	2485,34	1546,14	1641,02	1913,67
1473	2746,44	1699,76	1802,76	2118,78
1573	3010,58	1857,74	1966,05	2328,01
1673	3276,75	2012,36	2129,93	2540,25
1773	3545,34	2170,55	2296,78	2758,39
1873	3815,86	2328,65	2463,97	2979,13
1973	4087,1	2486,28	2632,09	3203,05
2073	4360,67	2646,74	2800,48	3429,9
2173	4634,76	2808,22	2971,3	3657,85
2273	4910,51	2970,25	3142,76	3889,721
2373	5186,81	3131,96	3314,85	4121,79
2473	5464,2	3295,84	3487,44	4358,83
2573	5746,39	3457,2	3662,33	4485,34
2673	6023,25	3620,58	3837,64	4724,37
2773	6303,53	3786,09	4014,29	5076,74

Зададим $t_K = 1900$ °С (2173 К), при которой по формуле (2.22) найдем энтальпию продуктов сгорания рассматриваемого состава.

$$i^{1900} = \frac{4634,76 \cdot 0,088 + 3657,85 \cdot 0,172 + 2808,22 \cdot 0,723 + 2971,3 \cdot 0,017}{11,27}$$

$$= 3117,86 \text{ кДж/м}^3$$

Поскольку $i_0 < i^{1900}$ принимаем $t''_k = 1800$ °С (2073 К) и рассчитываем i^{1800} :

$$i^{1800} = \frac{4360,67 \cdot 0,088 + 3429,9 \cdot 0,172 + 2646,74 \cdot 0,723 + 2800,48 \cdot 0,017}{11,27}$$

$$= 2984,88 \text{ кДж/м}^3$$

Калориметрическая температура горения находится по формуле:

$$t_k = t''_k + \frac{i_0 - i''_k}{i t'_k - i t''_k} \cdot 100 = 1800 + \frac{3111,2 - 2984,88}{3117,86 - 2984,88} \cdot 100 = 1896 \text{ °С}$$

Действительная температура горения, которая и является искомой температурой пламени горелки определяется по формуле:

$$t_{\text{действ}} = \eta_{\text{пир}} t_k \quad (2.23)$$

где $\eta_{\text{пир}}$ – пирометрический коэффициент, учитывающий потери тепла при сгорании. Для нашего случая, учитывая ширину зазора между крышкой и горловиной ковша, равной 50-100 мм, принимаем $\eta_{\text{пир}} = 0,9$.

$$t_{\text{действ}} = 1896 \cdot 0,9 = 1706 \approx 1700 \text{ °С}$$

Такое значение температуры факела близко к приблизительному значению, приведенному в паспорте горелки [14].

Далее необходимо определить излучающую способность факела газовой горелки, которая равнозначна степени черноты. По информации из [9] для практических расчетов излучательной способности светящегося факела природного газа $\varepsilon_{\text{ф}}$ можно использовать формулу:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = 1,5 \varepsilon_{\text{г}} \quad (2.24)$$

где $\varepsilon_{\text{г}}$ – степень черноты дымовых газов.

Как известно из теплотехники, излучать энергию могут только трех- и многоатомные газы, например CO_2 и пары воды, из которых, наряду с азотом, и состоят дымовые газы. Степень черноты газов является функцией от их температуры, давления и эффективной длины луча.

Температура газов была определена нами выше, парциальное давление CO_2 и паров воды зависит от состава дымовых газов, который также был рассчитан. Средняя длина луча определяется по формуле А.С. Невского:

$$S_{\text{эфф}} = 3,6 \frac{V}{F} \quad (2.25)$$

где V – объем, заполненный излучающим газом, м^3 ; F – поверхность всех стенок, ограничивающих этот объем, м^2 . Принимая за V внутренний объем ковша, а за A – площадь рабочей футеровки рассчитали эффективную длину луча по формуле.

$$S_{\text{эфф}} = 3,6 \frac{6,04}{(12,50+2,22+2,93)} = 1,23$$

Принимая, что давление внутри ковша примерно равно атмосферному, а объемные доли CO_2 и H_2O в дымовых газах составляют 8,77 и 17,20 соответственно, находим парциальные давления компонентов:

$$p_{\text{CO}_2} = p_0 \cdot \% \text{CO}_2 = 8,77 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_0 \cdot \% \text{H}_2\text{O} = 17,2 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{CO}_2} \cdot S_{\text{эфф}} = 8,77 \cdot 1,23 = 10,8 \text{ кПа} \cdot \text{м}^2$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{эфф}} = 17,2 \cdot 1,23 = 21,2 \text{ кПа} \cdot \text{м}^2$$

Для определения степени черноты газов использовали номограммы из [9], изображенные на рис. 2.2 и 2.3, с помощью которых находили степень черноты $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ и условную степень черноты водяных паров $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$. Степень черноты водяных паров необходимо умножать на поправку, которую находят по рис. 2.4. Степень черноты газов находят суммированием полученных степеней черноты отдельных газов:

$$\varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \beta \quad (2.26)$$

Таким образом,

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} \approx 0,06$$

$$\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0,11$$

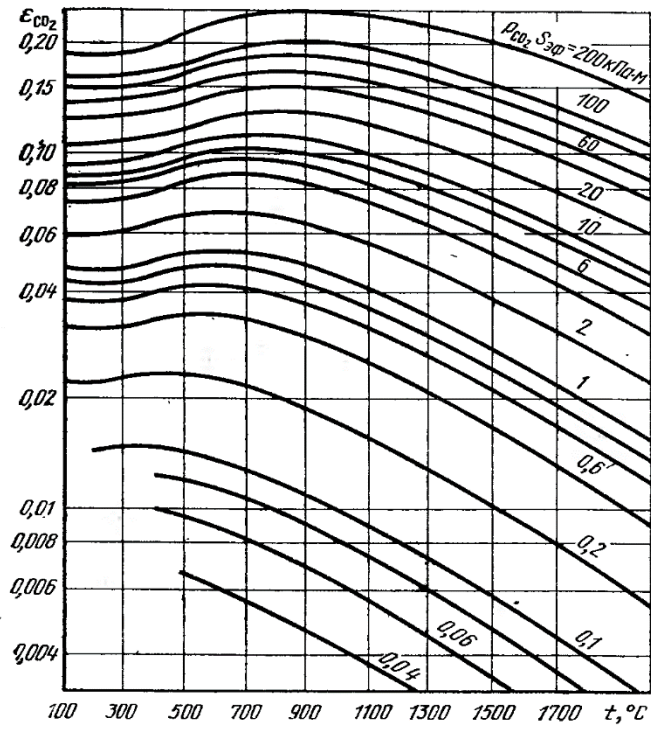
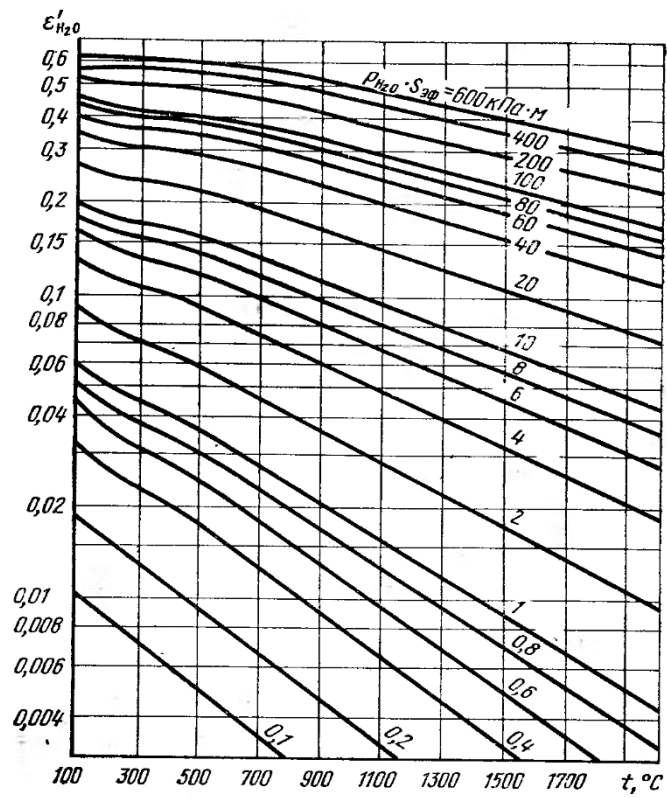
$$\beta = 1,35$$

$$\varepsilon_{\text{г}} = 0,06 + 1,35 \cdot 0,11 = 0,195$$

Учитывая формулу (2.24) получаем:

$$\varepsilon_{\text{ф}} = 1,5 \cdot 0,195 = 0,29 \approx 0,3$$

Полученное расчетное значение степени черноты факела природного газа соответствует опытным данным, представленным в работе [8].

Рисунок 2.2 – Номограмма для определения степени черноты CO_2 Рисунок 2.3 – Номограмма для определения степени черноты H_2O

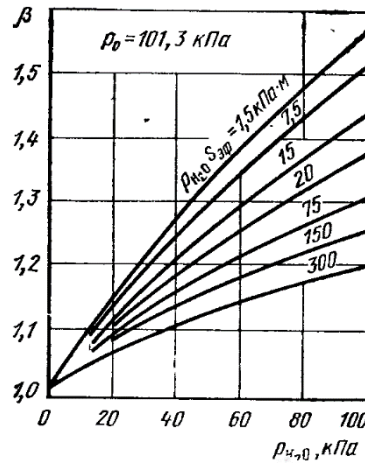


Рисунок 2.4 – Номограмма для определения поправочного коэффициента β

Калориметрическая температура горения природного газа топливно-кислородной горелки намного превышает температуру горения газа в воздухе. Однако из-за технологии разбавления кислорода отходящими газами температура факела (по информации из [16]) даже снижается, что позволяет уменьшить выбросы вредных оксидов азота. По этой причине, температура факела ТКГ в модели принималась равной расчетной температуре факела топливно-воздушной горелки, т.е. 1700 °С.

Степень черноты факела ТКГ определялась по той же методике, что и для традиционной горелки. Принято, что состав дымовых газов при полном горении природного газа в кислороде имеют в составе 33 % CO_2 и 67 % H_2O .

Соответственно, парциальные давления этих газов равны:

$$p_{\text{CO}_2} = p_0 \cdot \% \text{CO}_2 = 33 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = p_0 \cdot \% \text{H}_2\text{O} = 67 \text{ кПа}$$

$$p_{\text{CO}_2} \cdot S_{\text{эфф}} = 8,77 \cdot 1,23 = 50,84 \text{ кПа} \cdot \text{м}^2$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{эфф}} = 17,2 \cdot 1,23 = 101,68 \text{ кПа} \cdot \text{м}^2$$

По графикам на рис. 2.2-2.4 определяли $\varepsilon_{\text{CO}_2}$, $\varepsilon'_{\text{H}_2\text{O}}$ и β , и по формуле (2.26) высчитывали степень черноты дымовых газов:

$$\varepsilon_r = 0,13 + 1,25 \cdot 0,25 = 0,44$$

Учитывая формулу (2.24), получаем:

$$\varepsilon_{\phi} = 1,5 \cdot 0,44 = 0,66.$$

Модель подогрева ковша электрическими нагревателями

Трехмерная модель установки электрического нагрева разработана на основе чертежей, полученных от «ТЭК-98» (Приложение Б). Степень черноты карбида кремния была принята равной 0,85 [9]. Однако для адаптации модели электрического нагрева для ковшей ГУП «ЛПЗ» необходимо было уточнить температуру карбидокремниевых нагревателей, их количество, а также примерную схему их размещения. По данным из [9], карбидокремниевые нагреватели используются, когда необходимо иметь температуру нагреваемого объекта около 1350-1400 °С. При этом температура нагревателей не превышает 1450 °С. Фирма-производитель карбидокремниевых нагревателей «Kanthal» приводит следующие максимальные температуры нагревателей: 1625 °С на сухом воздухе, 1500 °С в кислороде, 1350 °С в азоте [78]. Температура нагревателей зависит только от подаваемой мощности и требуемой температуры нагрева. По номограмме из [78] была определена необходимая мощность и температура нагревателей для подогрева футеровки ковша. Таким образом, для нагрева футеровки ковша до 1400 °С необходимо иметь температуру нагревателей, равной 1450 °С. При этом удельная поверхностная мощность нагревателя (w) должна составлять 60 кВт/м². Для определения мощности одного нагревателя необходимо знать его площадь поверхности. На рис. 2.5 и в табл. 2.5 приведены геометрические размеры предлагаемых нагревателей.



Рисунок 2.5 – Схема U-образного карбидокремниевых нагревателя фирмы «Kanthal»

Таблица 2.5 – Геометрические размеры U-образного карбидокремниевых нагревателя фирмы «Kanthal»

Длина горячей зоны нагревателя (B), мм	1800
Длина холодной зоны нагревателя (C), мм	400
Диаметр колена (A), мм	38
Расстояние между центрами колен (G), мм	89

Таким образом, площадь поверхности нагревателей будет примерно равняться сумме площадей поверхности двух его колен:

$$S_{нов} = 2 \cdot (2\pi R_k \cdot H_k + \pi R_k^2) = 0,432 \text{ м}^2.$$

Тогда мощность одного нагревателя равняется:

$$N = w \cdot S_{нов} = 25,9 \text{ кВт.}$$

Для 30-т ковшей фирма-производитель [18] рекомендует использовать нагреватели общей мощностью 380-400 кВт, таким образом количество нагревателей будет равно:

$$n = N_{\Sigma}/N=380/25,9=14,66.$$

Выбираем 15 нагревателей, соединенных по схеме «треугольник» по 5 нагревателей в каждой фазе.

Нагреватели монтируются в теплоизоляционную крышку по кругу, с шагом равным $2(G+A)$. Значит диаметр распада нагревателей можно рассчитать с помощью формулы длины окружности:

$$D = 15 \cdot 2(G + A)/\pi \approx 1200 \text{ мм.}$$

В итоге, для моделирования 15 отдельных нагревателей, установленных по окружности были упрощены до полого цилиндра такого же радиуса. Теплоотдающая поверхность 15 нагревателей равняется:

$$S_{нов} = 0,432 \cdot 15 = 6,48 \text{ м}^2.$$

Теплоотдающая поверхность модельного цилиндра равняется:

$$S_{нов} = \pi \cdot D \cdot H_k = 6,78 \text{ м}^2.$$

Разница в реальной и модельной площади поверхности составляет 4,5 %, а значит упрощение отдельных нагревателей до цилиндра не будет значительно влиять на точность модельных расчетов.

2.5 Методика вычислений

В среде SolidWorks была построена полноразмерная трехмерная модель стальной ГУП «ЛПЗ». Затем, с помощью программного CFD пакета расчетная область модели разбивалась на ячейки и основные уравнения, учитывая начальные и граничные условия, решались методом

конечных объемов. Разряжение сетки выбиралось так, чтобы точность расчета была не ниже точности измерения температуры методом термопар. Таким образом, количество ячеек сетки было не менее 50 000, а шаг по времени не превышал 10^{-2} с. Критерий сходимости, принятый в данной работе, ниже 10^{-4} .

2.6 Лабораторные и промышленные измерения

Для идентификации и верификации модели были проведены промышленные и лабораторные измерения и эксперименты. Промышленные эксперименты проводились на ГУП «ЛПЗ» в период с апреля по май 2013 г. и на заводе «Электросталь» во время пуско-наладочных работ установки электрического подогрева ковшей с сентября по декабрь 2013 г. Лабораторные измерения проводились в экспериментально-исследовательской лаборатории ВНИИМЕТМАШ в октябре 2013 г.

2.6.1 Определение коэффициента черноты периклазоуглеродистой футеровки

Были проведено исследование тепловой работы ковшей на ГУП «ЛПЗ» с целью сбора данных для разработки модели. Для измерения температуры горячей стенки футеровки ковша, а также кожуха использовались инфракрасный пирометр «Кельвин-Компакт 1200» и тепловизор SDS HOTFIND LXT.

Однако при пирометрическом методе определения температуры, на основе которого работают пирометры и тепловизоры, измеряется не термодинамическая температура объекта, а радиационная. Как известно, все объекты с температурой больше 0 К излучают тепловую энергию в инфракрасном диапазоне. Величина излученной энергии характеризуется степенью черноты ε :

$$\varepsilon = E_0 / E_{\text{АЧТ}}, \quad (2.27)$$

где E_0 – энергия, излучаемая объектом; $E_{\text{АЧТ}}$ – энергия, излучаемая абсолютно черным телом (АЧТ) с той же температурой.

На основе степени черноты ε , мощности излучения $E_{\text{изл}}$ и константы Стефана-Больцмана ($\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)) температура объекта может быть определена из закона Стефана-Больцмана:

$$E_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma_0 T^4 \quad (2.28)$$

Под радиационной температурой реального тела T_p понимают температуру, при которой полная мощность АЧТ равна полной энергии излучения данного тела при действительной температуре T_d [79].

Исходя из данного определения, а также формул (2.27) и (2.28) получаем:

$$\sigma_0 T_p^4 = \varepsilon \sigma_0 T_d^4$$

Поэтому, чтобы измерить температуру объекта с помощью пирометра или тепловизора необходимо точно знать его степень черноты, иначе погрешность этих приборов будет расти пропорционально ошибке в определении степени черноты. Степень черноты определяется опытным путем. Для этого действительная температура объекта измеряется не пирометрическими методами (например, при помощи термопары), после чего замеряется радиационная температура T_p . Степень черноты высчитывается из (2.29):

$$\varepsilon = T_p^4 / T_d^4 \quad (2.29)$$

Так как значение степени черноты футеровки зависит от состояния ее поверхности, использовали два образца: образец нового периклазоуглеродистого кирпича типа МС90/10 (массовая доля MgO н.м. 82 %; С н.м. 10 %) и образец уже отработанного, ошлакованного кирпича (рис. 2.6). Масса каждого из них составляла около 200 г.



Рисунок 2.6 – Образцы огнеупоров: ошлакованного (слева) и нового (справа)

Для нагрева образцов использовалась промышленная муфельная печь СНОЛ 120/12 И1. Для измерения температуры применяли встроенную в печь термопару типа ТПР-6/30,

инфракрасный пирометр «Кельвин-Компакт 1200» и тепловизор SDS HOTFIND LXT. Измерения проводились в соответствии со следующим планом:

- 1) Оба образца помещали в холодную печь и нагревали до 773 К в течение 4 часов. При этой температуре выдерживали образцы около часа для их прогрева.
- 2) После этого дверцу печи открывали, и температуру образцов измеряли с помощью инфракрасного пирометра. Затем дверь печи закрывали, а образцы выдерживали еще в течение 30 мин при той же температуре, после чего измерения повторялись.
- 3) Измерение осуществляли третий раз, как и в п.2. Таким образом при одной и той же температуре измерения проводили три раза.
- 4) Следующим шагом был нагрев образцов до 973 К и выдержка при этой температуре в течении часа. Измерения при этой температуре повторяли еще 2 раза.
- 5) Пункты 1-3 повторялись при 1173 К.

Степень черноты определяли по формуле (2.29). Результаты измерений температуры и расчета значений интегрального коэффициента излучения приведены в табл. 2.6. Видно, что степень черноты огнеупора, покрытого слоем шлака, заметно выше, чем степень черноты нового кирпича. Это можно объяснить повышенной пористостью отработанного огнеупора, а также наличием слоя шлака.

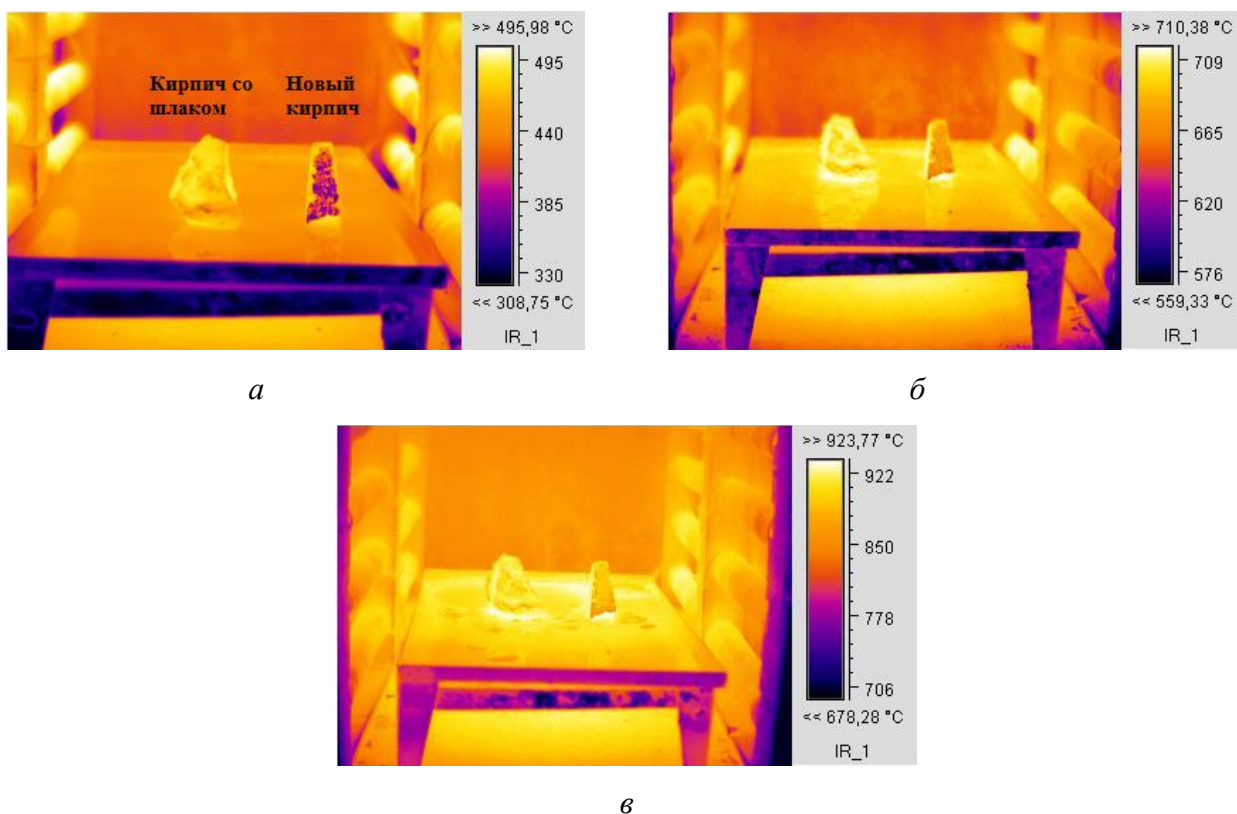


Рисунок 2.7 – Термограммы образцов после нагрева до 500 (а), 700 (б) и 900 (в) °C

Степень черноты ошлакованного огнеупора снижается с повышением температуры, что соответствует зависимостям, полученным ранее другими авторами для периклазовых огнеупоров [6]. Степень черноты нового огнеупора при повышении температуры от 500 до 700 °С повышается, а при дальнейшем увеличении температуры до 900 °С – понижается. Такой результат можно объяснить изменением оптических свойств нового огнеупора при выгорании связующего и увеличением его пористости (см. рис. 2.7).

Таблица 2.6 – Результаты измерений температуры и расчетные значения интегрального коэффициента излучения

№ замера	Температура в печи, измеренная термопарой, К	Образец ошлакованного огнеупора		Образец нового огнеупора	
		Температура по данным пирометра, К	ε_t	Температура по данным пирометра, К	ε_t
1	773	761	0,939	723	0,765
2		756	0,915	718	0,744
3		751	0,891	713	0,724
4	973	941	0,875	918	0,792
5		943	0,882	927	0,824
6		944	0,886	923	0,810
7	1173	1121	0,834	1104	0,785
8		1129	0,858	1107	0,793
9		1124	0,843	1106	0,790

Результаты измерений обрабатывались с помощью пакета «Анализ данных» Microsoft Excel. Результаты статистической обработки измерений для образца ошлакованного огнеупора представлены в табл. 2.7, а нового огнеупора – в табл. 2.8.

Таблица 2.7 – Результаты статистической обработки измерений для образца ошлакованного огнеупора

Температура, К	773	973	1173
Количество измерений	3	3	3
Среднее значение ε	0,915	0,881	0,845
Стандартное отклонение	0,024	0,006	0,012
Доверительный интервал (P=95%)	0,060	0,014	0,030

Таблица 2.8 – Результаты статистической обработки измерений для образца нового огнеупора

Температура, К	773	973	1173
Количество измерений	3	3	3
Среднее значение ε	0,744	0,809	0,789
Стандартное отклонение	0,021	0,016	0,004
Доверительный интервал (P=95%)	0,052	0,039	0,011

В графическом виде результаты расчетов представлены на рис. 2.8 и 2.9.

Из представленных результатов можно видеть, что величина погрешности измерения не превышает 7 % от среднего значения. Такая точность измерений степени черноты является удовлетворительной.

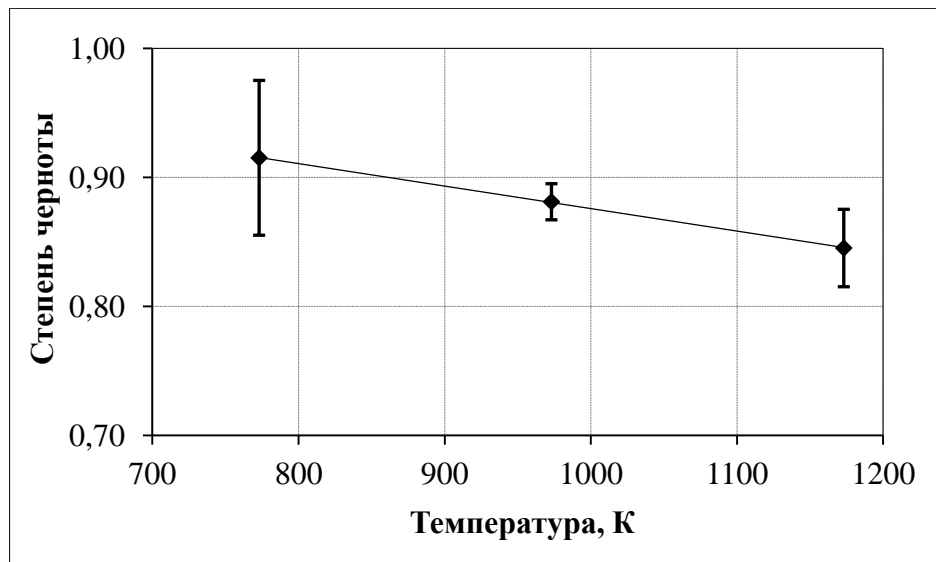


Рисунок 2.8 – Зависимость степени черноты ошлакованного огнеупора от температуры

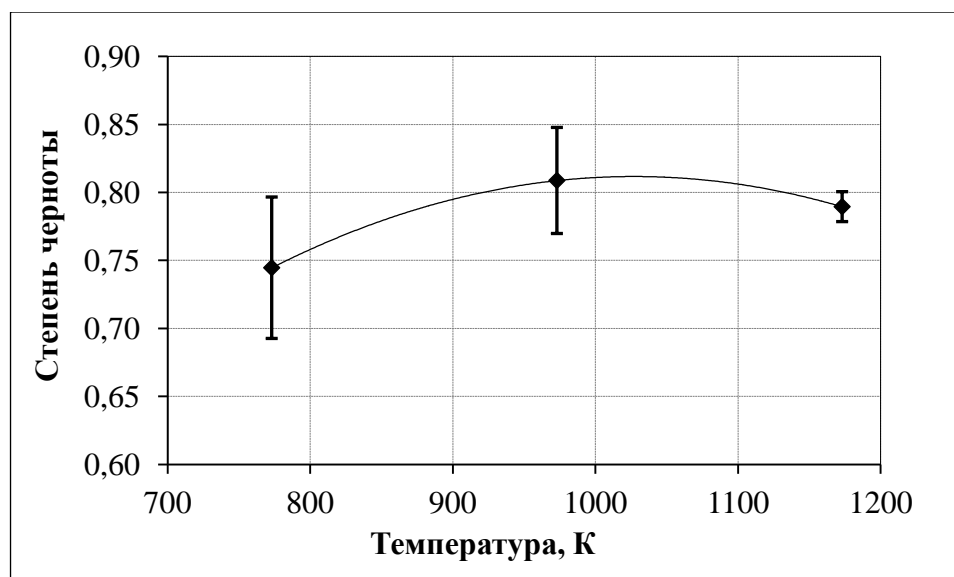


Рисунок 2.9 – Зависимость степени черноты нового огнеупора от температуры

Полученные в настоящей работе значения степени черноты для периклазоуглеродистых огнеупоров типа МС90/10 значительно превышают аналогичные величины для периклазовых огнеупоров. Так, в [6] для $T=1000^{\circ}\text{C}$ для периклаза приводятся значение степени черноты, равное 0,5. В тоже время литературные данные по степени черноты периклазовых огнеупоров

часто ошибочно используются для расчетов и измерений температуры периклазоуглеродистой футеровки как, например, в работе [61].

Относительную методическую погрешность измерения температуры δ_T при использовании неверных значений степени черноты можно рассчитать на основании формулы:

$$\delta_T = \frac{T-T'}{T} = \frac{\sqrt[4]{\varepsilon_t} - \sqrt[4]{\varepsilon'_t}}{\sqrt[4]{\varepsilon_t}} \quad (2.30)$$

где ε_t – значение степени черноты периклазоуглеродистого огнеупора; ε'_t – значение степени черноты, приведенное в литературе для периклазового огнеупора; термодинамическая температура, рассчитанная при ε_t , К; термодинамическая температура, рассчитанная при ε'_t , К.

$$\delta_T = \frac{\sqrt[4]{0,845} - \sqrt[4]{0,45}}{\sqrt[4]{0,845}} = 0,146$$

Следовательно, методическая погрешность измерения температуры ошлакованной периклазоуглеродистой футеровки при использовании значений степени черноты периклазовой футеровки составляет 15 %. За методическую погрешность измерения температуры при использовании значений степени черноты ошлакованного огнеупора, полученных в данной работе, можно принять случайную погрешность измерения степени черноты, составляющую от 2 до 7 %. Это значит, что, например, абсолютная погрешность измерения при температуре 900 °С снижается с ± 131 до ± 32 °С. Таким образом, применение полученных в настоящей работе значений степени черноты периклазоуглеродистой футеровки позволяет значительно повысить точность измерения температуры такой футеровки по сравнению с использованием данных по периклазовым огнеупорам.

2.6.2 Промышленные измерения

На ГУП «ЛПЗ» была проведена серия измерений температуры футеровки ковша в течение оборотного времени: после разлива и слива шлака, перед нагревом и после него. Длительность оборотного времени ковшей на ГУП «ЛПЗ» зависит от количества ковшей в работе. При использовании 4-х ковшей оборотное время составляет в среднем 80-100 минут. В течение этого периода сливается шлак, ковш очищается и подготавливается к следующей плавке (10-30 мин), а затем ставится на подогрев (30-40 мин). После подогрева, за 10-20 минут до выпуска ковш ставится под ДСП. При 3х-ковшовой схеме работы длительность оборотного времени составляет примерно 40-60 минут. В таком случае ковш не подогревают, а сразу после 10-30 минутной подготовки ставят под ДСП за 10-20 минут до выпуска, в зависимости от занятости мостовых кранов.

Средняя температура футеровки ковша после разливки для обеих схем примерно одинакова и составляет 1050-1100 °С (рис. 2.10). За время подготовки к следующей плавке ковш теряет примерно 50-100 °С и ставится на подогрев с температурой 950-1000 °С. Температура футеровки после подогрева практически не изменяется, а может и уменьшится до 900-950 °С, что можно объяснить низкой эффективностью пламенных горелок, используемых на стендах подогрева. В связи с занятостью мостовых кранов ковши отдаются под выпуск плавки за 10-20 минут до начала выпуска. В это время футеровка ковша быстро охлаждается со скоростью примерно 3-5 °С/мин в зависимости от начальной температуры. Таким образом, температура футеровки ковша перед выпуском при 4-х ковшовой схеме колеблется в интервале от 800 до 900 °С.

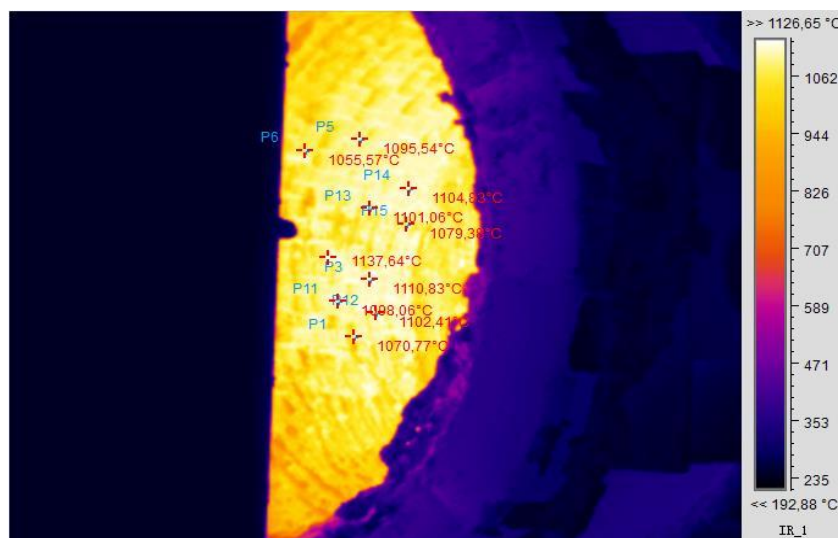


Рисунок 2.10 – Термограмма оборотного ковша после слива шлака

Работа на 3-х ковшах исключает возможность подогрева футеровки, но также снижает длительность оборотного времени, поэтому ковши приходят под выпуск с более высокой температурой футеровки, равной около 950-1000 °С. Однако из-за преждевременной установки ковшей под выпуск, связанной с загруженностью кранов и нестабильностью работы печи, футеровка быстро охлаждается и ко времени выпуска составляет в среднем 850-900 °С (рис. 2.11).

Свежезафутерованные ковши, а также ковши после продолжительного простоя подвергаются длительному предварительному подогреву. Такие ковши приходят под выпуск с заметно меньшей температурой, чем оборотные. Так, средняя температура футеровки для ковшей, оборотное время которых превышало 3 часа составляет 700-750 °С. На рис. 2.12 показана термограмма футеровки нового ковша, который подогревался на стенде в течение более 8-ми часов. Видно, что средняя температура футеровки не превышает 800-850 °С, что подтверждает предположение о низкой эффективности горизонтальных стендов подогрева на

заводе. Из этих данных можно сделать вывод, что максимальная температура нагрева футеровки, достигаемая на стендах подогрева на ГУП «ЛПЗ» составляет около 850-900 °С при требуемой в ВТИ 70067945-ЭСПЦ-11-2006 величине в 1100-1200 °С.

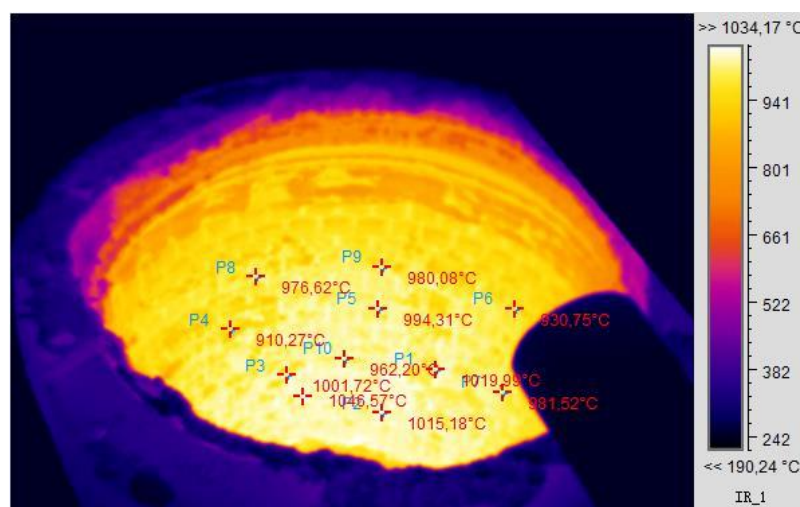


Рисунок 2.11 – Термограмма футеровки оборотного ковша перед выпуском

Результаты этого исследования, такие как средние продолжительности отдельных этапов работы ковшей, их тепловое состояние и т.д. были использованы для адаптации тепловых моделей к условиям ГУП «ЛПЗ», а также их верификации.

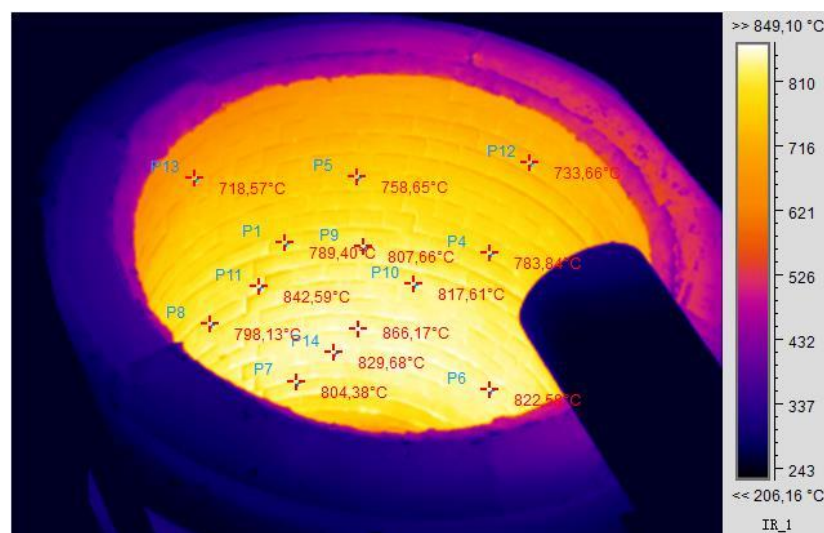


Рисунок 2.12 – Термограмма футеровки нового ковша перед выпуском

2.7 Верификация модели

2.7.1 Верификация субмодели электрического нагрева ковшей

Адекватность модели электрического нагрева ковшей проверялась на единственной в России установке электрического подогрева ковшей в СПЦ-2 завода «Электросталь» (рис. 2.13). На установке осуществляется сушка и подогрев 20-т ковшей. Схема футеровки ковша, а также его габаритные размеры приведены в приложении А. Ковши завода Электросталь несколько отличаются от ковшей ГУП «ЛПЗ», поэтому в ранее разработанной модели электрического подогрева ковшей была изменена 3-D модель ковша. Кроме того, на момент проведения эксперимента установка электронагрева ковшей на заводе «Электросталь» находилась в стадии пуско-наладки, поэтому нагрев проводился на 50 % мощности. По этой причине температура нагревателей не превышала 1000 °С (рис. 2.14). Эта температура нагревателей и была использована в качестве граничного условия при моделировании.

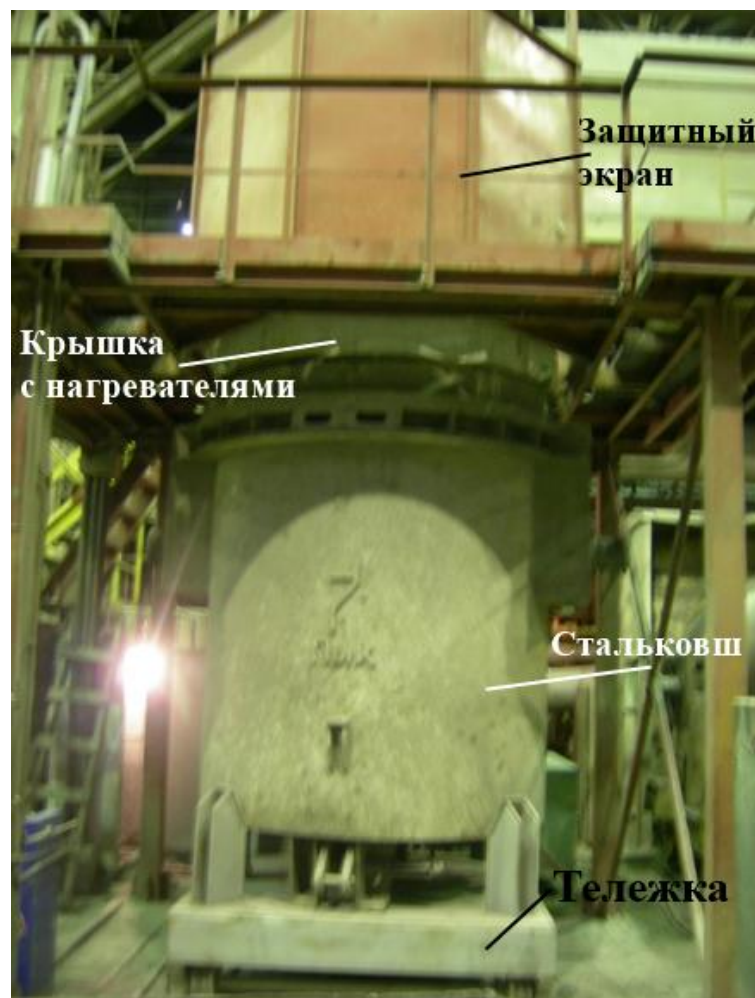


Рисунок 2.13 – Общий вид установки электрического подогрева футеровки на заводе «Электросталь»



Рисунок 2.14 – Термограмма нагревателей

В ходе эксперимента холодный ковш в течение 180 минут подогревался на установке электронагрева, после чего температура его горячей стенки измерялась инфракрасным тепловизором. Термограммы горячей стенки футеровки после нагрева приведены на рис. 2.15, *а*. С помощью модели подогрева ковша электрическими нагревателями было рассчитано тепловое состояние футеровки ковша после 180-минутного подогрева. На рис. 2.15, *б* приведена расчетная термограмма поверхности горячей стенки футеровки.

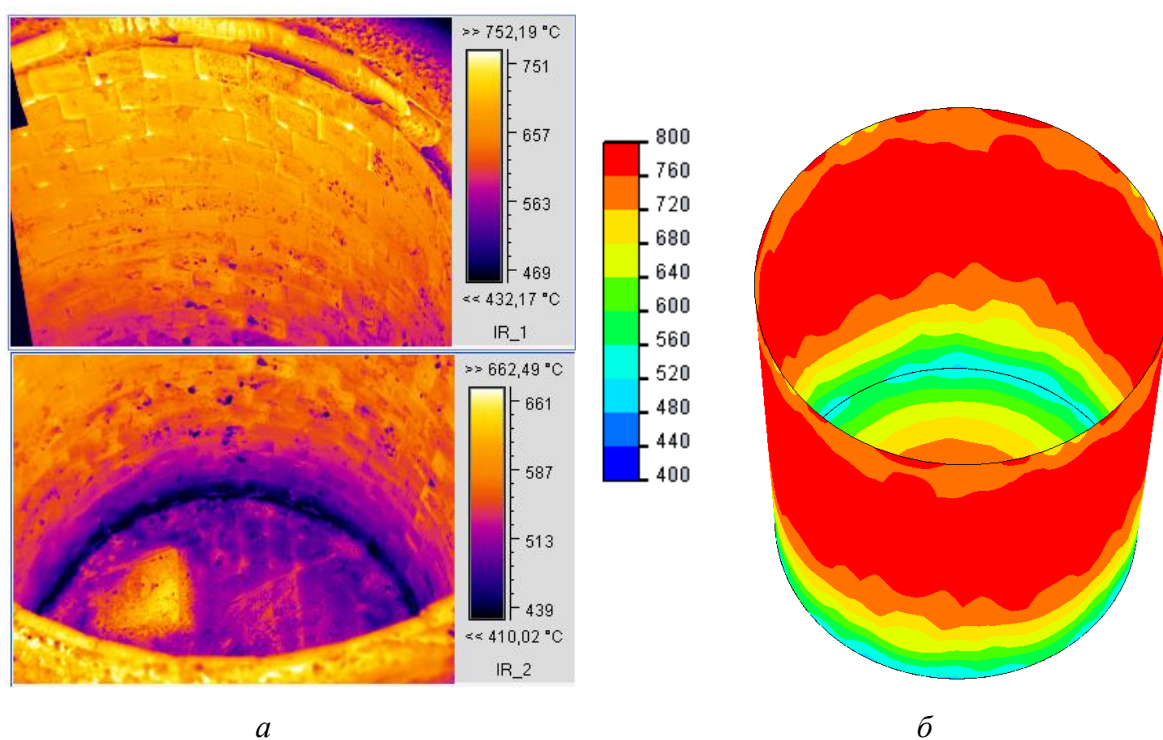


Рисунок 2.15 – Измеренная (*а*) и расчетная (*б*) термограммы горячей футеровки ковша после подогрева

Если сравнивать расчетную и реальную термограммы, видно, что расчетная средняя температура верхней части стенки (750–800 °С) несколько выше реальной (720–750 °С). Это можно объяснить тем, что за то время, пока поднималась крышка и ковш выкатывался из-под стенда подогрева, футеровка могла немного остыть. Средняя расчетная температура днища составляет 657 °С, а реальная – около 550–600 °С. В целом можно сделать вывод, что модель электрического подогрева с относительно высокой для такого сложного процесса точностью описывает нагрев футеровки стальной ковша, а значит данную модель можно использовать для прогнозирования распределения температуры в футеровке СК.

2.7.2 Верификация субмодели подогрева ковша газовыми горелками

Модель подогрева ковша газоздушнoй горелкой проверялась по результатам исследования тепловой работы ковшей на ГУП «ЛПЗ». Нагрев ковшей там осуществляется пламенной горелкой фирмы «KromSchroeder» марки ZIO200RB-50/35-(20)D. Т.к. на заводе не было возможности устанавливать термопары в футеровку ковша, производились замеры температуры только непосредственно перед и после подогрева с помощью пирометра и тепловизора. Ковш со средней температурой стенки, равной около 950-1000 °С нагревался на стенде высокотемпературного подогрева в течение 30 минут. Затем ковш кантовался и ставился на стенд очистки, где была замерена температура горячей стенки (рис. 2.16, а). Был смоделирован 30-минутный подогрев ковша с начальной средней температурой стенки равной 975 °С. Расчетная термограмма горячей стенки ковша после подогрева приведена на рис. 2.16, б. Если сравнить термограммы, то видно, что реальная средняя температура ковша составляет около 1050 °С, в то время как средняя расчетная температура – около 1100 °С. Разницу можно объяснить тем, что за время транспортировки и кантовки горячая стенка успевает остыть на 50–100 °С. Таким образом, расчетные данные хорошо согласуются с измеренными, учитывая сложность моделируемого процесса и сделанные допущения, а значит модель подогрева ковшей газоздушными горелками можно использовать для прогнозирования теплового состояния футеровки ковша.

Адекватность модели подогрева ковшей газокислородной горелкой проверялась только по литературным данным, т.к. такой подогрев не используется ни на одном отечественном заводе. Поэтому с помощью модели повторили эксперимент, описанный в работе [17]. Ковш с начальной температурой футеровки и кожуха, приведенной на рис. 2.17, а подогревался газокислородной горелкой в течении 3 часов. Конечная температуры футеровки и кожуха приведены на рис. 2.17, б. Размеры ковша, используемого в этом эксперименте (диаметр 2700 мм, высота 2900 мм), мало отличается от ковшей, используемых на ГУП «ЛПЗ» (2400 и 2500

мм), поэтому моделирование проводили на ковшах «ЛПЗ». Результаты приведены на рис. 2.18. Видно, что средняя расчетная температура стенки ковша составляет около 1000 °С, что соответствует реальным замерам (986 °С). Расчетная температура днища (915 °С) немного ниже реальной (994 °С), что возможно объясняется более длинным факелом газокислородной горелки. Расчетная температура кожуха ковша (120–180 °С) заметно ниже, чем реальная (170–220 °С), что скорее всего связано с различиями в толщине футеровки экспериментального ковша и ковша ГУП «ЛПЗ». По полученным результатам можно сделать вывод, что модель газокислородного подогрева ковшей адекватно описывает процесс нагрева и может быть использована для дальнейших исследований.

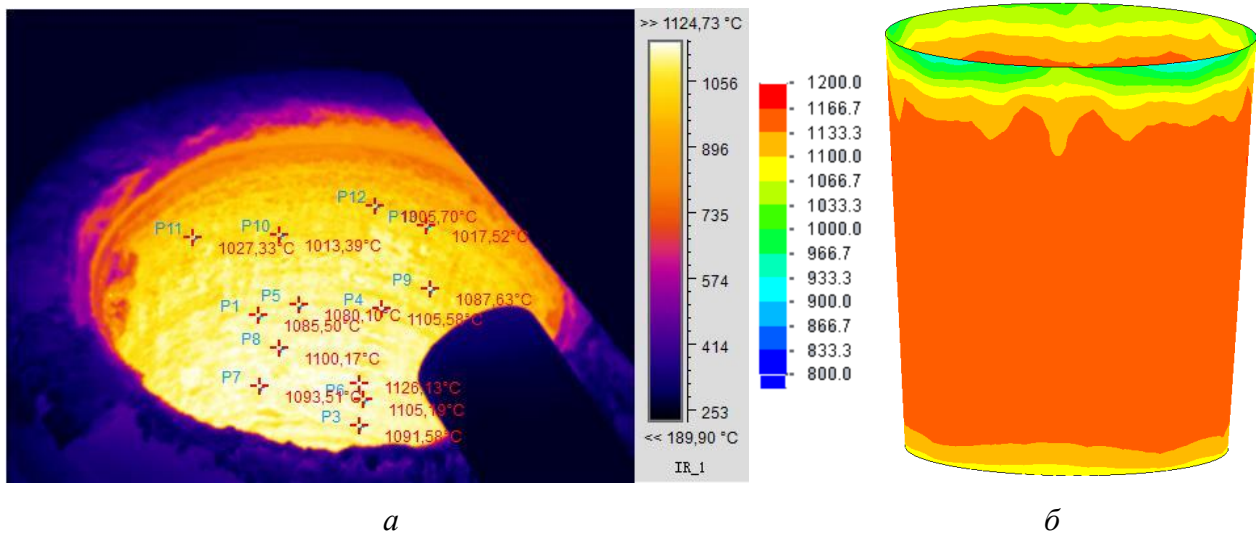


Рисунок 2.16 – Измеренная (а) и расчетная (б) термограммы горячей футеровки ковша после подогрева

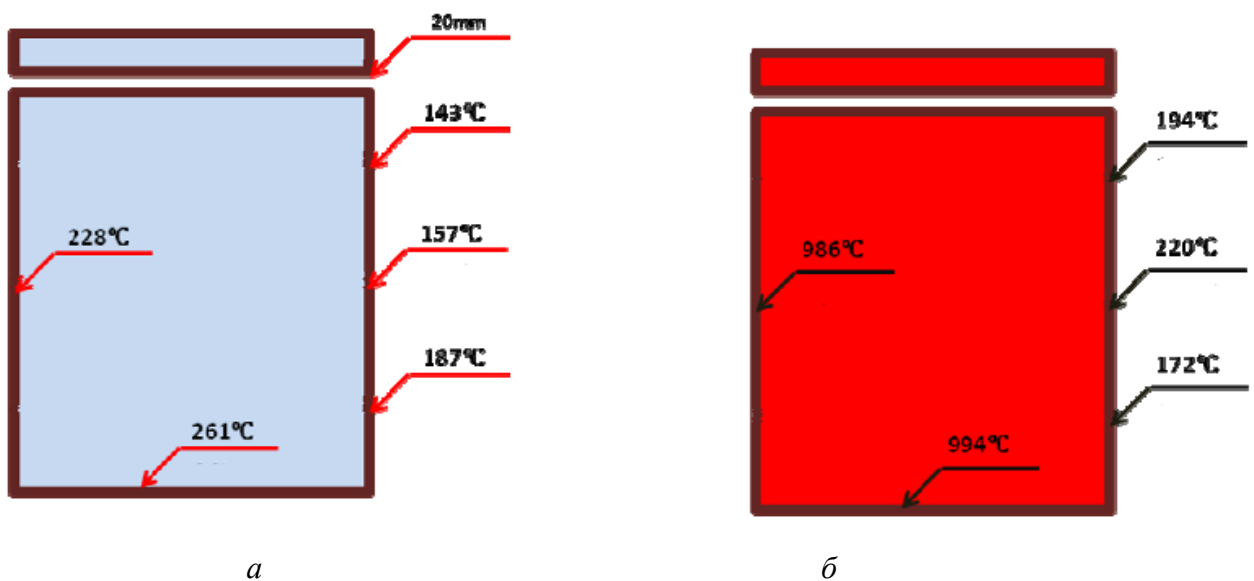


Рисунок 2.17 – Температура футеровки и кожуха ковша до (а) и после (б) подогрева ТКГ [17]

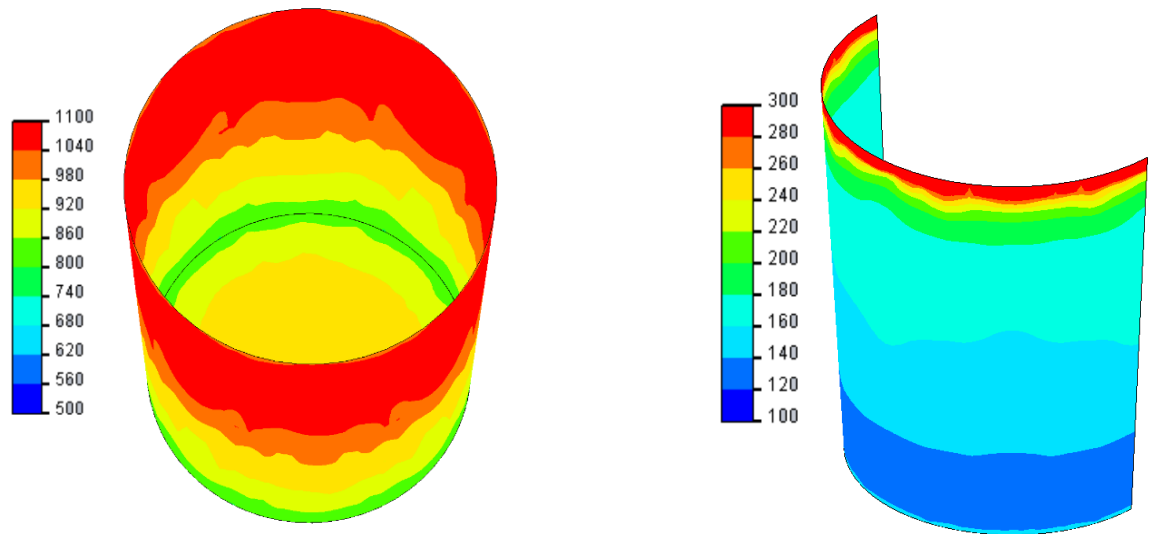


Рисунок 2.18 – Расчетная температура футеровки (справа) и кожуха (слева) ковша после подогрева ТКГ

2.7.3 Верификация субмодели охлаждения пустого ковша

Для проверки адекватности модели охлаждения пустого ковша были проведены измерения температуры футеровки ковша после разливки. Ковш после окончания разливки еще около 15 минут находится на поворотном столе МНЛЗ, накрытый крышкой. Очевидно, что в это время измерять температуру его футеровки с помощью ручного пирометра невозможно. Однако футеровка накрытого крышкой ковша охлаждается очень медленно и по предварительным расчетам за 15 минут остывает примерно на 15-20 °С. Поэтому хронометраж охлаждения ковша начинали с момента снятия с него крышки. После этого ковш снимается с поворотного стола, из него сливаются остатки металла и шлак, и ковш устанавливается на стенд подготовки, где можно измерять температуру его футеровки. Экспериментальные точки были нанесены на расчетный график охлаждения ковша, полученный с помощью модели (рис. 2.19). Видно, что экспериментальные точки хорошо согласуются с расчетной кривой охлаждения, что подтверждается высоким коэффициентом детерминации R^2 . Полученные результаты доказывают высокую точность модели охлаждения пустого ковша, даже не смотря на допущение о квазистационарном состоянии футеровки ковша перед разливкой.

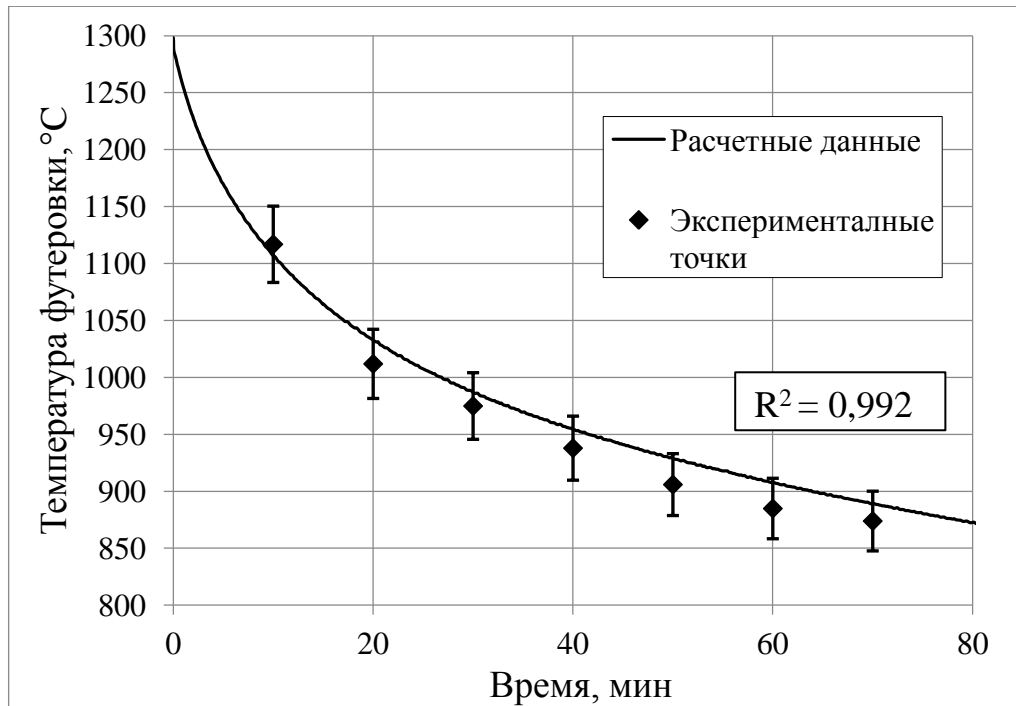


Рисунок 2.19 – Охлаждение горячей стенки футеровки ковша после разливки

2.7.4 Верификация субмодели охлаждения металла в ковше

Как уже было отмечено, в модели охлаждения стали в ковше не учитываются тепловые потери струи металла на выпуске и потери за счет добавки в ковш легирующих материалов и раскислителей. Чтобы оценить эти потери на ГУП «ЛПЗ» проводились измерения температуры металла в ковше сразу после выпуска из ДСП.

Замеры проводились непосредственно после выпуска полупродукта из ДСП, с выдвижной платформы. Т. к. заводские средства измерения в этом месте применить невозможно из-за их ограниченного радиуса действия, использовался измерительный прибор «Сталь-4», предназначенный для измерения реальной температуры металлов, измерения э.д.с. датчиков активности кислорода и т.д. Измерение температуры осуществлялось при помощи термопреобразователя ТПР-91 (рис. 2.20). Он включает в себя жезл для погружения в расплавленный металл сменного пакета (термоэлектрического преобразователя) с контактодержателем и сам сменный пакет. Пакет состоит из головки термопреобразователя и бумажной гильзы. В кварцевой трубке головки термопреобразователя находится чувствительный элемент (ЧЭ). В пакетах ПТПП используется ЧЭ платинородий-платинородий. Технические характеристики термопреобразователя приведены в табл. 2.9.

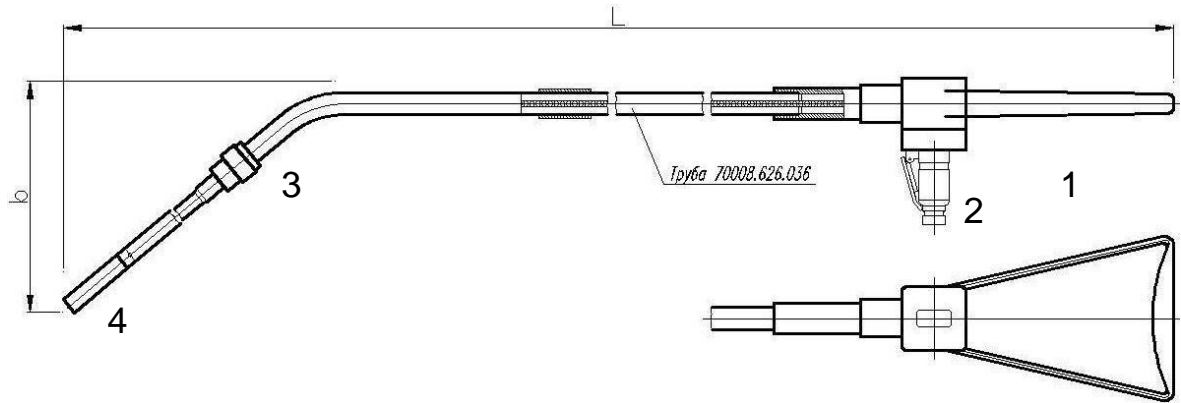


Рисунок 2.20 – ТПР-91: 1- рукоятка; 2 – разъем; 3 – консоль; 4 – пакет.

Замеры были проведены на 5 плавках. В табл. 2.10 приведены результаты этих измерений. Т.к. на плавках 131718 и 131719 в ковш помимо ферросплавов было дополнительно добавлено 60 и 85 кг извести соответственно, что по расчетам дополнительно снизило температуру на 5-7 °С, то в целом видно, что на выпуске теряется около 35-38 °С вне зависимости (или с минимальной зависимостью) от начальной температуры футеровки. Исключая эти плавки, как выбросы, получаем среднюю величину падения температуры на выпуске – 36 °С. Так как за время выпуска металл теряет тепло также за счет его аккумуляции футеровкой ковша, а также потерь излучением с зеркала металла, то провели моделирование охлаждения стали в ковше за первые 3 минуты при подобной температуре футеровки. Расчетное падение температуры составило 15 °С. Допустим, что нагрев и плавление ферросплавов, а значит и тепловые потери на эти процессы, происходят в течение периода выпуска. Значит, потери из-за излучения струи металла, нагрева и плавления легирующих составляет $36 - 15 = 21$ °С. На эту величину повышали потери температуры при определении адекватности модели охлаждения.

Таблица 2.9 – Технические характеристики ТПР-91

Пределы измерения, °С	300...1820
Режим работы	Режим непрерывных измерений. Режим определения площадок температуры
Период измерений	20 мс (50 отсчетов в секунду)
Базовая погрешность	± 1 °С
Питание	Напряжение переменного тока (220 \pm 44) В
Цифровой выход	RS485

Следующим этапом работы было определение адекватности субмодели охлаждения металла в стальковше. Для определения среднего падения температуры полупродукта в ковше во время выдержки перед обработкой на АКП были проведены серии измерений. Температура замерялась в ДСП непосредственно перед выпуском и сразу после установки ковша под

крышку АКП. Измерения были проведены на 25 плавках. После первичной статистической обработки и удаления выбросов осталось 22 плавки.

Таблица 2.10 – Результаты замеров температуры (°C) после выпуска

№ плавки	Т на выпуске из ДСП	Т футеровки	Т после выпуска		ΔТ
131716	1637	750-800	1602	-	35
131717	1650	800-850	1612	-	38
131718	1647	750-800	1601	1601	46
131719	1715	1000-1050	1666	1666	49
131721	1663	900-950	1626	-	37

Результаты измерений были разделены на 3 группы в зависимости от начальной температуры футеровки ковша: 806 ± 28 °C, 914 ± 24 °C и 1000 ± 35 °C (табл. 2.11). Затем при помощи модели были рассчитаны кривые охлаждения металла в ковше при данных начальных температурах футеровки. Кривые охлаждения с нанесенными на них экспериментальными точками приведены на рис. 2.21.

Таблица 2.11 – Результаты экспериментальных измерений температуры металла и футеровки (°C)

Группа	№ плавки	Т _{АКП}	Т _{ДСП}	Выдержка перед АКП, мин	Т _{фут}	ΔТ
1	131716	1523	1650	62	775	127
	131718	1522	1660	48	775	120
	132005	1527	1622	38	800	95
	131717	1524	1643	56	825	119
	132004	1555	1638	27	825	83
2	132030	1552	1640	26	835	88
	131720	1615	1674	6	875	59
	132007	1537	1615	31	875	78
	132011	1518	1615	37	875	97
	131721	1592	1663	9	925	71
	131722	1599	1660	9	925	61
	132010	1541	1640	37	925	99
	132034	1566	1615	6	925	49
	132008	1524	1624	46	950	100
	132035	1526	1611	32	950	85
3	132009	1538	1613	39	975	75
	132032	1588	1627	9	975	39
	132036	1547	1614	21	975	67
	132033	1580	1616	7	975	36
	132006	1535	1611	38	1000	76

Группа	№ плавки	$T_{\text{АКП}}$	$T_{\text{ДСП}}$	Выдержка перед АКП, мин	$T_{\text{фут}}$	ΔT
	132031	1548	1608	9	1025	60
	132029	1562	1625	16	975	63

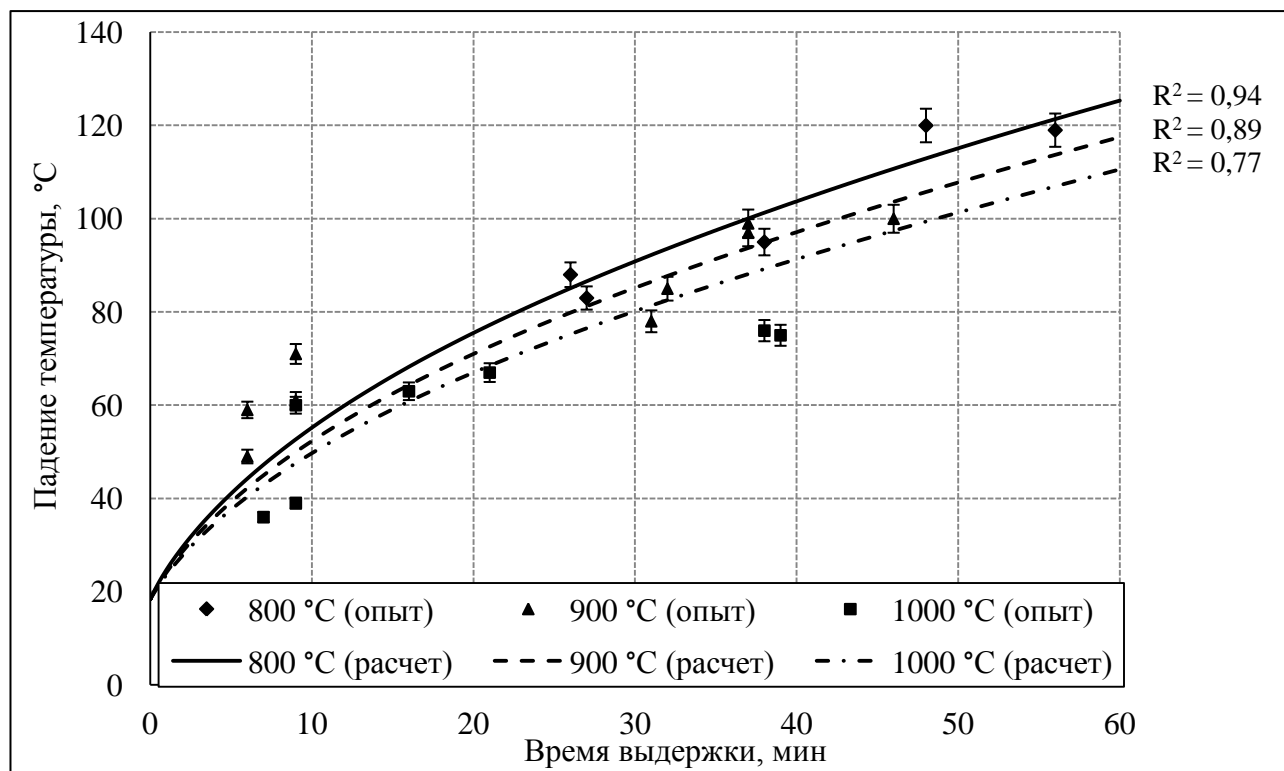


Рисунок 2.21 – Проверка адекватности субмодели охлаждения металла в ковше

Из рисунка видно, что падение температуры металла в ковше действительно сильно зависит от начальной температуры его футеровки, причем со временем эта зависимость усиливается. Большой разброс точек в левой части графика, т.е. в области кратковременной выдержки можно объяснить различным количеством добавленных в ковш ферросплавов и шлакообразующих, а также приближенным описанием падения температуры на выпуске. Все результаты имеют коэффициенты детерминации R^2 , превышающие 0,7, что доказывает хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных. Пониженная точность результатов при температуре футеровки 900 °C возможно связана с достаточно высокой ошибкой пирометрического измерения температуры, а также малым количеством точек в этом интервале температур футеровки. В целом, расчетные значения можно считать удовлетворительными, учитывая сложность моделирования.

ГЛАВА 3 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ МЕТАЛЛА В КОВШЕ

3.1. Влияние температуры металла на выпуске

Температура металла на выпуске из ДСП в основном зависит от наличия АКП и времени выдержки металла в ковше и поэтому меняется от плавки к плавке. Например, на ГУП «ЛПЗ», из-за того, что время выплавки превышает время разливки, первые плавки в серии выдерживаются в ковше достаточно долгое время, чтобы накопить несколько плавков и начать разливку. Поэтому температура выпуска таких плавков примерно на 30-60 °С выше, чем у следующих плавков и составляет 1650-1680, а иногда и 1700 °С. На остальных плавках температура выпуска колеблется от 1615 до 1640 °С.

Было проведено моделирование охлаждения стали в ковше во время выдержки при различной температуре на выпуске (начальная температура металла) с целью определения ее влияния на скорость охлаждения (рис. 3.1).

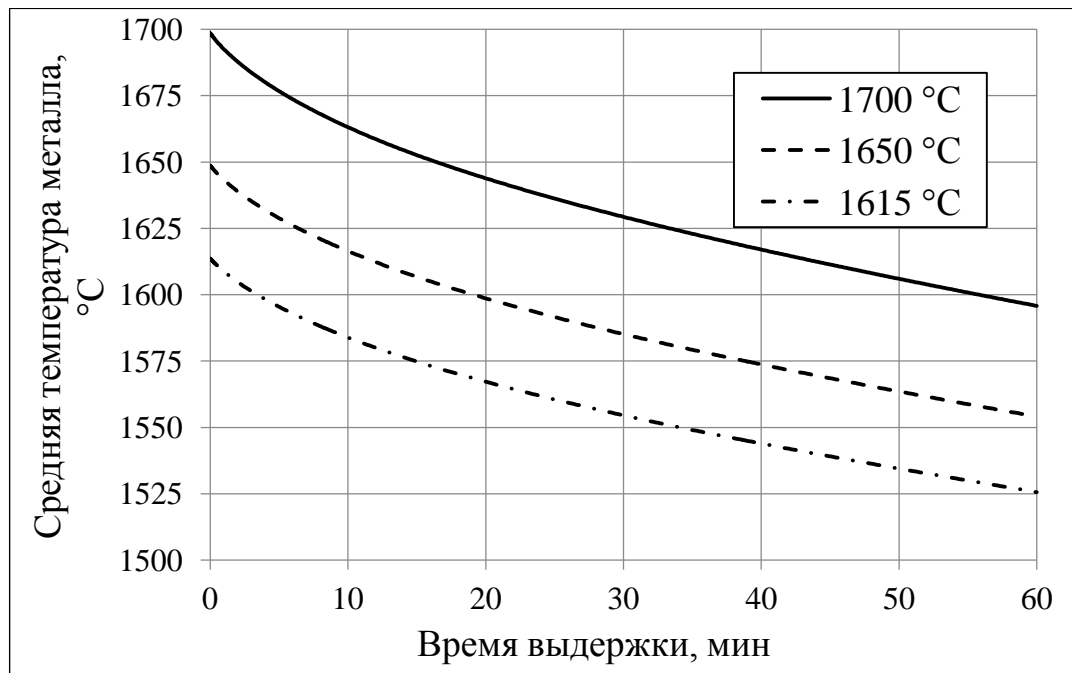


Рисунок 3.1 – Зависимость снижения температуры металла во время выдержки в ковше от температуры выпуска из ДСП

Видно, что характер кривых в зависимости от температуры не меняется, однако, падение температуры увеличивается по мере роста начальной температуры: при 1615 °С оно составляет 88,04 °С, при 1650 °С – 94,49 °С, а при 1700 °С – 102,75 °С. Такая зависимость объясняется тем,

что градиенты температур между металлом/футеровкой и металлом/окружающей средой, от которых зависит потери тепла конвекцией и излучением выше при более высокой начальной температуре. Таким образом, большой перегрев металла в плавильном агрегате не только приводит к затратам электрической и других видов энергии и повышению угара металла, но и приводит к дополнительным тепловым потерям уже во время ковшовой обработки. Авторы [61] также определяли влияние начальной температуры металла на падение температуры в ковше, однако в их работе разница между падением температуры при 1700 °С и при 1640 °С составила всего 3 °С, в то время как в настоящей работе – около 9 °С. Скорее всего это связано с тем, что в работе [61] моделировались потери металла в 160-тонном ковше, удельная поверхность которого в несколько раз меньше, чем у 30-тонного ковша, используемого в настоящей работе. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в ковшах малой вместимости перегрев металла приводит к значительным тепловым потерям.

3.2. Исследование влияния типа и толщины футеровки на тепловые потери металла в ковше

3.2.1 Влияние толщины рабочего слоя

В течение эксплуатации сталковша рабочий слой его футеровки подвергается различным физическим и химическим воздействиям (эрозия, разъедание шлаком и т.д.), вследствие чего со временем его толщина заметно сокращается. Уменьшение толщины футеровки должно повышать теплопередачу между горячей стенкой футеровки и кожухом ковша, что может привести к увеличению тепловых потерь металла в ковше. С другой стороны, уменьшение объема теплоемкой футеровки должно снизить тепловые потери на аккумуляцию ею тепла горячего металла. Была поставлена задача определить влияние толщины футеровки рабочего слоя футеровки на тепловые потери металла в ковше.

По данным, полученным на ГУП «ЛПЗ» стойкость периклазоуглеродистых (ПУ) огнеупоров рабочего слоя сталковшей составляет 50-70 плавов. Критерием вывода ковша из оборота является остаточная толщина рабочего слоя, минимальная величина которой должна быть не менее 60 мм. Исходя из этого, толщина рабочего слоя была разделена на максимальную (180 мм), среднюю (120 мм) и минимальную (60 мм). Для этих значений проводилось моделирование часового охлаждения ковша с последующей часовой выдержкой металла в нем. Результаты приведены на рис. 3.2.

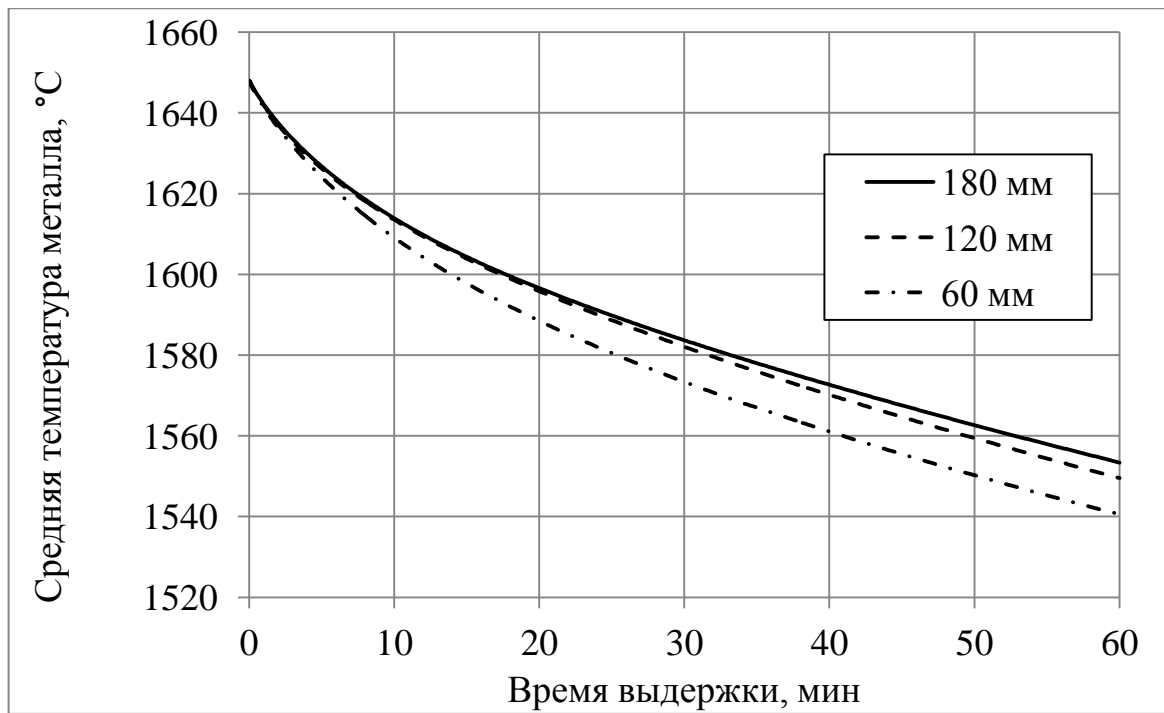


Рисунок 3.2 - Зависимость тепловых потерь металла в ковше от толщины рабочего слоя футеровки

Как видно, при максимальной и средней толщине футеровки рабочего слоя тепловые потери металла практически равны (95 и 98 °C/ч соответственно). В то же время, при минимальной толщине рабочих огнеупоров потери заметно увеличиваются и составляют уже 107 °C/ч. Это объясняется тем, что в средней ситуации повышение тепловых потерь теплопроводностью из-за уменьшения толщины футеровки нивелируются снижением потерь на повышение ее теплосодержания. При дальнейшем снижении толщины футеровки потери теплопроводностью начинают преобладать и поэтому скорость охлаждения стали увеличивается.

Другим объяснением резкого увеличения скорости охлаждения при минимальной толщине огнеупоров рабочего слоя может быть как раз их малое теплосодержание. Если при максимальной и средней толщине рабочего слоя футеровка за время охлаждения не успевает остыть полностью, и внутренние слои сохраняют тепло, то при минимальной толщине рабочий слой охлаждается гораздо сильнее, что можно увидеть на термограммах распределения температуры по слоям футеровки ковша после охлаждения (рис. 3.3). В любом случае, по результатам моделирования можно сделать вывод, что толщина рабочего слоя футеровки сталковша начинает заметно влиять на скорость охлаждения металла в нем только при снижении до 50-60 мм. Авторы работы [61] также проводили исследование влияния толщины футеровки на тепловые потери металла в 160-т ковше, и тоже не выявили значительных изменений температуры металла.

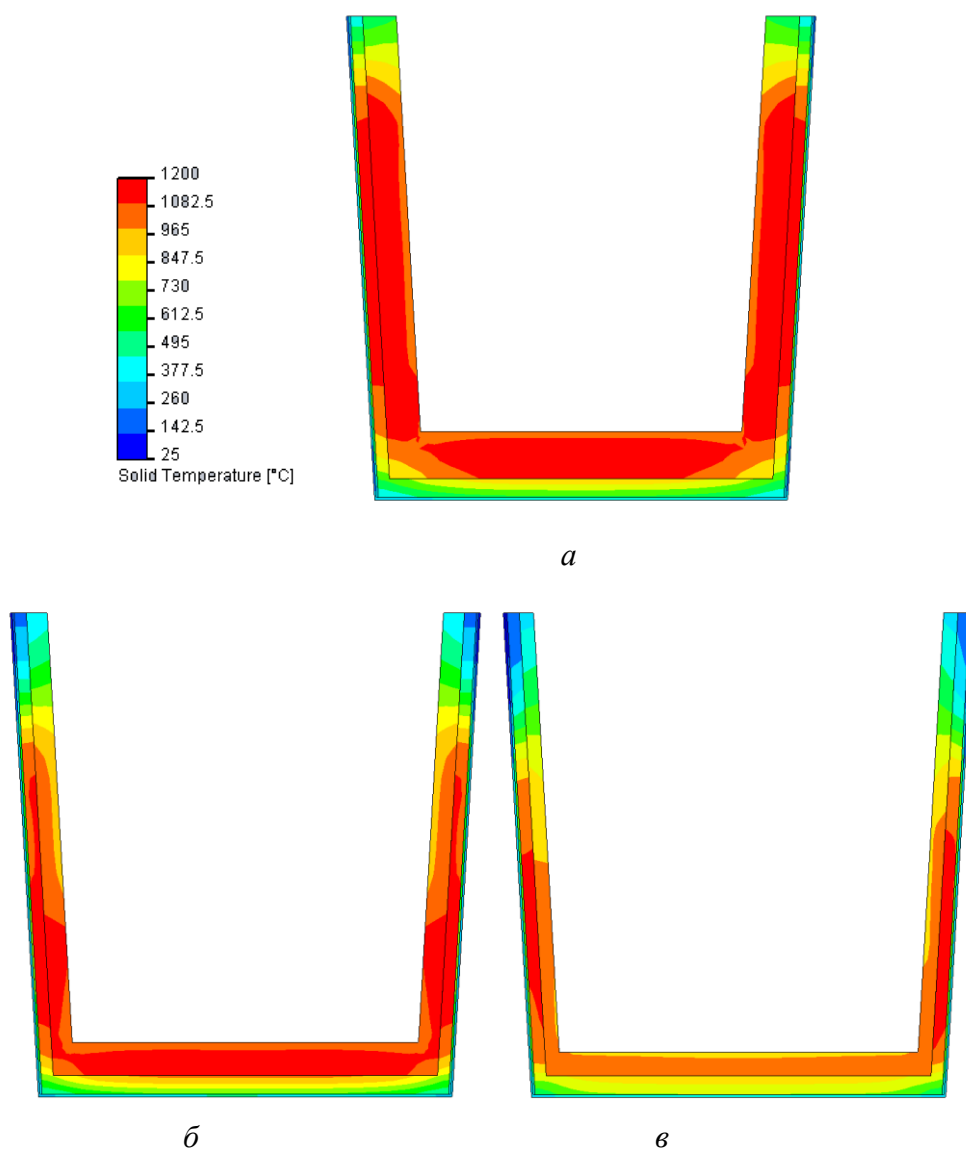


Рисунок 3.3 – Расчетные термограммы футеровки ковша после охлаждения. Толщина футеровки:

a – 180 мм; $б$ – 120 мм; $в$ – 60 мм

3.2.2 Влияние типа огнеупора

Таким образом, можно предположить, что на тепловые потери металла в ковше больше влияют теплофизические свойства огнеупоров, а именно теплопроводность и теплоемкость, чем их толщина. Поэтому было предложено смоделировать охлаждение стали в ковше, футерованном доломитовыми изделиями, а также высокоглиноземным огнеупорным бетоном имеющими более низкие показатели теплопроводности и теплоемкости, чем ПУ изделия (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Теплофизические свойства огнеупоров

Тип огнеупора	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, (кг/м ³)
Периклазоуглерод	5,5-9,5	1300	2900-3100
Доломит	2,8-4,0	1030	2860
Высокоглиноземистый бетон	2,11-3,2	1100	3050

Результаты моделирования представлены на рис. 3.4. Как и предполагалось, тепловые потери стали при использовании доломитовых огнеупоров снизились на 15 %, с 2,23 до 1,91 ГДж по сравнению с периклазоуглеродистой футеровкой. Потери тепла при моделировании монолитной бетонной футеровки снизились до 1,78 ГДж (на 20 %). Благодаря относительно низкой теплопроводности и теплоемкости доломитовая и глиноземистая футеровки аккумулируют меньше тепла горячего металла, что и приводит к снижению тепловых потерь. Тем не менее, MgO-C огнеупоры имеют ряд несомненных преимуществ, а именно их повышенная прочность и устойчивость к действию шлаков. Таким образом, прежде чем рекомендовать предприятию замену широко используемых периклазоуглеродистых изделий, необходимо рассчитать экономическую эффективность такой замены. В работе [80] приводятся сравнительные данные о стойкости доломитовых и периклазоуглеродистых огнеупоров. Так, на заводе ООО «Электросталь» (г.Курахово, Украина) стойкость 50-т ковшей, футерованных доломитовыми огнеупорами, составляет 71,2 плавки, что всего на 15 % ниже стойкости периклазоуглеродистой футеровки на том же заводе. Однако, несмотря на снижение стойкости сталеразливочных ковшей при работе на доломитовых огнеупорах расчет удельных затрат, проведенный авторами [80] показывает, что использование доломитовых огнеупоров экономически целесообразно. Так удельные затраты при эксплуатации сталеразливочных ковшей с доломитовой футеровкой, в среднем, составляет 1,91 €/т готового металла, а сталеразливочных ковшей с периклазоуглеродистой футеровкой, соответственно – 2,24 €/т готового металла. Стойкость высокоглиноземистой монолитной футеровки на заводе ООО «Электросталь», по данным компании «Кералит», составляет более 100 плавков (максимум – 123 плавки), при этом удельные затраты равняются 2,13 €/т.

Таким образом, замена периклазоуглеродистой футеровки на доломитовую или на современные монолитные футеровки даст возможность экономить до 6 кВт·ч электроэнергии на тонну стали, что эквивалентно 18 руб/т стали за счет снижения перегрева металла в ДСП, не считая выгоды от снижения удельных затрат на огнеупорные материалы.

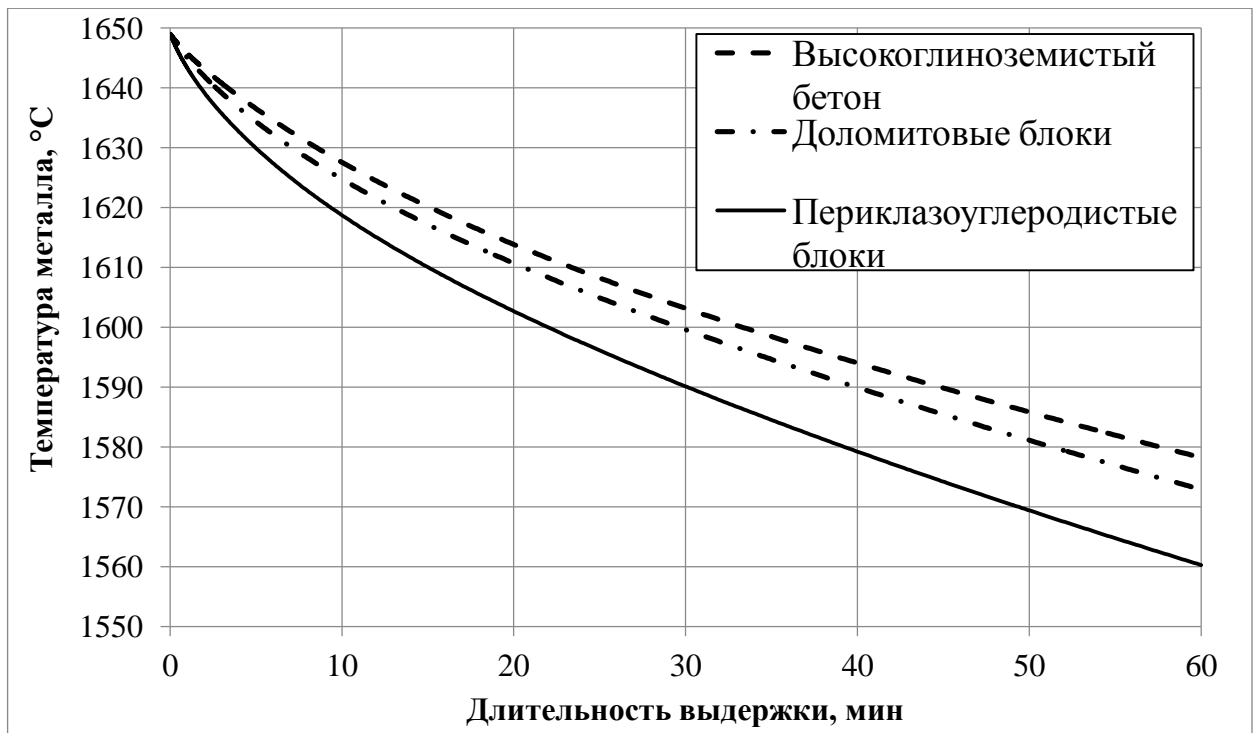


Рисунок 3.4 – Зависимость тепловых потерь металла в ковше от типа футеровки рабочего слоя

3.2.3 Влияние теплоизоляционного слоя

Теплоизоляционный слой футеровки сталеразливочного ковша служит для снижения тепловых потерь металла через футеровку. Кроме того, он препятствует чрезмерному нагреву кожуха ковша, что предотвращает его коробление и прогары. Можно предположить, что увеличение толщины теплоизоляционного слоя позволит уменьшить тепловые потери металла в ковше, а также снизить температуру кожуха. Для проверки этого предположения была дополнительно построена модель 30-тонного ковша ГУП «ЛПЗ» с увеличенным теплоизоляционным слоем (до 20 мм). Затем, используя описанную в гл. 2 модель был проведен расчет сначала часового охлаждения пустого ковша с последующей часовой выдержкой металла в нем. Несмотря на то, что толщина теплоизоляционного слоя увеличилась в два раза, моделирование показало, что температурные потери стали в ковше при часовой выдержке уменьшились только на 3 °C. Это можно объяснить тем, что, как показано выше, большая часть тепловых потерь металла в ковше после выпуска составляют потери на нагрев футеровки рабочего слоя ковша, состоящего из периклазоуглеродистых огнеупоров, имеющих высокую теплопроводность и теплоемкость, и потери излучением с поверхности металла. Увеличение толщины теплоизоляционного слоя приводит к снижению температуры кожуха, что в свою очередь приводит к тому, что тепловой поток излучением и конвекцией с поверхности кожуха снижается с 5,1 до 3,5 кВт/м². Для сравнения, мощность тепловых потерь излучением с поверхности шлака, не зависящая от толщины теплоизоляционного слоя, для обоих случаев

составляют в среднем 60-80 кВт/м², а значит снижение тепловых потерь излучением и конвекцией от кожуха ковша благодаря увеличению теплоизоляционного слоя на общие тепловые потери металла в ковше влияют слабо.

Таким образом, влияние увеличения теплоизоляционного слоя на тепловые потери металла в ковше можно считать незначительным по сравнению с общими потерями. Тем не менее, максимальная температура кожуха при утеплении футеровки ковша снижается с 310 до 250 °С, что должно увеличить срок эксплуатации стальной ковша и снизить риск прогара кожуха.

3.3. Исследование влияния межплавочного простоя на скорость охлаждения металла в ковше.

Как уже отмечалось, начальное тепловое состояние футеровки ковша – один из главных факторов, влияющих на скорость снижения температуры металла в нем. Если в течение межплавочного простоя ковш не подогревается, то начальное теплосодержание его футеровки должно зависеть от его продолжительности.

Было проведено моделирование охлаждения футеровки ковша после разливки. Разливка моделировалась следующим образом. Т.к. используемый CFD-пакет считает текучими средами только полости между твердыми телами [76], нельзя напрямую смоделировать разливку стали, т.е. постепенное уменьшение уровня металла в ковше. Поэтому часовую разливку разделили на 4 этапа, каждый длительностью по 15 минут. Были рассчитаны приблизительные уровни металла, соответствующие 15, 30, 45 и 60 минутам разливки. В течение каждого этапа уровень металла в ковше не меняется. Принято, что ковш накрыт крышкой с зазором, составляющим 50 мм, что моделирует неплотности прилегания крышки к горловине ковша из-за настылей. Результаты одного этапа моделирования являлись начальными условиями для следующего этапа. Таким образом было рассчитано тепловое состояние футеровки ковша после окончания разливки.

На рис. 3.5 приведены результаты моделирования охлаждения футеровки ковша после разливки. Принято, что ковш охлаждался без крышки в вертикальном положении. Видно, что после снятия с ковша крышки горячая стенка футеровки начинает быстро терять тепло излучением. Со временем, когда градиент температур горячей стенки и окружающей среды уменьшается, и лимитирующей стадией становится перенос тепла теплопроводностью внутри футеровки, потери тепла замедляются. Таким образом, основные потери тепла футеровкой происходят в первые 30-40 минут после разливки.

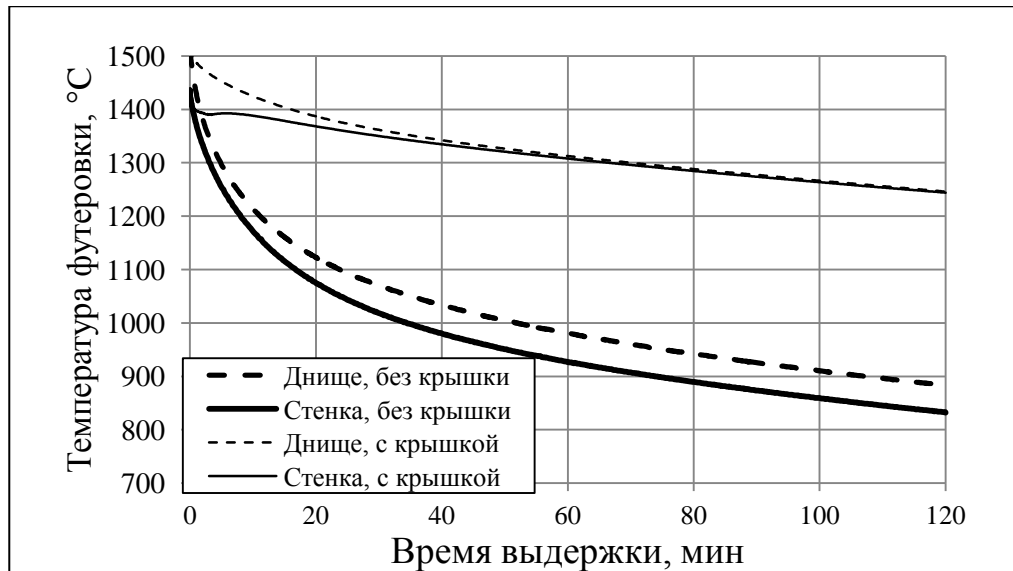


Рисунок 3.5 - Температура горячей поверхности футеровки в зависимости от наличия теплоизоляционной крышки

Для определения влияния оборотного времени ковша на охлаждение металла в нем, на основании расчета охлаждения футеровки, было проведено моделирование охлаждения металла в ковше в зависимости от оборотного времени (рис. 3.6). Видно, что, как и предполагалось, охлаждение металла в ковше действительно сильно зависит от оборотного времени. Как уже было отмечено выше, основные тепловые потери футеровки происходят в первые 30-40 мин оборотного времени, что отражается и на тепловых потерях металла в оборотных ковшах. На графике видно достаточно резкое повышение температурных потерь (14 °C) при увеличении оборотного времени от 15 до 45 мин. При последующем увеличении оборотного времени, например, с 45 до 75 минут, рост температурных потерь металла не так велик и составляет около 8 °C, и в дальнейшем продолжает уменьшаться.

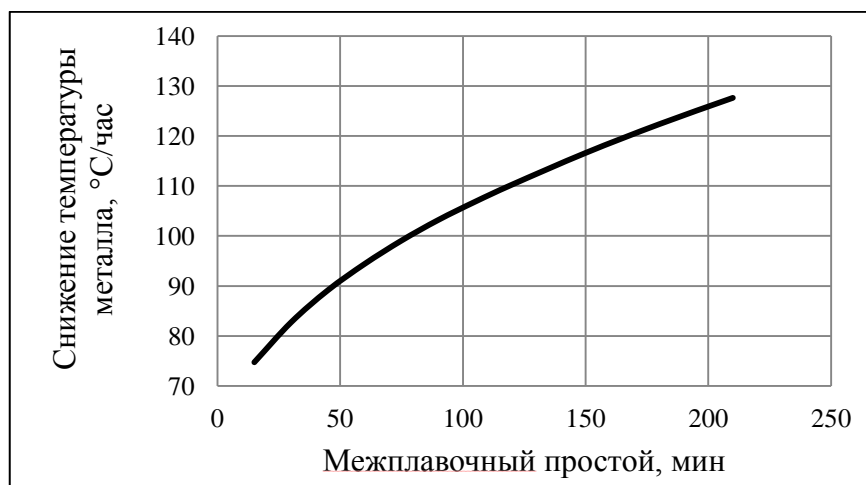


Рисунок 3.6 - Зависимость охлаждения металла в ковше от длительности простоя пустого ковша

Для снижения тепловых потерь футеровки пустых стальковшей в течение оборотного времени их можно накрывать теплоизоляционными крышками. Такие универсальные крышки используются на ГУП «ЛПЗ» во время разливки, при аварийной выдержке металла в ковше и при длительном охлаждении пустого ковша.

Было проведено моделирование охлаждения ковша с крышкой. На рис. 3.5 приведен график изменения средней температуры горячей стенки футеровки стенки и дна при наличии и отсутствии крышки. Видно, что без крышки горячая стенка футеровки остывает гораздо быстрее, что объясняется высоким радиационными тепловыми потерями в окружающую среду, в то время как при наличии крышки теплообмен с окружающей средой заменяется на теплообмен с крышкой и ограниченным ею объемом воздуха. На рис. 3.7 приведены термограммы футеровки ковша после двухчасового оборотного времени с крышкой (а) и без нее (б). Хорошо видно, что без крышки остывает только небольшой слой рабочей футеровки, прилегающей к горячей стенке, в то время как остальная часть остается относительно нагретой. Именно по этой причине жидкая сталь в оборотных ковшах остывает медленнее, чем в новых, хотя температура горячей стенки у первых может быть меньшей. В то же время, рабочий слой футеровки ковша под крышкой остывает равномерно и сохраняет гораздо больше тепла.

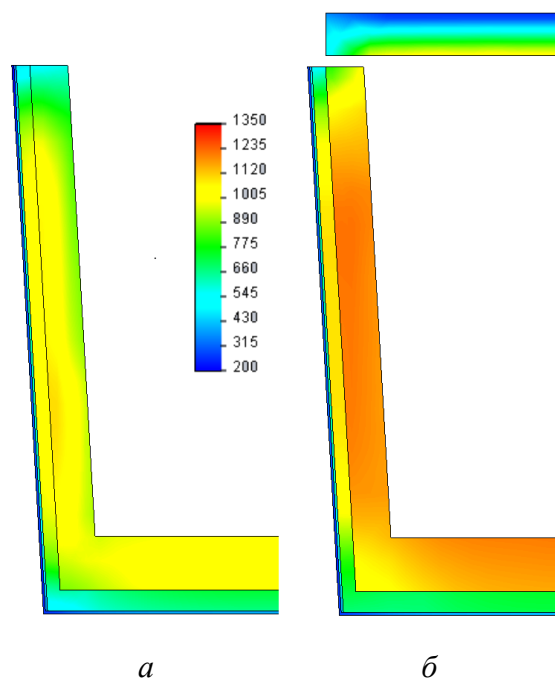


Рисунок 3.7 – Расчетные термограммы футеровки ковша после охлаждения без крышки (а) и с ней (б)

Так как после окончания разливки крышку необходимо снять для слива шлака и очистки ковша, было смоделировано 15-минутное охлаждение ковша без крышки (минимальная

продолжительность слива шлака и очистки ковша, измеренное на ГУП «ЛПЗ») с последующим охлаждением под крышкой. Результаты приведены на рис. 3.8. Видно, что за то время, пока сливается шлак и идет очистка ковша горячая поверхность футеровки теряет около 250-300 °С. После накрывания ковша крышкой тепловые потери футеровки излучением резко уменьшаются, т.к. тепло, излученное с поверхности футеровки стенки, усваивается противоположной стенкой, днищем или крышкой и т.д. В дальнейшем происходит даже небольшое (около 50 °С) повышение температуры горячей поверхности футеровки. Это объясняется тем, что, как уже было отмечено выше (см. рис. 3.7), за короткое время ускоренного охлаждения футеровки без крышки остывает только тонкий слой рабочей футеровки ковша. После того, как тепловые потери излучением резко снижаются, процесс управляется уже теплопроводностью в футеровке ковша, которая стремится перейти в стационарное тепловое состояние, а т.к. внутренние слои футеровки нагреты больше, чем внешние, тепловой поток меняет направление и происходит подогрев этих охлажденных внешних слоев. В дальнейшем, после установления внутри футеровки квазистационарного состояния, наблюдается медленное снижение температуры горячей поверхности футеровки.

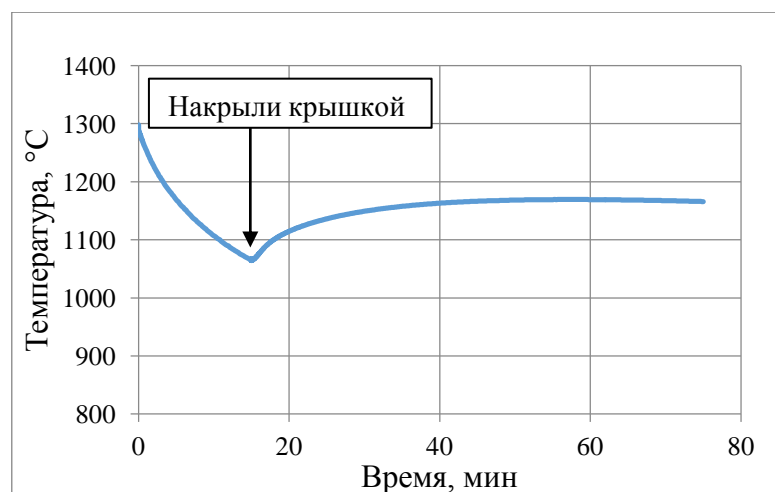


Рисунок 3.8 – Температура горячей поверхности футеровки до и после накрывания ковша крышкой

Для определения экономической эффективности использования теплоизоляционных крышек в течение межплавочного простоя ковша было проведено моделирование охлаждения жидкой стали в ковше, который в течение оборотного времени, после слива шлака и очистки был накрыт крышкой. Результаты моделирования приведены на рис. 3.9.

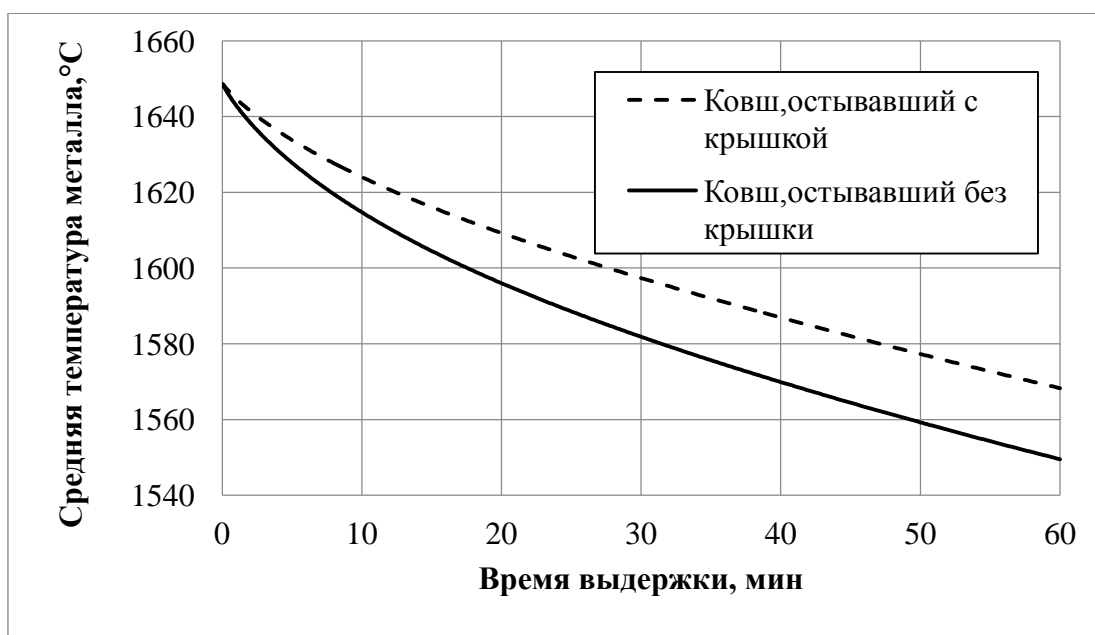


Рисунок 3.9 – Изменение температуры металла в ковше, остывавшим с крышкой и без

Для сравнения, на график была нанесена кривая охлаждения стали в ковше, который в течение всего оборотного времени не был накрыт. Очевидно, что металл в ковше, который охлаждался под крышкой, остывает значительно медленнее. Хорошо заметно, что сплошная кривая температуры (ковш, охлажденный без крышки) в первые минуты резко снижается из-за большого градиента температур между сталью и футеровкой, а со временем, когда слой остывшей футеровки прогревается, становится более пологой. Пунктирная кривая (ковш, охлажденный с крышкой) показывает практически линейную зависимость от времени, т.к. градиент температур не так велик и рабочий слой футеровки прогрет практически равномерно. При средней выдержке металла в ковше, равной 30-40 мин использование крышки позволяет сохранить около 20 °C, что эквивалентно 6 кВт·ч/т стали или 15 руб./т.

3.4. Влияние толщины слоя шлака и крышки на охлаждение металла в ковше

Известно, что наличие шлака на поверхности жидкого металла уменьшает его тепловые потери. Это объясняется снижением температуры теплоотдающей поверхности (700-900 °C вместо 1600 °C), т.к. слой шлака для металла выполняет теплоизолирующую роль благодаря своей относительно малой теплопроводности (2-5 Вт/(м·K), что в 6 – 10 раз меньше коэффициента теплопроводности спокойного расплавленного металла). С другой стороны, коэффициент черноты шлака достаточно высок и составляет по разным данным от 0,7-0,8 [8, 9, 77]; при этом степень черноты жидкого металла не превышает 0,5 [77]. Однако, стоит отметить, что даже при отсечке шлака после выпуска из ДСП небольшое его количество всегда

присутствует на поверхности металла. На ГУП «ЛПЗ» максимально допустимая толщина печного шлака, согласно ТИ, составляет 50 мм. Добавление в ковш извести или ТШС уменьшает потери тепла через открытую поверхность металла, однако дополнительно затрачивается тепло на нагрев и плавление шлакообразующих. Для снижения тепловых потерь через открытую поверхность металла на ГУП «ЛПЗ» также используются теплоизоляционные крышки. Благодаря низкой теплопроводности и теплоемкости тепло металла на их нагрев практически не тратится. Исходя из вышеперечисленного задачей моделирования стало сравнение потерь тепла при различной толщине печного шлака, наведенного покровного шлака и теплоизоляционной крышки. Печной шлак имел начальную температуру, равную температуре металла 1650 °С. Моделировалось максимальная допустимая толщина печного шлака (50 мм), средняя (25 мм) и минимальная (5 мм). Покровный шлак моделировался с теми же теплофизическими свойствами, что и печной, только с начальной температурой, равной 25 °С. Толщина покровного шлака задавалась равной 25, 50 и 80 мм. Начальная температура крышки равнялась 300 °С, что соответствует значению температуры горячей поверхности крышки перед ее установкой на ковш на ГУП «ЛПЗ».

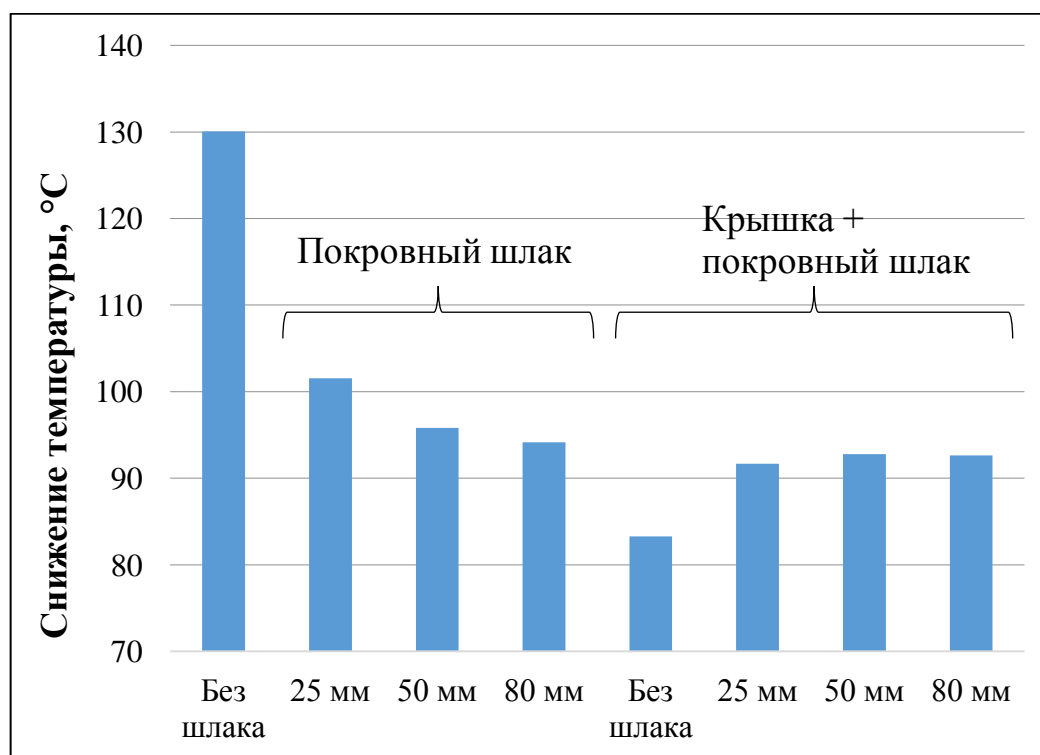


Рисунок 3.10 – Тепловые потери металла в ковше во время выдержки в зависимости от толщины печного шлака (от 5 до 50 мм), наведенного шлака (50 мм) и наличия теплоизоляционной крышки

Результаты моделирования приведены на рис. 3.10. Как и предполагалось, больше всего тепла металл теряет при почти полном отсутствии шлака. По гистограмме видно, что применение покровного шлака снижает тепловые потери по сравнению с ковшом без шлака на ~25 %, однако около 10-15 °С тратится в первые 5-10 мин выдержки на нагрев и плавление шлакообразующих. При этом исследование показало, что увеличение толщины покровного шлака выше 50 мм слабо влияет на тепловые потери металла. Меньше всего тепла потерял ковш, накрытый теплоизоляционной крышкой. Падение температуры в таком ковше после часовой выдержки на 25 °С меньше, чем в ковше с покровным шлаком и почти на 60 °С меньше, чем в ковше без шлака. Расчеты показали, что оптимальным вариантом является использование покровного шлака толщиной не больше 25-50 мм совместно с теплоизоляционной крышкой. Применение этого варианта позволяет уменьшить расход ЭЭ на 15 кВт·ч/т при этом обеспечивая необходимое количество и основность шлака для десульфурации.

3.5. Влияние схемы эксплуатации ковшей

На ГУП «ЛПЗ» используются схемы с 3-мя и 4-мя ковшами в обороте, длительность межплавочного простоя для них составляет от 30 до 60 минут и от 90 до 120 минут соответственно. В табл. 3.2 представлен расчет задолженности ковша при 3-х и 4-х ковшовой схеме, составленная по хронометражам плавов на ГУП «ЛПЗ». Видно, что 3-х ковшовой схеме разогрев футеровки ковшей перед подачей под выпуск исключен из-за недостатка времени. При 4-х ковшах в работе на разогрев отводится в среднем 30-40 минут. Также следует отметить, что при 4-х ковшовой схеме средняя продолжительность подготовки ковша к следующей плавки на 10-15 минут больше, т.к. требуется время на доставку ковша на стенд подогрева, включающее ожидание, пока освободится стенд и подъедет мостовой кран. Кроме того, каждые 3-4 плавки у ковша необходимо заменять шиберную плиту, что занимает дополнительное время и требует обязательного подогрева. Была поставлена задача сравнить тепловое состояние ковшей перед выпуском плавки при 3-х и 4-х ковшовой схеме, т.е. при наличии и отсутствии подогрева, с целью определения оптимальной схемы.

Было проведено моделирование охлаждения стальной ковша после разливки в течение 45 мин, имитирующее среднюю продолжительность очистки и подготовки ковша при 4-х ковшовой схеме работы. Затем, используя полученные результаты (тепловое состояние ковша) было проведено моделирование 40-минутного подогрева футеровки ковша газовой горелкой. Для имитации работы по 3-х ковшовой схеме было смоделировано только 30-минутное охлаждение футеровки ковша. Средняя расчетная температура горячей стенки ковша после 45-

минутной подготовки составляет 940 °С. После часового подогрева средняя температура стенки поднимается до 1140 °С. При 3-х ковшовой схеме после 30-минутного охлаждения горячая стенка футеровки остывает в среднем до 980 °С.

Таблица 3.2 – Длительность операций по подготовке стальковша

Период	Длительность, мин	
	3 ковша	4 ковша
Слив шлака из ковша	5	5
Очистка ковша, промывка канала шиберного затвора кислородом, ожидание	10-30	30-50
Разогрев ковша под плавку	-	30-40
Подача ковша под выпуск	5	5
Ожидание выпуска плавки	5-20	5-20
Всего	30-60	90-120

Для сравнения также была предложена еще одна схема работы ковшей, когда при 4-х ковшах в обороте после очистки, вместо подогрева, ковш ставится под крышку. Такая схема используется на ГУП «ЛПЗ» при занятости обоих стендов нагрева. При использовании этой схемы ковш не будет терять дополнительное тепло во время ожидания и транспортировки на стенд нагрева. Эта схема была симитирована путем 30-минутного охлаждения ковша без крышки с последующим часовым охлаждением под крышкой. После накрывания крышкой после 30 минут температура немного повышаться и достигает 1075 °С. Однако, как уже было доказано выше, нельзя оценивать тепловое состояние футеровки по температуре горячей стенки, т.к. она может быстро остыть, в то время как внутренние слои футеровки еще достаточно прогреты. Поэтому для количественного сравнения технологий провели моделирование охлаждения стали в ковшах, работающих по разным схемам. Хотя горячая стенка футеровки ковша, который не подогревался, а сразу ставился под выпуск (схема с тремя ковшами в обороте) и имела самую низкую температуру (980 °С), металл в таком ковше после часовой выдержки имеет практически ту же температуру (1565 °С), что и металл в подогретом ковше (1563 °С), горячая стенка футеровки которого была почти на 200 °С выше (1140 °С). Как уже было отмечено выше, это объясняется тем, что при охлаждении ковша без крышки успевает остыть только небольшой слой рабочей футеровки, в то время как внутренняя часть остается достаточно прогретой. При этом, металл в ковше, который после подготовки вместо нагрева ставился под крышку, показал лишь небольшое отличие по температуре (1560 °С). Совершенно очевидно, что такая схема неэффективна, так как затраты на природный газ не окупаются снижением тепловых потерь металла.

Таким образом, по результатам расчетов можно сделать вывод, что 3-х ковшова́я схема работы (без нагрева) выгоднее, чем схема с 4 ковшами в обороте (с нагревом), т.к. за

отведенное время футеровка не успевает достаточно прогреться. Моделирование показало низкую эффективность подогрева оборотных ковшей пламенными горелками, поэтому после подготовки ковша к следующей плавке, вместо подогрева, предлагается ставить его под крышку.

3.6. Исследование эффективности газового подогрева по сравнению с альтернативными способами подогрева футеровки

Исходя из полученных результатов была также поставлена задача сравнить топливно-воздушный подогрев ковшей с описанными выше альтернативными способами нагрева: топливно-кислородным и электрическим, для определения эффективности внедрения новой технологии подогрева ковшей на ГУП «ЛПЗ».

3.6.1 Моделирование подогрева футеровки стальной ковшей

С помощью разработанных субмоделей был симитирован подогрев футеровки ТКГ и электронагревателями. В качестве начального теплового состояния ковша брались результаты моделирования охлаждения ковша при 4-х ковшовой схеме работы, т.е. охлаждение ковша в течение 45 минут с последующем 60-минутным разогревом.

Результаты моделирования приведены на рис. 3.11. Видно, что при электрическом подогреве средняя температура горячей стенки футеровки уже через 10 минут подогрева достигает необходимых 1200 °С, а через 30 минут – 1350 °С и в дальнейшем увеличивается незначительно. Благодаря высокой степени черноты карбида кремния передача энергии при таком нагреве происходит гораздо быстрее и эффективнее, чем у горелок. Температура горячей стенки футеровки ковша всего на 50-100 °С ниже, чем температура нагревателей, что говорит о высоком КПД электрического подогрева. Эти результаты были использованы для определения параметров тиристорного источника питания установки электрического нагрева УЭНК-20 для завода «Электросталь» (Приложение В).

Газовая горелка не смогла подогреть футеровку ковша до необходимой температуры 1200 °С даже за 60 минут. Эти результаты хорошо согласуются с производственными данными, полученными на ГУП «ЛПЗ», где после 40-минутного подогрева оборотного ковша температура его футеровки практически не изменяется, а может даже уменьшиться. Топливо-воздушные горелки, применяемые на большинстве металлургических предприятиях не способны быстро подогреть футеровку стальной ковшей до необходимой температуры. Это объясняется тем, что подогретые дымовые газы быстро уносятся через зазор между крышкой и

горловиной ковша, не успевая передать свое тепло футеровке, а светимость факела слишком мала, чтобы эффективно излучать энергию на футеровку.

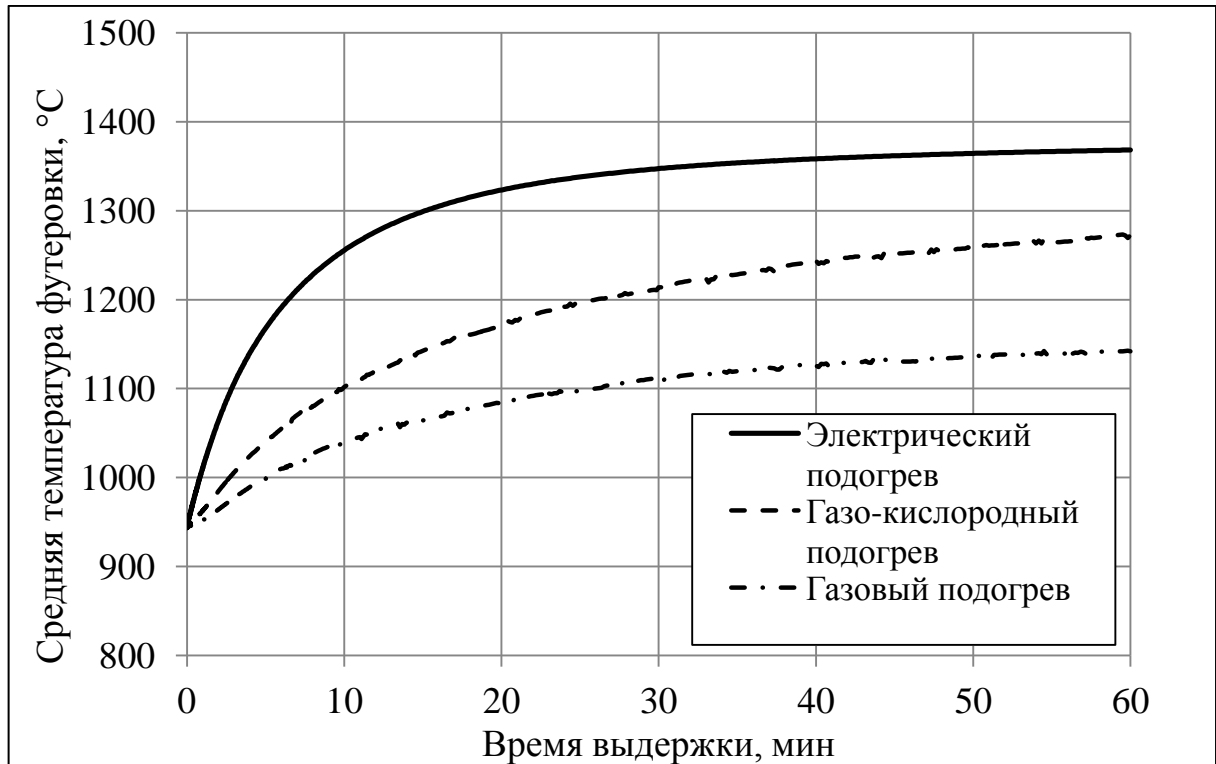


Рисунок 3.11 – Изменение температуры горячей стенки футеровки ковша при различных способах подогрева

Газокислородная горелка, согласно модели, за полчаса способна подогреть футеровку до необходимых 1200 °C, а при часовом подогреве – еще на 70 °C. Благодаря использованию чистого кислорода в качестве окислителя в таких горелках, уменьшается количество дымовых газов, увеличивается концентрация в них диоксида углерода и паров воды, что значительно повышает светимость факела. Полученные данные сопоставимы с результатами, представленными производителями этих горелок [17]. По этим данным, горелки способны за короткий срок нагреть футеровку до 1200 °C, после чего можно снижать расход природного газа для поддержания этой температуры.

С помощью субмодели охлаждения металла в ковше были проведены расчеты снижения температуры стали в ковше при различных способах его подогрева используя полученные ранее результаты в качестве начальных условий. Т.к. при электрическом и газокислородном подогревах необходимая температура достигается уже через 20-30 мин после начала нагрева, также было рассчитано охлаждение стали в ковше после получасового нагрева. Результаты расчетов приведены в табл. 3.3. Видно, что использование электрических нагревателей позволяет сократить температурные потери металла в ковше на ~20 °C по сравнению с

неподогретым ковшом. Нагрев ковшей ТКГ позволяет снизить температурные потери металла в ковше от 9 до 13 °С в зависимости от продолжительности подогрева. В то же время металл в ковше, подогретом при помощи газовой горелки после часовой выдержки по температуре практически не отличается от металла в непрогретом ковше, что еще раз доказывает неэффективность газового подогрева оборотных ковшей на ГУП «ЛПЗ». Кроме того, стоит обратить внимание, что отличие между получасовым и часовым подогревами обоими способами совсем незначительное (3-4 °С). То есть ковш достигает необходимого теплового состояния уже за первые полчаса нагрева, а значит нет необходимости в его продолжении.

Таким образом, настоящее моделирование численно показало, что новые методы подогрева ковшей позволяют нагревать футеровку до значительно больших температур, чем газовыми горелками. Однако, чтобы определить, какой из представленных методов подогрева более подходящий для конкретного производства, например, для ГУП «ЛПЗ», необходимо рассчитать и сравнить их экономическую эффективность, учитывая как энергетические затраты на подогрев, так и выгоду от снижения тепловых потерь металла.

Таблица 3.3 - Температурные потери металла в ковше после разогрева различными способами

	Охлаждение стали при часовой выдержке в ковше, °С	
	Разогрев 30 минут	Разогрев 60 минут
Газовый подогрев	-	88
Электрический подогрев	73	70
Ковш без подогрева	91	
ТКГ	82	78

3.6.2 Расчет экономической эффективности различных способов подогрева оборотных ковшей

Для определения целесообразности использования альтернативных способов нагрева ковшей на ГУП «ЛПЗ» вместо установок газового нагрева был проведен полный расчет энергетических затрат на нагрев ковша разными способами. Учитывались как прямые энергетические затраты на подогрев ковшей, так и экономия от снижения тепловых потерь металла в ковше. Экономия учитывалась по сравнению с охлаждением стали в ковше без подогрева после 45 минут охлаждения ковша. Расход природного газа для топливно-воздушного подогрева был взят из паспорта установки высокотемпературного разогрева футеровки, работающей на ГУП «ЛПЗ». Примерные расходы газа и кислорода на подогрев ковша ТКГ были приняты, исходя из данных работы [17] и стехиометрических коэффициентов

реакции горения природного газа. Расход электроэнергии на электрический подогрев был принят равным 380 кВт·ч на основании расчетов, приведенных в п. 2.4.3 настоящей работы.

Экономия от снижения перегрева металла на выпуске из ДСП высчитывалась по формуле:

$$Q_{\text{пер}} = c_{\text{ст}} m_{\text{пл}} \Delta T \text{ (Дж)} \quad (3.1)$$

где $c_{\text{ст}}$ – теплоемкость стали, Дж/(кг·К); $m_{\text{пл}}$ – масса плавки, кг; ΔT – снижение температуры выпуска, °С.

Цены на энергоносители взяты по состоянию на 2013 год для Смоленской области. В качестве цены технического кислорода была принята примерная себестоимость получения 1 м³ на кислородной станции, составляющая около 1 кВт·ч электроэнергии. КПД ДСП-30 взят из [81]. Дополнительно был проведен расчет эффективности 3-х ковшовой схемы работы, когда охлаждение ковша не превышает 30 минут. Результаты расчета представлены в табл. 3.4.

Табл. 3.4 – Результаты расчета экономической эффективности различных видов подогрева футеровки в условиях ГУП «ЛПЗ»

	Нагрев электро-нагревателями		Нагрев топливно-воздушной горелкой		Нагрев ТКГ		Без подогрева	
Энергоноситель	Электроэнергия		Природный газ		Природный газ			
Объем израсх. энергоносителя	190	кВт·ч	100	м ³	CH ₄ : 50	м ³		
					O ₂ : 100	м ³		
Цена на энергоноситель	2,5	руб./кВт·ч	3,8	руб./м ³	3,8	руб./м ³		
Стоимость подогрева ковша	475	руб.	380	руб.	440	руб.		
Снижение температуры выпуска	18	°С	4	°С	9	°С	5	°С
Кол-во тепла на перегрев 32 т стали	483,8	МДж	107,52	МДж	241,92	МДж	134,4	МДж
	134,4	кВт·ч	29,9	кВт·ч	67,2	кВт·ч	37,3	кВт·ч
КПД печи	0,69							
Необходимое кол-во тепла	194,8	кВт·ч	43,3	кВт·ч	97,4	кВт·ч	54,1	кВт·ч
Стоимость	487,0	руб.	108,2	руб.	243,5	руб.	135,3	руб.
Общая стоимость	12,0	руб.	-271,8	руб.	-196,5	руб.	135,3	руб.

Расчет показал, что при нынешних ценах на энергоносители электрический подогрев эффективнее топливно-воздушного с экономической точки зрения даже несмотря на большие прямые затраты на электроэнергию. Газокислородный нагрев также менее эффективен, чем электрический, т.к. затрачивает большое количество технического кислорода, который хоть и является продукцией собственного производства, тем не менее имеет себестоимость. Также видно, что схема без подогрева, когда обратное время ограничено 20-40 минутами и ковш не успевает охладиться, более выгодна, чем схема с любым подогревом. Однако, как видно по результатам, когда время охлаждения ковша превышает 30-40 минут, электрический подогрев становится выгодным. С учетом того, что для использования 3-х ковшовой схемы требуется точность и слаженность работы всех агрегатов и мостовых кранов, что не всегда достижимо в условиях металлургического завода, схема с подогревом оборотных ковшей более устойчива и эффективна при использовании новых методов нагрева футеровки.

Кроме того, в расчете не учитывались некоторые косвенные выгоды от использования электрического подогрева ковшей. Например, снижение градиента температур между жидким металлом и футеровкой при электрическом подогреве уменьшает тепловой удар на футеровку, что значительно повышает стойкость огнеупоров рабочего слоя (примерно на 30 % по данным [18]). Учитывая высокую стоимость периклазоуглеродистых огнеупоров (около 30 000 руб./т) это также увеличивает эффективность использования электрических нагревателей. Также не была учтена выгода от сокращения времени плавки под током, происходящего благодаря снижению перегрева металла в ДСП. Сокращение времени плавки приведет к повышению серийности разливки, увеличению выхода годного и производительности цеха. Кроме того, при достаточном снижении продолжительности плавки и уравнивании его с продолжительностью разливки можно вести разливку методом «плавка-на-плавку» без накопления первых плавов, что снимет проблему их перегрева, стоящую на заводе в настоящее время.

3.7. Разработка рекомендаций по оптимизации теплового режима внепечной обработки на ГУП «ЛПЗ»

На основании проведенных исследований и экспериментов можно сформулировать следующие выводы и рекомендации по оптимизации температурного режима внепечной обработки на ГУП «ЛПЗ», использование которых может привести к снижению энергозатрат и повышению производительности ЭСПЦ.

1) Определено влияние толщины рабочего слоя футеровки на скорость охлаждения полупродукта в ковше малой вместимости. Моделирование показало, что при максимальной и

средней толщине рабочего слоя тепловые потери изменяются незначительно (95 и 98 °С/час соответственно). Заметное увеличение скорости охлаждения металла (до 107 °С/час) в ковше наблюдалось при достижении толщины футеровки рабочего слоя значений, близких к минимально допустимым по ТИ (50 мм). При этом максимальная температура кожуха ковша практически не менялась, оставаясь на уровне 300 °С. Таким образом, можно сделать вывод о слабой зависимости между толщиной футеровки рабочего слоя и охлаждением стали в ковше. Более серьезное влияние оказывает тип огнеупора рабочего слоя, что показало сравнение охлаждения стали в ковше с ПУ, доломитовой и глиноземистой футеровкой. Доломит и глинозем имеют низкие показатели теплопроводности и теплоемкости по сравнению с периклазоуглеродом, поэтому тепловые потери металла в ковше, футерованном доломитовыми кирпичами и высокоглиноземистым бетоном примерно на 15 и 20 % соответственно меньше, чем в ковше с ПУ рабочим слоем. Исходя из полученных результатов в ковшах малой вместимости рекомендуется использовать огнеупоры с пониженными характеристиками теплопроводности и теплоемкости. Однако, при подборе огнеупоров следует также учитывать и их технико-экономические показатели, такие как стойкость и цена.

2) Изучалось также влияние толщины теплоизоляционного слоя футеровки ковшей малой вместимости на скорость охлаждения металла в них. В настоящее время на ГУП «ЛПЗ» в качестве теплоизоляции используются листы керамоволокнистого картона толщиной 10 мм, укладываемые в один слой на стенку кожуха ковша. Моделирование показало, что увеличение слоя до 20 мм практически не оказывает влияние на общие тепловые потери металла в ковше, однако позволяет снизить среднюю температуру кожуха ковша с 310 до 250 °С. Таким образом, для снижения риска коробления или прогара кожуха при чрезмерном износе футеровки рабочего слоя рекомендуется использовать двойной слой теплоизоляционного картона при футеровке стальной ковшей на ГУП «ЛПЗ».

3) Исследование показало, что оборотное время (период от окончания разливки ковша до его установки под выпуск следующей плавки) значительно влияет на охлаждение стали в ковше. Его сокращение приводит к снижению тепловых потерь металла на аккумуляцию футеровки. По этой причине рекомендуется снизить количество ковшей в обороте с 4-х до 3-х с целью сокращения оборотного времени. Как показало моделирование, при 3-х ковшовой схеме работы, когда оборотное время составляет 30-40 мин, отпадает необходимость подогревать ковши перед отдачей под выпуск, т.к. футеровка не успевает остыть. При этом расчеты показали, что такая схема работы выгоднее, чем схема с 4-мя ковшами в обороте (оборотное время 90-120 мин), когда остывший ковш предварительно подогревается на стенде газового нагрева. Кроме того, согласно расчетам, использование теплоизоляционной крышки в течение оборотного времени значительно снижает тепловые потери пустого ковша (на 15-20 °С). По

этой причине предлагается накрывать пустой ковш теплоизоляционной крышкой сразу после его подготовки и очистки. Снимать крышку с ковша следует только непосредственно перед выпуском плавки в ковш во избежание дополнительного охлаждения футеровки.

4) Как показали расчеты и эксперименты, используемые в настоящий момент на заводе стенды высокотемпературного нагрева ковшей неэффективны, т.к. не обеспечивают необходимую температуру нагрева футеровки. Предлагается заменить существующие стенды высокотемпературного подогрева ковшей на установки электрического подогрева. Исследование показало, что подогрев оборотных ковшей газовой горелкой экономически не выгоден, т.к. затраты на природный газ не окупаются снижением тепловых потерь стали в ковше: металл в неподогретых ковшах теряет практически столько же тепла, как в и подогретых. Электрические нагреватели способны за короткое время подогреть остывший слой футеровки оборотного ковша до необходимой температуры, что позволит сэкономить до 20 руб./т стали за счет снижения перегрева металла в ДСП.

5) При невозможности использования 3-х ковшей в обороте, например, при длительной подготовке ковша к плавке (замене шиберного затвора и т.д.), следует переходить на 4-х ковшовую схему работы. Моделирование показало, что при использовании электрических нагревателей подогрев оборотных ковшей становится экономически эффективным. При этом минимальное время охлаждения ковша, при котором подогрев становится выгодным, составляет 40-45 минут. Таким образом, предлагается подогревать электричеством все оборотные ковши, которые охлаждались более 45 минут. Время подогрева составляет от 20 до 40 минут, в зависимости от начальной температуры ковша. Если после достаточного нагрева ковша плавильный агрегат не готов к выпуску плавки, подогретый ковш следует накрывать теплоизолирующей крышкой и транспортировать под выпуск или на стенд отстоя ковшей.

6) Увеличение парка теплоизоляционных крышек. Крышками следует накрывать все ковшы с металлом, время выдержки которых превышает 10 минут непосредственно после выпуска из ДСП. Это позволит сэкономить от 5 до 15 руб./т стали в зависимости от времени выдержки за счет снижения перегрева металла в ДСП. Кроме того, ковш должен накрываться крышкой сразу после выкатывания из-под АКП, а не на поворотном столе, как происходит в настоящее время. Снимать крышку с ковша после разливки следует только перед сливом шлака. Учитывая занятость мостовых кранов, а также относительно малый вес крышек, класть и снимать их можно небольшим краном. Такие краны можно установить, например, на рабочих площадках ДСП и АКП.

7) Моделирование охлаждения металла в ковше малой вместимости при различной начальной температуре показало, что большой перегрев металла (1700 °C) приводит к повышенным тепловым потерям (~15 °C по сравнению с 1615 °C). На основании этого можно

рекомендовать максимально снижать перегрев полупродукта в ДСП, используя для определения оптимальной температуры выпуска предложенную в гл. 5 прогнозную модель, которую можно внедрить в АСУТП плавки.

Использование предложенных рекомендаций позволит уменьшать перегрев металла в ДСП от 20 до 60 °С, в зависимости от длительности выдержки металла в ковше, что приведет к снижению расхода электроэнергии в ДСП от 7 до 20 кВт·ч/т стали. Также, кроме снижения энергозатрат на перегрев стали в ДСП, применение рекомендаций приведет к уменьшению времени под током. Средняя скорость нагрева металла в ДСП составляет около 20 °С/мин, таким образом можно снизить время под током от 1 до 3 минут. Наряду с другими мерами это позволит снизить продолжительность плавки, чтобы она сравнялась с продолжительностью разливки. Это даст возможность организовать серийную разливку без накопления первых плавов в серии, которое практикуется на заводе в настоящее время, что в свою очередь приведет к снижению продолжительности выдержки металла в ковше на таких плавках, и, как следствие, снижению перегрева металла и затрат на него. В конечном итоге, ожидаемая прямая выгода от применения рекомендаций составляет ~11 млн руб./год. Косвенную выгоду от увеличения производительности цеха, повышения экологичности процесса и т. д. также сложно переоценить.

ГЛАВА 4 – РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО СПОСОБА СУШКИ ФУТЕРОВКИ КОВШЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

4.1 Основные концепции процесса сушки новой футеровки стальной ковшей

Разогрев новой футеровки ковшей значительно отличается от подогрева оборотных ковшей. Его необходимо проводить по специально разработанному режиму, зависящему от типа применяемых огнеупоров. Например, для монолитных футеровок необходима длительная сушка при температурах 200-400 °С для удаления физически и химически связанной воды, т. к. при быстром нагреве футеровка может растрескаться и даже обвалиться [25]. Широко применяемые в настоящее время формованные необожженные периклазоуглеродистые (ПУ) изделия содержат в качестве связующих различные фенолформальдегидовые смолы, например, бакелит, а также каменноугольные пеки и этиленгликоль. Таким огнеупорам требуется обжиг, в ходе которого происходит коксование органических связующих и упрочнение структуры. Благодаря высокой теплоемкости и теплопроводности этих огнеупоров, скорость их нагрева практически неограниченна. Более того, для лучшего коксования органической связки и формирования коксового сростка требуется наиболее резкий подъем температуры [82].

Одним из недостатков ПУ футеровок является окисление углерода с поверхности огнеупоров при высоких температурах. Обезуглероживание поверхностного слоя приводит к увеличению его пористости и снижению прочности, что значительно сокращает стойкость огнеупора. В работе [83] показано, что окисление углерода из огнеупоров происходит уже на стадии разогрева новой футеровки газовыми горелками, т.к. при этом формируется окислительная атмосфера продуктов сгорания, которая содержит O_2 , CO_2 и H_2O . Толщина обезуглероженного слоя после сушки может достигать 20 мм.

Таким образом, применение электрических нагревателей для разогрева ПУ футеровки новых ковшей имеет ряд преимуществ над газовым подогревом. Во-первых, температурный режим электрического подогрева регулируется точнее, чем газового, т.к. регулируемым параметром является напряжение, а не расход газа [18]. Во-вторых, скорость нагрева футеровки после коксования практически не ограничена, а значит, использование электрических нагревателей позволит сократить длительность разогрева новой футеровки. И в-третьих, использование электрических нагревателей дает возможность регулировать состав атмосферы, в которой протекает сушка и разогрев новых ковшей, что позволит снизить окисление углерода из огнеупоров на этой стадии, а значит повысить их стойкость.

Однако, промышленное опробование стенов электрического подогрева на заводе «Электросталь» выявило следующую проблему. Как уже было отмечено, во время сушки ПУ футеровок происходит коксование органических связующих, входящих в состав огнеупоров. Процесс коксования связан с выделением большого количества газообразных органических соединений, которые при газовом подогреве просто сгорают в пламени горелки. В то же время при электрической сушке это приводит к осаждению углерода в виде сажи на нагревателях и электропроводке, что в свою очередь вызывает изменение электропроводности нагревателей, локальные перегревы, и, в конечном итоге, оплавление и поломку нагревателей. Для решения этой проблемы производители нагревателей рекомендуют [78] вводить в пространство внутри ковша воздух для окисления сажи. Кроме того, следует удалять образующиеся органические соединения при помощи дымососа.

Таким образом, появляется необходимость в разработке температурного режима сушки и разогрева новой ПУ футеровки стальной ковша электрическими нагревателями, в котором будут учтены все положительные и отрицательные особенности электрического подогрева.

4.2 Энергосберегающий способ сушки футеровки ковшей с помощью электронагревателей

По литературным данным [82], процесс коксования в огнеупоре заканчивается при температуре около 400-500 °С. При этом окисления углерода при этой температуре еще не наблюдается. В то же время, при температуре выше 600 °С углерод начинает значительно окисляться и выгорать, особенно с поверхности изделий. Главными газообразными окислителями при этом являются кислород, диоксид углерода и пары воды. При газовом подогреве содержание кислорода в атмосфере ковша снижается по сравнению с электрическим подогревом за счет реакции горения природного газа. Таким образом можно предположить, что при электрическом подогреве углерод из огнеупоров будет выгорать сильнее из-за более окислительной атмосферы. Однако, результаты работы [84] показали, что при нагреве в атмосфере воздуха и продуктов сгорания природного газа толщина безуглероженного слоя в ПУ огнеупорах имеет близкие значения. Это можно объяснить тем, что окисление углерода лимитируется скоростями подвода окислителя и удаления продуктов реакции, т.е. кинетическими факторами, а незначительное снижение активности кислорода не сильно влияет на общий ход процесса. С другой стороны, при снижении концентрации кислорода до некоторых критических значений, например, при подаче в ковш инертного газа, скорость окисления углерода может заметно уменьшиться. Так, по данным [85], при нагреве ПУ огнеупора в безокислительной среде выгорания углерода не наблюдается.

На основании приведенных выше данных, а также модельных расчетов был разработан режим сушки и разогрева новой ПУ футеровки стальной электрическими нагревателями (рис. 4.1). На первой стадии проводится нагрев до 200 °С и выдержка при этой температуре в течение 2 часов для удаления физически и химически связанной воды. Затем футеровка разогревается до 600 °С, после чего проводится 4-х часовая выдержка для завершения процесса коксования во всем объеме огнеупора, которая осуществляется в окислительной атмосфере, достигаемой подачей в ковш воздуха. Последним этапом является быстрый разогрев футеровки на максимальной мощности до рабочих температур в нейтральной атмосфере, достигаемой путем ввода внутрь ковша инертного газа, например, азота или аргона.

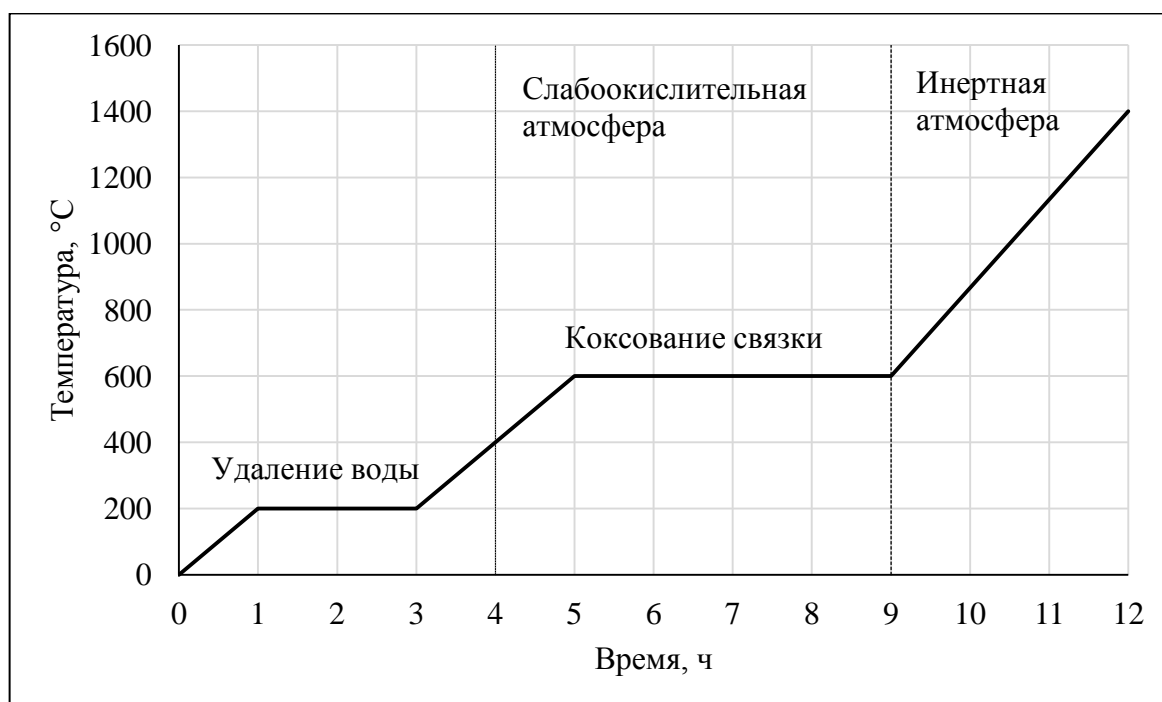
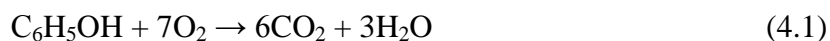


Рисунок 4.1 – Режим сушки и подогрева новой футеровки стальной электрическими нагревателями

Расход воздуха на окисление летучих можно примерно рассчитать из следующих соображений. В состав ПУ огнеупоров входит в зависимости от марки от 2 до 4 % (мас.) фенолформальдегидной смолы [82]. При коксовании этой связки около 45-55 % смолы превращается в коксовый остаток, остальные 45-55 % удаляются в виде летучих. Приняв их состав за 100 % фенол можно примерно рассчитать количество кислорода на его полное окисление по формуле:



Таким образом, из 40 г связки в килограмме огнеупора выделится 20 г фенола. Количество кислорода можно определить по формуле:

$$V_{O_2} = 7 \frac{m_{\phi}}{M_{\phi}} \cdot V_m, \text{ л} \quad (4.2)$$

где m_{ϕ} – масса фенола, г; M_{ϕ} – молярная масса фенола, 94 г/моль; V_m – молярный объем, 22,4 л/моль.

$$V_{O_2} = 37,3 \text{ л/кг огнеупора} = 0,037 \text{ м}^3/\text{кг огнеупора}.$$

Итоговый расход воздуха на окисление можно вычислить по формуле:

$$Q_{\text{возд}} = \frac{V_{O_2}(1+k) \cdot M_{\phi}}{\tau_{\text{выд}}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4.3)$$

Для инженерных расчетов расхода воздуха была предложена полуэмпирическая формула:

$$Q_{\text{возд}} = k \cdot M_{\kappa} / \tau_{\text{сушки}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4.4)$$

где k – эмпирический коэффициент, равный 47,6; M_{κ} – вместимость ковша, т; $\tau_{\text{сушки}}$ – продолжительность сушки, ч.

Количество аргона для создания защитной атмосферы рассчитывали из условия, что содержание кислорода в атмосфере внутри ковша не должно превышать 5 % (об.). Объем ковша ГУП «ЛПЗ» равен 5,5 м³. Таким образом, чтобы снизить концентрацию кислорода с 21 до 5 % (об.) необходимо подать в ковш около 18 м³ аргона. На основании этих расчетов и литературных данных предложена эмпирическая формула для расчета среднего расхода аргона:

$$Q_{\text{арг}} = (0,5 \dots 0,6) \cdot M_{\kappa}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4.5)$$

4.3 Математическое моделирование процесса сушки и подогрева ковша

На рис. 4.2 и в табл. 4.1 приведены результаты модельного расчета нагрева футеровки ковша, проведенного по предложенному режиму. Хорошо заметно, что за время выдержки при 600 °С температура на границе рабочего и арматурного слоев футеровки достигает 550 °С, т.е. рабочий слой успевает равномерно прогреться, а значит процесс коксования проходит по всему объему огнеупоров. Также видно, что к концу разогрева температура горячей стенки близка к заданному значению 1400 °С. В то же время температура на границе рабочего и арматурного слоев составляет около 1000 °С, что говорит о достаточной прогретости рабочего слоя футеровки даже не смотря на высокую скорость разогрева на последней стадии (~250 °С/ч).

При этом максимальная температура ковшуха не превышает 270 °С. Следовательно, можно сделать вывод о пригодности данного режима для подготовки новых ковшей к работе.

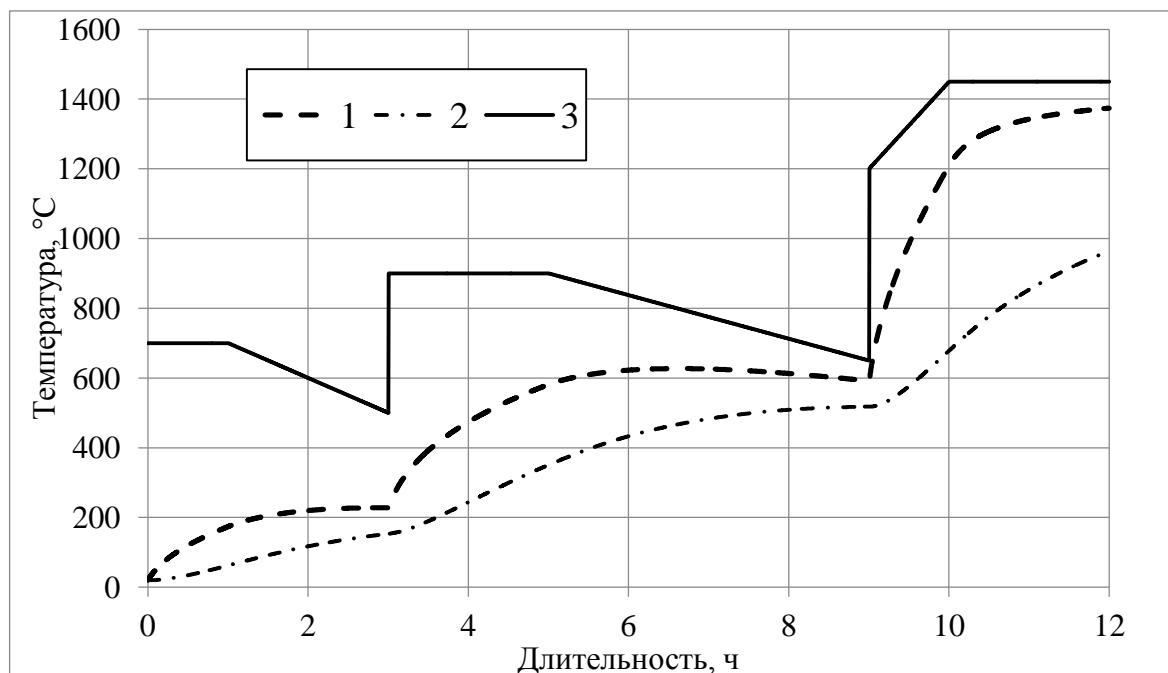


Рисунок 4.2 – Результаты моделирования сушки и подогрева ковша электрическими нагревателями:

1 – температура горячей поверхности футеровки; 2 – температура на границе рабочего и арматурного слоев футеровки; 3 – температура нагревателей

Для сравнения проводился модельный расчет сушки ковша газовой горелкой по режиму, применяемому на заводе в настоящее время (рис. 4.3). Результаты приведены в табл. 4.1. Следует отметить, что моделирование проводилось при максимальной мощности горелки (1 МВт). Видно, что даже за 24-часовой цикл сушки и нагрева футеровка ковша не успевает прогреться до заданных 1150 °С. Тем не менее, благодаря большой продолжительности этого режима, рабочий слой футеровки прогрет практически до стационарного состояния, о чем говорит высокая температура на границе рабочего и арматурного слоев (914 °С). Однако, длительная выдержка при температуре ~1000 °С, по данным работы [84] приведет к значительному окислению углерода из поверхностного слоя огнеупоров.

Если сравнивать расход энергоносителей, то становится очевидно, что новый режим снижает общие затраты на подготовку ковша благодаря уменьшению длительности подогрева футеровки. Также, значительно снижается скорость охлаждения стали в новом ковше, а значит нет необходимости перегревать первые плавки в нем. При средней длительности выдержки на ГУП «ЛПЗ», равной 40 мин, это позволит снизить расход электроэнергии на ~300 кВт·ч на один ковш.

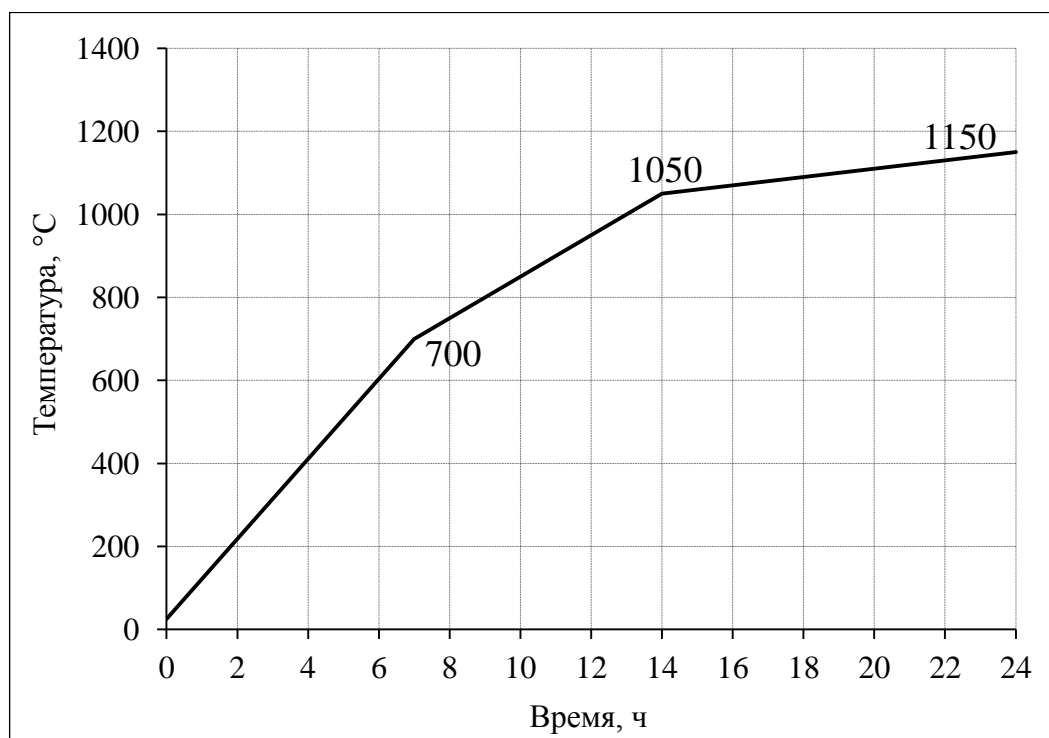


Рисунок 4.3 – Действующий на ГУП «ЛПЗ» режим сушки и подогрева футеровки

Табл. 4.1 – Результаты моделирования сушки и подогрева стальной ковше по действующему и новому режиму

Показатель	Сушка и подогрев газовой горелкой	Сушка и подогрев электрическими нагревателями
Длительность, ч	24	12
Конечная температура, °C	1070	1374
Температура на границе рабочего и арматурного слоев, °C	914	964
Температура кожуха, °C	250	263
Расчетное количество энергоносителя	2400 м ³	3040 кВт·ч
Затраты на сушку и подогрев, руб.	9120	7600
Расход аргона, м ³	0	18
Падение температуры металла в ковше после часовой выдержки, °C	97	70

Кроме того, применение нового режима сушки в защитной атмосфере приведет к снижению выгорания углерода из огнеупоров, что должно значительно повысить их стойкость.

Так, по данным [85], при нагреве огнеупора в безокислительной среде выгорания углерода не наблюдается. Толщина обезуглероженного слоя при сушке ковша по действующему режиму составляет ~10 мм. Допуская, что в течение первой плавки обезуглероженный слой будет полностью пропитан металлом и шлаком, а также, что средняя скорость износа ПУ футеровки составляет 1,5 мм за плавку, применение новой технологии сушки повысит стойкость футеровки на 6-7 плавов. При средней стойкости рабочего слоя на ГУП «ЛПЗ», равной 50-60 плавов, увеличение стойкости составит 10-15 %, что при средней цене ПУ огнеупоров, равной 30 000 руб./т эквивалентно 4500 руб./т.

Новый режим сушки и высокотемпературного подогрева футеровки ковшей с помощью электрических нагревателей также имеет преимущество в плане повышения экологичности процесса. Кроме явного преимущества в виде отсутствия выбросов CO_2 и других вредных продуктов горения природного газа, имеется еще и возможность сокращения выбросов ядовитых веществ, выделяющихся во время сушки и подогрева ПУ футеровки нового ковша. Как уже упоминалось, в качестве связующих в ПУ огнеупорах используются различные фенолформальдегидовые смолы, например, бакелит, а также каменноугольные пеки и этиленгликоль. Процесс сушки и предварительного обжига сопровождается образованием и выделением фенолов, формальдегида, смолистых возгонов пека, содержащих в своем составе группу канцерогенных ароматических углеводородов, которые интенсивно выделяются в пространство цеха, т.к. большинство стенов сушки и подогрева не снабжены системой газоочистки. Как показали результаты исследований [86], в процессе сушки и предварительного подогрева полного завершения процессов полимеризации фенолсодержащей связки и коксования пека не происходит. При первой заливке в ковш стали, т.е. при температуре 1550 °С, из дренажных отверстий продолжают выделяться и сгорать вредные вещества органической природы. Так как установки электрического подогрева позволяют нагревать футеровку ковшей до более высоких температур, таким образом повышая полноту протекания реакций полимеризации и коксования непосредственно на стенде подогрева, где есть возможность улавливания и обезвреживания всех ядовитых и канцерогенных веществ с помощью системы газоочистки, появляется возможность до минимума снизить выделение этих вредных веществ в атмосферу цеха.

В целом, ожидаемая прямая выгода от применения нового режима сушки за счет увеличения стойкости футеровки, снижения длительности подготовки нового ковша и повышения температуры его футеровки составляет ~1 млн руб./год.

ГЛАВА 5 – РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Температура и химический состав стали перед разливкой являются ключевыми параметрами при производстве качественной непрерывнолитой заготовки. При этом, энергетические и материальные затраты оказывают влияние на величину себестоимости стали. Для оптимизации этих затрат необходимо с наибольшей точностью контролировать температуру металла и количество ферросплавов, которые нужно ввести в металл для достижения заданных показателей.

5.1 Разработка прогнозной тепловой модели ковша

Для определения оптимальной температуры выпуска металла из ДСП, а также контроля температуры металла в ковше во время внепечной обработки была разработана прогнозная тепловая модель сталковша.

Тепловая модель разрабатывалась для определения снижения температуры жидкой стали от выпуска до установки ковша на стенд АКП. Так как это снижение сильно зависит от теплового состояния ковша перед выпуском, модель учитывает все периоды работы ковша, включая разливку, межплавочный период и разогрев футеровки.

5.1.1 Основные уравнения, начальные и граничные условия и допущения модели

Для определения снижения температуры жидкой стали от выпуска (последний замер на ДСП) до установки ковша на стенд АКП (первый замер на АКП) необходимо учитывать все тепловые потери за этот период, которые складываются из:

- потерь тепла струей жидкого металла при сливе в ковш;
- потерь тепла, аккумулированного футеровкой ковша;
- потерь тепла конвекцией и излучением от кожуха ковша;
- потерь тепла излучением с зеркала металла в ковше, покрытого шлаком;
- потерь тепла при легировании и других технологических операциях.

Потери тепла струей жидкого металла. Тепловые потери струи жидкого металла во время выпуска определялись по методике из [46]. При сливе металла в ковш через эркерное выпускное отверстие струя металла теряет тепло излучением по закону Стефана-Больцмана, причем открытая часть струи обменивается теплом с окружающей средой, а закрытая – с нагретой футеровкой ковша. Таким образом, выражения для определения потерь тепла открытой и закрытой частью струи можно описать следующими формулами:

$$Q_{\text{откр.стр}} = \varepsilon_{\text{м}} \sigma_0 (T_{\text{м}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4) \cdot f_{\text{откр.стр}}, \text{ Вт} \quad (5.1)$$

Площадь поверхности открытой части струи, если считать ее цилиндрической с радиусом основания, равным радиусу выпускного отверстия печи:

$$f_{\text{откр.стр}} = 2\pi r h_{\text{откр.стр}}, \text{ м}^2 \quad (5.2)$$

где $h_{\text{откр.стр}}$ - высота открытой части струи, 0,3 м.

Тепловой поток закрытой части струи:

$$Q_{\text{закр.стр}} = \varepsilon_{\text{м-ф}} \sigma_0 (T_{\text{м}}^4 - T_{\text{ф}}^4) \cdot f_{\text{закр.стр}}, \text{ Вт} \quad (5.3)$$

где $\varepsilon_{\text{м-ф}}$ - приведенная степень черноты металла и футеровки, определяемое выражением $\left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{м}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ф}}} - 1\right)^{-1}$.

Площадь закрытой части струи меняется по мере заполнения ковша металлом:

$$f_{\text{закр.стр}} = 2\pi r h_{\text{закр.стр}}(\tau), \text{ м}^2 \quad (5.4)$$

Изменение массы металла находили по выражению из [87]:

$$M = M_0 - \frac{\rho \pi R_0}{2} \cdot \frac{\left(2\pi R_0^2 \frac{M_0}{\rho} - \sqrt{\left(4 \frac{M_0}{\pi R_0^2 \rho} + 2h\right) \pi^2 R_0^2 \sqrt{2} \tau \mu r^2 \sqrt{g} + \tau^2 \mu^2 \pi^2 r^4 g}\right)}{\pi^2 R_0^2}, \text{ кг} \quad (5.5)$$

где ρ - плотность жидкой стали, 7000 кг/м³; μ - коэффициент гидродинамического сопротивления, 0,82; M_0 - начальная масса металла в печи, 32000 кг; R_0 - радиус на уровне откосов печи, 2 м; r - радиус выпускного отверстия, 0,06 м; h - длина выпускного отверстия, 0,3 м; τ - время от начала выпуска, с.

Соответственно, высота закрытой части струи изменяется по формуле:

$$h_{\text{закр.стр}}(\tau) = H - \frac{3 \cdot M(\tau) / \rho}{\pi (R_b^2 + R_m^2 + R_b R_m)}, \text{ м} \quad (5.6)$$

где H - высота внутренней стенки ковша, 2,2 м; R_b - больший радиус ковша, 1 м; R_m - малый радиус ковша, 0,84 м.

Тепло, аккумулированное футеровкой. Футеровка ковша (рис. 2) состоит из рабочего слоя (1), арматурного слоя (2), изоляционного слоя (3) и кожуха (4). Толщины слоев и теплофизические свойства огнеупоров приведены в табл. 2.1.

Количество тепла, аккумулированного футеровкой определяется изменением энтальпии футеровки в условиях нестационарной теплопроводности. Для описания нестационарной теплопроводности в теле без внутренних источников тепла используют уравнение Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5.7)$$

где $a = \lambda/\rho c$ – температуропроводность, характеризующая скорость изменения температуры, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – теплопроводность материала, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; c — удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; ρ — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$.

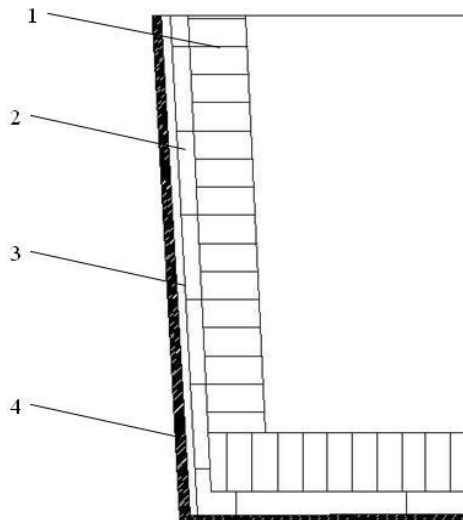


Рисунок 5.1 – Схема футеровки ковша:

1 – рабочий слой, 2 – арматурный слой, 3 – изоляционный слой, 4 – кожух.

В связи с трудностями аналитического расчета нестационарной теплопроводности часто применяются численные методы расчета, например, метод конечных разностей. Основная идея численных методов заключается в замене непрерывных функций и их производных по времени и координатам, а также в краевые условия их приближенными значениями в отдельных узлах сетки. В результате такой замены дифференциальная краевая задача сводится к системе алгебраических уравнений относительно искомых параметров в узлах и ячейках сетки [88].

Существующие схемы аппроксимации делятся на явные, когда все производные по координате в уравнении переноса записываются на «старом» $(k-1)$ -м временном слое с известным распределением переносимого параметра T , и неявные, когда все производные по координате в этом уравнении записываются на «новом» k -м временном слое с известным распределением T .

Для решения задачи нестационарной теплопроводности в футеровке ковша была выбрана явная схема ввиду её простоты и надежности [88]. Аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности по явной схеме приведена в формуле:

$$\frac{T_{i,k+1}-T_{i,k}}{h_\tau} = a \frac{T_{i+1,k}-2T_{i,k}+T_{i-1,k}}{h_x^2} \quad (5.8)$$

из которой получаем выражение для температуры:

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} \left(1 - \frac{2ah_\tau}{h_x^2} \right) + \frac{ah_\tau}{h_x^2} (T_{i+1,k} - T_{i-1,k}) \quad (5.9)$$

Для решения конкретной задачи нестационарной теплопроводности необходимо знать начальное распределение температуры по слоям стенки и задать граничные условия.

Определение начальных условий. Свежезафутерованные ковши на ГУП «ЛПЗ» подвергаются 12-часовой сушке и последующему 6-часовому подогреву, следовательно, можно допустить, что тепловое состояние ковша после этих операций близко к стационарному. Поэтому для определения начального распределения температуры была разработана модель стационарного теплообмена. За основу была взята методика из [9]. Стационарный тепловой режим описывается уравнением:

$$q = \frac{T - T_{o.c.}}{1/\alpha + s_1/\lambda_1 + \dots + s_n/\lambda_n}, \text{ Вт/м}^2 \quad (5.10)$$

где T – температура горячего слоя футеровки, К; $T_{o.c.}$ – температура окружающей среды, К; s_n – толщина n -го слоя футеровки, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Так как коэффициент теплоотдачи α и теплопроводность материалов λ_n зависят от неизвестных температур кожуха и температуры слоев футеровки, для нахождения теплового потока q был применен метод итераций.

Определение граничных условий. На границе раздела футеровка/металл использовалось граничное условие 1-го рода:

$$T_{x=0} = T_m \quad (5.11)$$

где T_m – температура металла, °С.

Чтобы определить адекватность такого допущения, с помощью комплексной CFD-модели температура горячей стенки футеровки была сравнена со средней температурой металла в ковше во время выдержки. Результаты приведены на рис. 5.2. Видно, что уже через 1-2 минуты после наполнения ковша металлом температуры горячей стенки и металла практически сравниваются. Разница в 10-20 °С для температуры горячей стенки не является существенной, поэтому ею можно пренебречь.

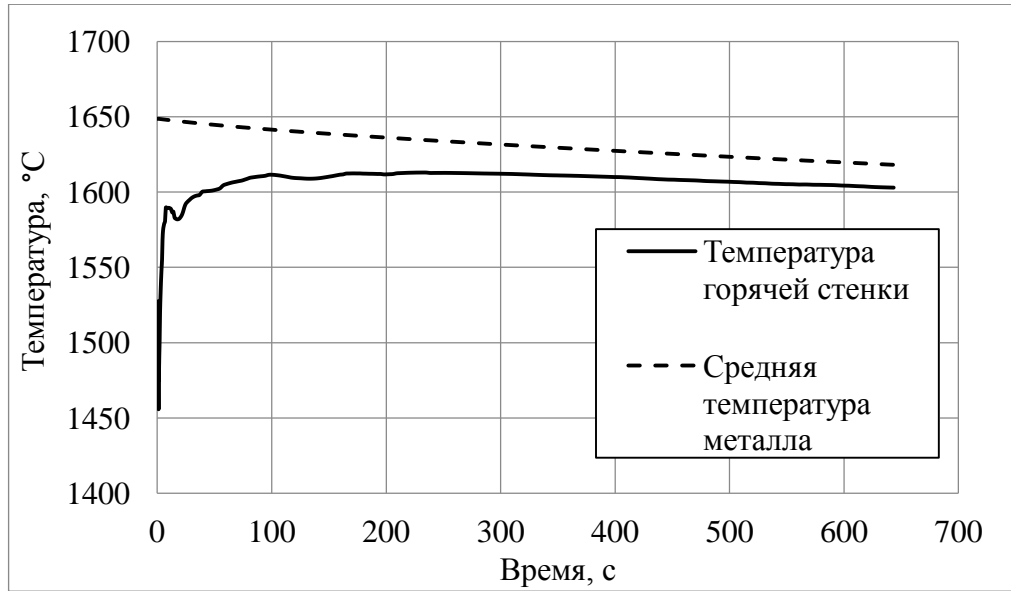


Рисунок 5.2 – Сравнение расчетных температур металла и горячей стенки футеровки ковша

Температуру на границе раздела слоев футеровки определяли по граничным условиям 4-го рода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n_1} = \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n_2} \quad (5.12)$$

что в конечно-разностном виде будет выглядеть как:

$$\lambda_1 \frac{T_N - T_{N-1}}{h_{x_1}} = \lambda_2 \frac{T_{N+1} - T_N}{h_{x_2}} \quad (5.13)$$

Для определения температуры кожуха использовали граничное условие 3-го рода, с учетом конвекции и излучения:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{\Sigma} (T_N - T_{o.c.}) \quad (5.14)$$

И в конечно-разностном виде:

$$\lambda \frac{T_N - T_{N-1}}{h_{x_1}} = \alpha_{\Sigma} (T_N - T_{o.c.}) \quad (5.15)$$

где α_{Σ} – коэффициент теплоотдачи, учитывающий потери от конвекции и излучения, $\alpha_{\Sigma} = \alpha_k + \alpha_u$, Дж/(м²·К).

$$\alpha_k = k^4 \sqrt{T_{кож} - T_{o.c.}} = k \Delta T^{0,25}, \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (5.16)$$

где $k \approx 1,6$ для горизонтальной теплоотдающей поверхности, обращенной вниз; $k \approx 2,6$ для вертикальной поверхности; $k \approx 3,3$ для горизонтальной поверхности, обращенной вверх [77].

Радиационную составляющую α_u коэффициента теплоотдачи α_{Σ} определяют по плотности лучистого потока:

$$\alpha_u = \varepsilon \sigma_0 \frac{(T_{кож}^4 - T_{o.c.}^4)}{(T_{кож} - T_{o.c.})}, \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (5.17)$$

где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты кожуха.

Определение энтальпии футеровки и тепловых потерь. Зная начальное и конечное распределение температуры по слоям футеровки, можно определить тепловую энергию, аккумулированную футеровкой ΔH_ϕ как сумму изменений энтальпии каждого i -го слоя:

$$\Delta H_\phi = \sum_{i=1}^n [c_p \rho V_i (T_k - T_n)], \text{ Дж} \quad (5.18)$$

где $V_i = h_{xi} \cdot F_\phi$ – объем материала i -го слоя футеровки, м^3 ; F_ϕ – площадь поверхности футеровки ковша, м^2 .

Ввиду различий футеровки стенки и днища ковша, тепловые потери, связанные с ними, рассчитывались отдельно.

Потери тепла излучением от шлака. Для определения теплового потока излучением от шлака использовалось уравнение:

$$q_{\text{шл}} = \varepsilon \sigma_0 (T_{\text{шл}}^4 - T_{\text{о.с.}}^4) = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{шл}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{о.с.}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (5.19)$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа излучения черного тела.

Саму температуру шлака находили по модели нестационарной теплопроводности, описанной выше. Толщину слоя шлака приняли равной 50 мм, согласно ТИ 70067945 ЭСПЦ-01-2008 «Выплавка стали в 30-тонной дуговой печи».

Тепловые потери через шлак определялись по формуле (5.20):

$$Q_{\text{шл}} = q_{\text{шл}} \cdot F_{\text{шл}}, \text{ Дж} \quad (5.20)$$

где $F_{\text{шл}}$ – площадь слоя шлака, м^2 .

Потери тепла при легировании. Тепло, выделяемое или поглощаемое при нагреве и плавлении легирующих определяли по формуле [89]:

$$Q_{\text{лег}} = K_T \cdot m_{\text{лег}} \cdot c_M, \text{ Дж} \quad (5.21)$$

где K_T – коэффициент, определяющий изменение температуры при введении 1 кг материала в одну тонну металла; c_M – удельная теплоемкость стали, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

5.1.2 Реализация модели

Для реализации модели был использован пакет Visual Basic for Applications (VBA) для Microsoft Excel. Отдельно была разработана программа для расчета распределения температуры при стационарном режиме. Исходными данными для нее были толщина и тепловые свойства огнеупоров, а также максимальная температура нагрева. Результаты расчета заносились в основную программу как исходные данные. Кроме этого, в основную программу требуется ввести начальную температуру расплава (температура выпуска), количество введенных ферросплавов и раскислителей, а также длительность всех периодов работы ковша (рис. 5.3).

Рисунок 5.3 – Окно ввода исходных данных для модели

На каждом шаге по времени h_t рассчитываются общие тепловые потери по формуле:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{стр}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{лег}} + Q_{\text{кож}}, \text{ Дж}, \quad (5.22)$$

после чего определяется снижение температуры расплава:

$$\Delta T_M = \frac{Q_{\text{общ}}}{c_m \cdot M}, \text{ К} \quad (5.23)$$

После этого пересчитываются все зависимые от температуры переменные, такие как коэффициент теплоотдачи α_{Σ} и теплопроводности огнеупорных материалов λ_i .

Расчет для каждого периода ведется до тех пор, пока не достигается заданная длительность этого периода. После этого счетчик времени обнуляется и начинается расчет для следующего периода. После расчета последнего периода (подогрев ковша на стенде нагрева) цикл повторяется снова, но с учетом рассчитанного теплового состояния ковша до тех пор, пока не будет достигнута заданное количество наливов ковша. При этом выдается отчет, включающий конечную температуру расплава, слоев футеровки стенки и днища ковша и шлака, а также общие потери тепла ванны.

5.1.3 Верификация модели

Адекватность прогнозной тепловой модели ковша проверялась по тем же данным, что и адекватность комплексной CFD-модели (см. гл. 2.7.4). Температура футеровки подбиралась путем изменения длительности межплавочного периода. В табл. 5.1 приведены результаты расчетов и измерений, а на рис. 5.4 показана зависимость между ними. Видно, что расчетное снижение температуры металла в ковше, полученное из модели очень близко к фактическим данным, о чем говорит высокий коэффициент детерминации R^2 и практически полное совпадение аппроксимирующей и идеальной прямых. В целом, 53 % производственных данных попадают в интервал $\pm 5^\circ\text{C}$, 76 % попадают в интервал $\pm 7^\circ\text{C}$, в интервал $\pm 10^\circ\text{C}$ (штриховые линии на рис. 5.3) попадают 100 % точек.

Таблица 5.1 – Результаты измерений и модельных расчетов

№ плавки	$T_{\text{акп}},$ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{дсп}},$ $^\circ\text{C}$	Выдержка, мин	$T_{\text{фут}},$ $^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{факт}},$ $^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{расч}},$ $^\circ\text{C}$
131716	1523	1650	62	775	127	128,06
131717	1524	1643	56	825	119	112,80
131718	1522	1660	48	775	120	118,60
131720	1615	1674	6	875	59	53,11
131721	1592	1663	9	925	71	61,14
131722	1599	1660	9	925	61	61,14
132004	1555	1638	27	825	83	86,63
132005	1527	1622	38	800	95	98,25
132006	1535	1611	38	1000	76	76,40
132007	1537	1615	31	875	78	85,80
132008	1524	1624	46	950	100	102,38
132009	1538	1613	39	975	75	81,27
132010	1541	1640	37	925	99	98,51
132011	1518	1615	37	875	97	98,51
132029	1562	1625	16	1075	63	58,71
132030	1552	1640	26	835	88	85,30
132031	1548	1608	9	1025	60	51,53
132032	1588	1627	9	975	39	46,57
132033	1580	1616	7	975	36	43,73
132034	1566	1615	6	925	49	47,94
132035	1526	1611	32	950	85	80,95
132036	1547	1614	21	975	67	66,94

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о высокой точности предложенной модели. Это связано с тем, что модель учитывает все виды тепловых потерь, включая потери струи металла, а также позволяет точно рассчитать тепловое состояние

футеровки ковша перед выпуском в него плавки. Таким образом, с помощью предложенной модели можно с точностью ± 10 °С прогнозировать температуру металла в ковше в течение выдержки металла в ковше, а также при постановке под крышку АКП. Еще одним важным применением модели может быть расчет оптимальной температуры выпуска металла из ДСП. Зная необходимую температуру металла перед обработкой на АКП (для СтЗсп находится в интервале 1570-1580 °С, но не менее 1550 °С согласно ТИ 70067945-ЭСПЦ-02-2008) и примерное время выдержки металла в ковше можно определить оптимальную (минимальную) температуру выпуска металла из ДСП, при которой металл на АКП не охладится ниже определенного уровня. Таким образом отпадет необходимость перегрева полупродукта в ДСП.

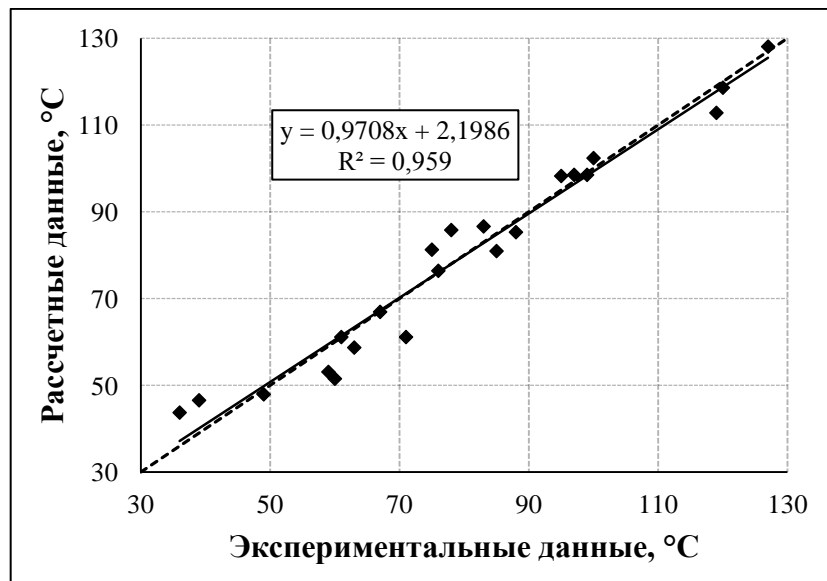


Рисунок 5.4 – Сравнение экспериментальных и расчетных температур (сплошная – аппроксимирующая прямая, пунктир – прямая идеального совпадения расчетных и фактических данных)

5.2 Разработка статистических моделей усвоения кремния и марганца при ковшовой обработке стали

Для решения задачи обеспечения стабильного химического состава металла и рационального расхода легирующих используются математические регрессионные модели для прогнозирования конечного содержания элемента в металле. Их достоинством, в отличие от физико-химических моделей, является отсутствие сложных математических вычислений и точность, удовлетворяющая требованиям к прогнозированию химического состава стали. К недостаткам регрессионных моделей можно отнести их привязанность к определенной технологии выплавки и внепечной обработки стали, а значит, невозможность применить полученные зависимости для других условий производства. Но в условиях мини-завода этот

недостаток не является существенным, т.к. такие заводы характеризуются ориентированностью на небольшое количество видов продукции, в частности на арматуру, т.е. технология выплавки остается практически неизменной.

Целью настоящей работы являлась разработка регрессионных моделей, характеризующих изменение содержания легирующих элементов (марганца и кремния) во время внепечной обработки стали.

5.2.1 Обработка данных

Для анализа использовались паспорта плавов, проведенных на ГУП «Литейно-прокатный завод» в г. Ярцево Смоленской области.

В паспортах плавов были представлены следующие параметры внепечной обработки:

- состав полупродукта перед выпуском из ДСП, а также химсостав стали в процессе обработки на АКП;
- температура полупродукта стали в ДСП перед выпуском и стали на АКП;
- вес плавки в стальковше на стелевозе ДСП после выпуска;
- масса и тип присадок в ковш на выпуске и на АКП;
- расход аргона на перемешивание плавки в ковше;
- расход электроэнергии на АКП;
- время обработки плавки;
- вес непрерывно-литой заготовки (НЛЗ)
- количество обреза, недомеров, брака, остатков из промковша и стальковша

Данные из паспортов плавов были занесены в программу MS Excel и с их использованием были рассчитаны следующие показатели:

- 1) изменение содержания Si и Mn в стали;
- 2) коэффициенты усвоения Si и Mn на разных стадиях обработки.

Коэффициенты усвоения Si, Mn на разных стадиях обработки каждой плавки рассчитывали по упрощенной формуле (5.1), в которой не учитывали изменение массы стали при легировании:

$$K_y = \frac{M \cdot ([\text{Э}]_{\text{кон}} - [\text{Э}]_{\text{нач}})}{Q_{\text{фс}} \cdot \% \text{ Э}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

где M – масса металла в ковше, M = 29-34 т.

$[\text{Э}]_{\text{нач}}$ – содержание марганца и кремния в полупродукте перед обработкой на АКП (проба с ДСП). $[\text{Mn}]_{\text{н}}=0,03-0,1 \%$, $[\text{Si}]_{\text{н}}=0,001-0,01 \%$.

$[Э]_{кон}$ – содержание марганца и кремния в стали после обработки на АКП (последняя проба с АКП или первая проба с МНЛЗ). $[Mn]_к=0,4-0,9 \%$, $[Si]_к=0,16-0,21 \%$.

$Q_{фс}$ – масса вводимых ферросплавов (МnC17, ФC65, ЗФС-62). $Q_{МnC17}=250-350$ кг, $Q_{ФC65}=0-150$ кг, $Q_{ЗФС-62}=125-250$ кг.

$\% Э$ – содержание элемента в ферросплаве (табл. 5.2). Для расчетов принято, следующее содержание элементов в ферросплавах, $\%$ масс.: $[Mn]_{МnC17}=65$, $[Si]_{МnC17}=17$, $[Si]_{ФC65}=65$, $[Si]_{ЗФС-62}=62$.

Таблица 5.2 – Химический состав ферросплавов, $\%$ (масс.)

	C	Si	Mn	S	P
МnC17 (ГОСТ 4156-91)	2,5	15-20	65	0,02	0,1
ЗФС-62 (ТУ 398900-005-82389246-2010)	22 - 28	62 - 67	-	-	-
ФC65 (ГОСТ 1415-93)	0,1	63 - 68	0,4	0,02	0,01

Для расчетов коэффициентов усвоения элементов, а также для определения удельных расходов ферросплавов необходимо знать массу металла в ковше. Ковш взвешивается только один раз после выпуска, но из-за неполной отсечки шлака измеренный вес металла может быть не точен. Количество печного шлака, попавшего в ковш во время выпуска из-за неполной отсечки можно примерно рассчитать, составив материальный баланс марганца.

$$([Mn]_{кон} - [Mn]_{нач}) \cdot M = Q_{МnC17} \cdot \%Mn + M_{шл} \cdot \%MnO \cdot \frac{55}{71} \quad (5.2)$$

Для определения состава печного шлака использовали спектральный атомно-эмиссионный метод с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП). Результаты анализа представлены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты химического анализа печного шлака ГУП «ЛПЗ»

Проба	Al	Ca	Fe	Mg	Mn	P
1	4,07	11,50	32,40	5,81	4,51	0,13
2	3,87	10,50	36,70	5,20	4,29	0,11

По данным химанализа в печном шлаке ГУП «ЛПЗ» содержится около 5 $\%$ (масс.) MnO , что соответствует литературным данным [90]. Расчетное количество печного шлака, попавшего в ковш составляет от 0 до 900 кг со средним значением 200 кг.

Также масса металла меняется во время обработки стали на АКП из-за ввода ферросплавов и раскислителей. В других работах предлагается заменять массу жидкой стали на массу НЛЗ с учетом потерь при разливке, но в нашем случае все потери измеряются только для последней плавки в серии. Поэтому, с учетом малого количества ферросплавов, вводимых

непосредственно на АКП, можно принять массу жидкой стали равной массе полупродукта на выпуске.

При расчете коэффициентов усвоения на выпуске и на АКП выяснилось, что результаты лежат в широких интервалах и по ним нельзя судить об усвоении элементов (табл. 5.4). Это объясняется тем, что на выпуске кремний и марганец окисляются и переходят в шлак, а во время его нагрева и раскисления на АКП эти элементы восстанавливаются, поэтому коэффициенты недостоверны. Было решено использовать сквозные коэффициенты усвоения, т.к. они более точно описывают усвоение элементов с технологической (практической) точки зрения. На рис. 5.5 приведены гистограммы сквозных коэффициентов усвоения кремния и марганца.

Таблица 5.4 – Коэффициенты усвоения марганца и кремния на разных стадиях внепечной обработки стали

Технологические операции	Mn	Si
Выпуск		
Среднее значение K_y	0,81	0,44
Доверительный интервал (уровень значимости 95%)	$\pm 0,03$	$\pm 0,025$
Обработка на АКП		
Среднее значение K_y	2,53	0,30
Доверительный интервал (уровень значимости 95%)	$\pm 0,4$	$\pm 0,065$
Сквозной		
Среднее значение K_y	1,01	0,42
Доверительный интервал (уровень значимости 95%)	$\pm 0,015$	$\pm 0,016$

Среднее значение сквозного коэффициента усвоения марганца примерно равно 100 %, что соответствует данным, приведенным в литературе, а также в ТИ «Обработка металла на установке “ковш-печь”» ГУП «ЛПЗ». Это подтверждает предположение о том, что марганец почти полностью восстанавливается из шлака во время обработки на АКП, в то время как кремний, как элемент, имеющий большее сродство к кислороду, восстанавливается в меньшей степени.

Для анализа эффективности усвоения легирующих было решено использовать не коэффициент усвоения материала (K_y), а величину изменения содержания элемента в металле ($\Delta\mathcal{E}$, % масс.). Такой выбор был сделан исходя из следующих причин. Во-первых, из формулы (5.1) видно, что коэффициент усвоения зависит от таких параметров процесса, как масса жидкого металла, количества ферросплава и содержание элемента в металле. Все эти параметры имеют собственные ошибки измерения, которые в результате вычисления коэффициента усвоения складываются, что дает большую ошибку, в то время как $\Delta\mathcal{E}$ зависит

только от содержания элемента в металле. Во-вторых, K_y также зависит от содержания легирующего элемента в ферросплаве, величина которого изменяется в зависимости от партии ферросплава, и не может быть точно определена.

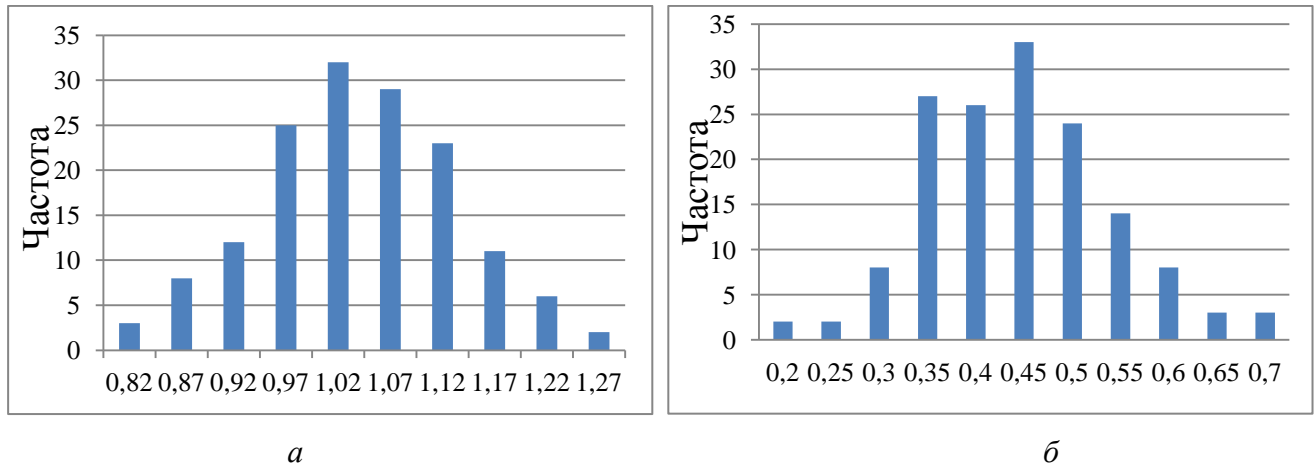


Рисунок 5.5 – Гистограммы распределения сквозных коэффициентов усвоения марганца (а) и кремния (б)

5.2.2 Разработка регрессионных моделей

Для определения взаимосвязи между параметрами процесса и изменением концентрации элемента в стали был использован многофакторный регрессионный анализ, который заключается в определении аналитического выражения связи между зависимой случайной величиной Y и независимыми случайными величинами X_1 , X_2 и т.д. Форма их связи есть уравнение регрессии вида $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$ [91].

Параметры уравнения регрессии определяются с помощью метода наименьших квадратов. Сущность его заключается в нахождении параметров (коэффициентов) модели, при которых минимизируется сумма квадратов отклонений эмпирических значений результативного признака от теоретических, полученных по выбранному уравнению регрессии. Для анализа общего качества уравнения линейной многофакторной регрессии используется множественный коэффициент детерминации R^2 . Он определяет долю вариации результативного признака, обусловленную изменением факторных признаков, входящих в многофакторную регрессионную модель [92].

Из 138 обработанных плавов были удалены явные выбросы по правилу « 3σ ». Стоит отметить большое число выбросов (около 30 %). Причиной этого может быть невысокая точность фиксируемых значений параметров технологии или неучтенные факторы технологии. После этого оставшиеся 93 плавки были аппроксимированы линейными уравнениями регрессии. Для создания регрессионной модели был использован пакет статистической

обработки данных SPSS Statistics. В качестве зависимых переменных использовались изменения содержания марганца и кремния в металле (ΔMn , ΔSi , % масс.). Независимыми переменными выступали параметры процесса внепечной обработки, а именно удельные расходы раскислителей, легирующих и шлакообразующих материалов, подаваемых в ковш, а также параметры процесса, влияющие на восстановление элементов из шлака, такие как расход аргона и время обработки стали на АКП. Регрессионные модели, полученные с помощью пакета SPSS, представлены в табл. 5.4-5.6.

В табл. 5.5 приведены коэффициенты корреляции, коэффициенты детерминации и стандартные ошибки оценки. В табл. 5.6 показаны результаты дисперсионного анализа моделей, такие как суммы квадратов отклонений, числа степеней свободы, значения F-критерия Фишера и их значимость (Знч.), которые использовались для проверки их адекватности. Табл. 5.7 содержит значения коэффициентов регрессии и их статистические оценки: стандартные ошибки коэффициентов, расчетные значения t-критерия и их значимость.

Таблица 5.5 – Сводка для моделей

Модель*	R	R-квадрат	Скорректированный R-квадрат	Стд. ошибка оценки
1	0,951	0,905	0,894	0,016707
2	0,885	0,783	0,760	0,010181

Примечание: 1 – модель изменения содержания марганца, 2 – модель изменения содержания кремния

Таблица 5.6 – Дисперсионный анализ

Модель		Сумма квадратов	ст.св.	Средний квадрат	F	Знч.
1	Регрессия	0,220	9	0,024	87,435	0,000
	Остаток	0,023	83	0,000		
	Всего	0,243	92			
2	Регрессия	0,031	9	0,003	33,306	0,000
	Остаток	0,009	83	0,000		
	Всего	0,040	92			

Для проверки адекватности построенных моделей провели проверку статистической значимости коэффициента детерминации R^2 на основе F-критерия Фишера:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} \quad (5.3)$$

где n – число наблюдений;

m – число факторов в уравнении регрессии.

Если расчетное значение F превышает критическое значение распределения критерия Фишера, уравнение считается значимым. Расчетные значения F-критерия приведены в табл. 5.6

и равняются 87,435 и 33,306 для моделей изменения концентрации марганца и кремния, соответственно. $F_{кр} = 1,994709$ нашли с помощью MS Excel. $F_{расч} > F_{кр}$ следовательно обе модели адекватны.

Таблица 5.7 – Коэффициенты уравнения регрессии и их статистические оценки

Модель		Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты		
		В	Стд. Ошибка	Бета	t	Знч.
1	(Константа)	0,163	0,019		8,601	0,000
	CaO	-0,002	0,000	-0,185	-4,914	0,000
	MgO	0,007	0,001	0,266	7,559	0,000
	FeSi	0,010	0,003	0,153	3,674	0,000
	ЗФС	0,021	0,003	0,277	6,061	0,000
	Al	0,027	0,006	0,172	4,403	0,000
	время_обр	-5,707E-5	0,004	0,000	-0,013	0,989
	Ar	0,015	0,012	0,068	1,180	0,241
	SiAl	-7,378E-5	00,001	-0,002	-0,063	0,950
	SiMn	0,032	,002	0,696	15,827	0,000
2	(Константа)	0,140	0,011		12,330	0,000
	SiMn	0,006	0,001	0,321	4,867	0,000
	зфс	0,004	0,002	0,134	2,054	0,043
	FeSi	-0,018	0,002	-0,694	-10,889	0,000
	Al	0,000	0,004	-0,010	-0,160	0,873
	SiAl	0,006	0,001	0,471	8,193	0,000
	CaO	0,000	0,000	0,034	0,614	0,541
	MgO	0,000	0,001	-0,058	-1,089	0,279
	Ar	0,002	0,006	0,022	0,302	0,763
	время_обр	-0,002	0,002	-0,070	-0,969	0,335

Значения t для всех коэффициентов уравнений регрессии приведены в табл. 5.7. Полученные значения сравнивали с критическим значением t -критерия, которое определялось при помощи MS Excel. $t_{кр}=1,99$. Так как значения t -критерия для коэффициентов при удельных расходах силикоалюминия и аргона, а также длительности обработки стали на АКП в модели изменения концентрации марганца не попадают в критический интервал $(-\infty; -1,99) \cup (1,99; +\infty)$, то эти коэффициенты являются не значимыми, а значит должны быть удалены из уравнения регрессии. Для модели изменения концентрации кремния в критический интервал не попадают значения t -критерия для коэффициентов при удельных расходах алюминия, извести, магнезита, аргона, а также длительности обработки стали на АКП.

После исключения незначимых параметров получили новые регрессионные модели для нахождения ΔMn и ΔSi . Краткая сводка для них приведена в табл. 5.8 и 5.9.

Таблица 5.8 – Сводка для итоговой модели изменения концентрации марганца

R^2		0,900
Коэффициенты уравнения регрессии	Уд. расход MnC17, кг/т	0,032
	Уд. расход ЗФС-62, кг/т	0,020
	Уд. расход Al, кг/т	0,028
	Уд. расход MgO, кг/т	0,008
	Уд. расход CaO, кг/т	-0,002
	Уд. расход ФС-65, кг/т	0,010
	Константа	0,164

Таблица 5.9 – Сводка для итоговой модели изменения концентрации кремния

R^2		0,775
Коэффициенты уравнения регрессии	Уд. расход MnC17, кг/т	0,006
	Уд. расход ЗФС-62, кг/т	0,004
	Уд. расход силикоалюминия, кг/т	0,006
	Уд. расход ФС-65, кг/т	-0,018
	Константа	0,136

Получены следующие уравнения регрессии:

$$\Delta[Mn] = 0,032 \cdot m_{MnC17} + 0,020 \cdot m_{ЗФС-62} + 0,028 \cdot m_{Al} + 0,008 \cdot m_{MgO} - 0,020 \cdot m_{CaO} + 0,010 \cdot m_{ФС-65} + 0,164 \quad (5.5)$$

$$\Delta[Si] = 0,006 \cdot m_{MnC17} - 0,018 \cdot m_{ФС-65} + 0,004 \cdot m_{ЗФС-62} + 0,006 \cdot m_{SiAl} + 0,136 \quad (5.6)$$

Для наглядности построили зависимости расчетных значений изменения концентрации элементов от фактических (рис. 5.6 и 5.7).

Коэффициенты детерминации для данных зависимостей составляют 0,9 и 0,78 соответственно, а при значениях $R^2 > 0,7$ считается, что вариация результативного признака Y обусловлена в основном влиянием включенных в регрессионную модель факторов X . Также стандартные ошибки оценки для обеих моделей не превышают точность определения концентрации элементов в металле, равную по данным ЦЗЛ ГУП «ЛПЗ» 0,03. В работе [93] авторы получили схожие зависимости для марганца и кремния с коэффициентами детерминации 0,81 и 0,74 соответственно. Более высокая точность настоящих моделей возможно связана с тем, что авторы работы [93] не учитывали влияние раскислителей и шлакообразующих на усвоение элементов из ферросплавов.

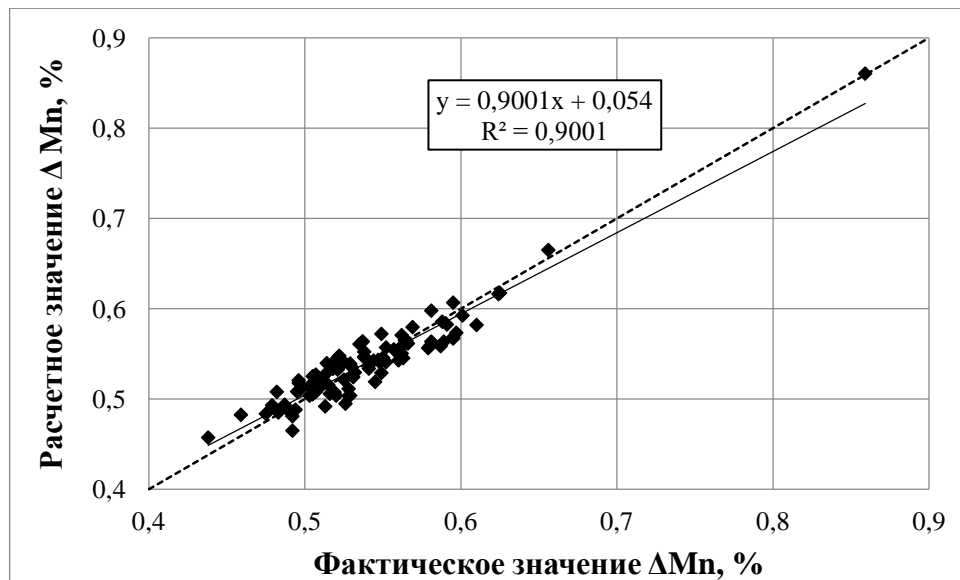


Рисунок 5.6 – Соотношение расчетного и фактического значений изменения содержания марганца (сплошная – аппроксимирующая прямая, пунктир – прямая идеального совпадения расчетных и фактических данных)

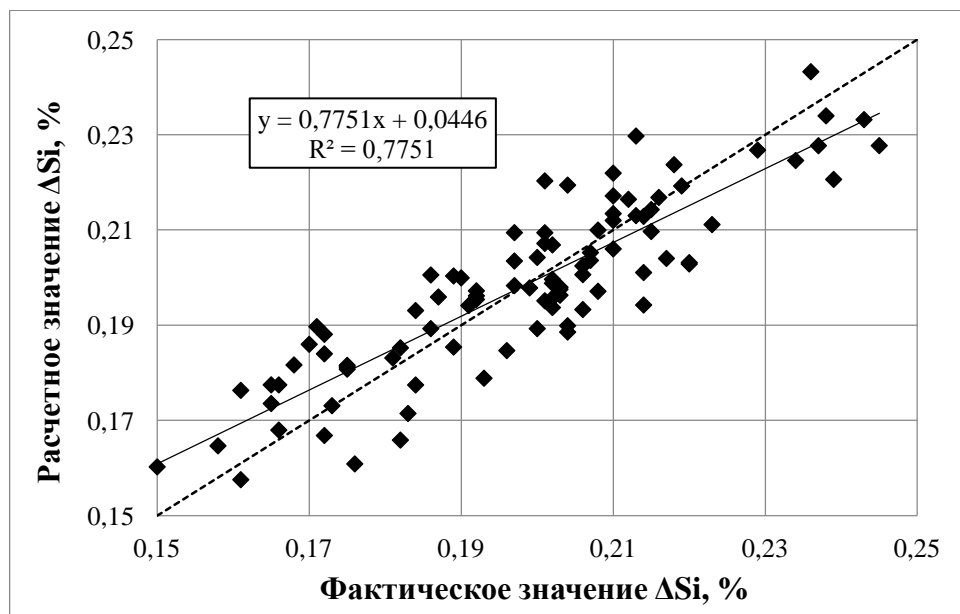


Рисунок 5.7 – Соотношение расчетного и фактического значений изменения содержания кремния (сплошная – аппроксимирующая прямая, пунктир – прямая идеального совпадения расчетных и фактических данных)

Полученные модели удовлетворяют требованиям по точности, адекватности опытным данным и простоте использования, а значит уравнениями регрессии можно воспользоваться при разработке режима раскисления и легирования стали на ГУП «ЛПЗ».

5.2.3 Исследование влияния параметров внепечной обработки на усвоение кремния и марганца

Для технологических расчетов также важно знать, какой фактор сильнее других влияет на изменение концентрации элемента. Это позволит определить наиболее эффективный путь для увеличения концентрации элемента в готовом сплаве при уменьшении количества введенных материалов.

Определить это влияние можно рассчитав коэффициенты эластичности, которые показывают, какой фактор по абсолютному приросту оказывает наибольшее влияние на изменение концентрации элемента. Коэффициент эластичности вычисляется по формуле (5.7):

$$\mathcal{E}_{x_i} = a_i \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}} \quad (5.7)$$

где \bar{x}_i - среднее значение соответствующего факторного признака;

\bar{y} - среднее значение результативного признака;

a_i - коэффициент регрессии при соответствующем факторном признаке.

Рассчитанные коэффициенты эластичности для обеих моделей приведены в табл. 5.10. Влияние каждого из параметров представлено на рис. 5.8 и 5.9 для Mn и Si, соответственно.

Таблица 5.10 – Расчетные коэффициенты эластичности

Технолог. параметр	SiMn	зфс	FeSi	Al	SiAl	CaO	MgO	Ar	T _{обр}
Mn	0,489	0,145	0,028	0,052	-	-0,070	0,054	-	-
Si	0,239	0,087	-0,147	-	0,135	-	-	-	-

Видно, что наибольшее влияние на ΔMn оказывает количество введенного силликомарганца. На втором месте стоит удельный расход ЗФС-62, что можно объяснить защитным действием кремния при усвоении марганца на выпуске. По той же причине на усвоение марганца влияет и алюминий. Отрицательное влияние добавок извести можно объяснить снижением активности MnO в шлаке из-за уменьшения его концентрации. Это приводит к снижению степени восстановления марганца из шлака.

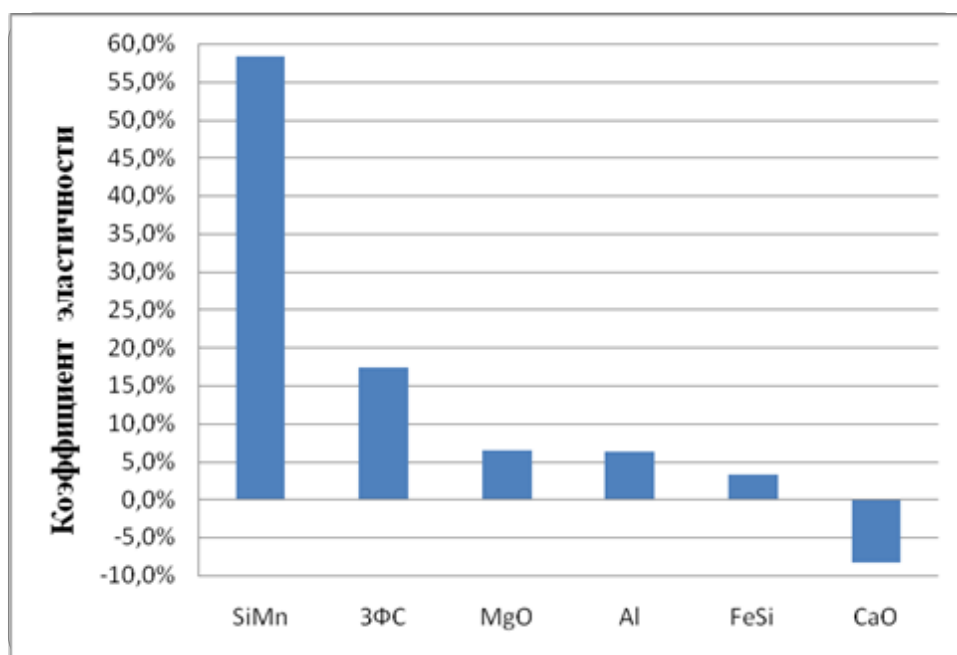


Рисунок 5.8 – Влияние технологических факторов на изменение содержания марганца

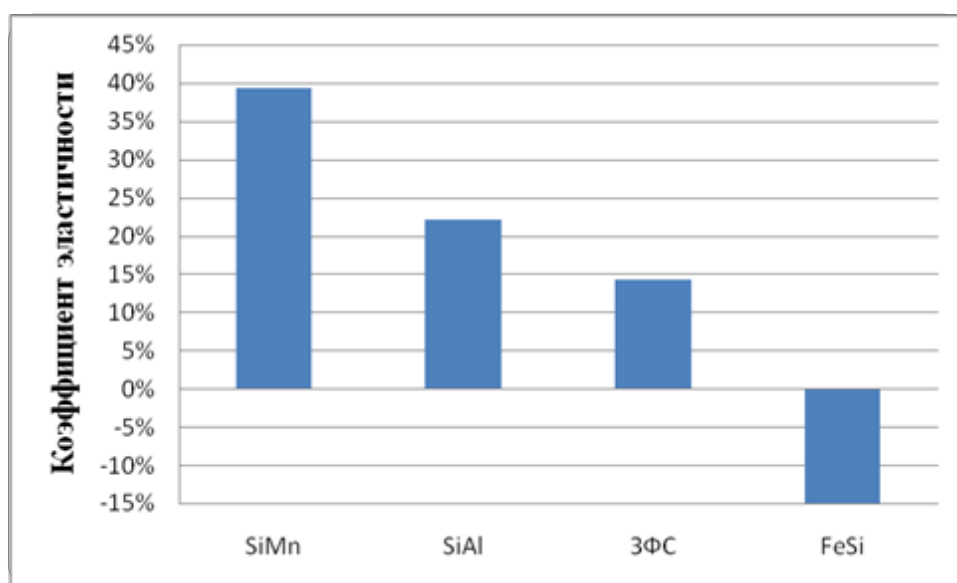


Рисунок 5.9 – Влияние технологических факторов на изменение содержания кремния

На усвоение кремния большее влияние также оказывает удельный расход силикомарганца, а также количество алюминиевого порошка – раскислителя шлага. Это объясняется тем, что, как уже было отмечено выше, кремний восстанавливается из шлага во время обработки на АКП. Интересно, что увеличение расхода ферросилиция снижает усвоение кремния. Предположительно, это связано с обратной зависимостью между этими параметрами, т.е. в данном случае расход ферросилиция является зависимой переменной, а изменение концентрации кремния – независимой. Например, на выпуске кремний из-за неучтенных факторов усвоился плохо, и поэтому мастер на АКП добавил большее количество

ферросилиция. Для подтверждения этого предположения был определен коэффициент корреляции Пирсона между изменением концентрации кремния на выпуске и количеством ферросилиция, поданного на АКП. Коэффициент равнялся -0,819, что показывает высокую тесноту связи между этими параметрами.

Кроме того, модели не подтвердили предположение о том, что на изменение концентрации элементов сильное влияние оказывают кинетические факторы, а именно длительность обработки стали на АКП, температура стали на выпуске и на АКП и расход аргона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью работы являлось исследование влияния конструктивных и технологических параметров внепечной обработки на тепловые потери металла в стальковше, и разработка энергосберегающего теплового режима обработки металла в стальковшах малой вместимости.

Такие задачи связаны с тем, что в ковшах малой вместимости в 1,5-2 раза возрастают тепловые потери металла по сравнению с более крупными агрегатами, а значит принятые в современной металлургии для крупных ковшей тепловые режимы внепечной обработки приводят к многочисленным проблемам, например, повышению расхода электроэнергии и снижению производительности цеха. Поэтому в работе определялись факторы, сильнее всего влияющие на тепловые потери металла в ковше. Основной упор был сделан на технологические параметры процесса внепечной обработки стали, такие как температура металла и футеровки, толщина шлака, длительность простоев, однако рассматривалось также и влияние конструкции ковша, например, толщина огнеупорной футеровки. Также большое внимание уделено процессам, происходящим при сушке и подогреве футеровки нового ковша.

В ходе работы были решены все поставленные задачи и получены следующие результаты:

1. Разработана трехмерная комплексная тепловая модель стальковша для изучения и совершенствования энергетического режима внепечной обработки стали. Исходными данными для модели являлись результаты лабораторных и промышленных экспериментов, проведенных на ГУП «ЛПЗ» и заводе «Электросталь».

2. Определена степень черноты ПУ футеровки стальковша, применение которой позволяет значительно повысить точность измерения температуры такой футеровки по сравнению с использованием данных по периклазовым огнеупорам.

3. Проведены исследования влияния параметров технологии эксплуатации ковшей, таких как толщина футеровки, температура ее нагрева, длительность межплавочного простоя на тепловые потери металла в ковше. По результатам исследования сделаны следующие выводы:

– толщина рабочего слоя слабо влияет на общие тепловые потери металла в ковше. Большее значение имеют теплофизические свойства огнеупора. Применение доломитовых огнеупоров вместо периклазоуглеродистых в футеровке рабочего слоя ковша позволит экономить до 5 кВт·ч/т стали без повышения удельных затрат на огнеупорные материалы. При этом, увеличение теплоизоляционного слоя футеровки 10 до 20 мм практически не оказывает влияние на общие тепловые потери металла в ковше, однако позволяет снизить среднюю температуру кожуха ковша с 310 до 250 °С;

– покровные шлаки толщиной свыше 25 мм значительно снижают тепловые потери через верх ковша, однако использование теплоизоляционных крышек позволяет уменьшить тепловые потери металла (от 5 до 15 кВт·ч/т) без дополнительных затрат тепла на прогрев и плавление шлакообразующих;

– длительность межплавочного простоя ковша значительно влияет на охлаждение стали в нем. Сокращение простоя путем уменьшения ковшей в обороте, а также использование теплоизоляционной крышки в течение простоя снижает тепловые потери пустого ковша, что позволит экономить около до 5 кВт·ч/т электроэнергии за счет уменьшения перегрева металла в ДСП;

– предварительный подогрев футеровки электрическими нагревателями дает возможность уменьшить перегрев стали при выпуске из ДСП на 15-20 °С, что снижает удельный расход эл. эн. на 7-10 кВт·ч/т стали;

4. Разработан энерго- и ресурсосберегающий способ сушки футеровки ковшей с помощью электронагревателей. Новый способ позволяет на 20 % повысить стойкость рабочих огнеупоров, а также в 1,5-2 раза снизить длительность подготовки нового ковша к плавке.

5. В виде рекомендаций предложен энергосберегающий тепловой режим эксплуатации стальной ковшевой на ГУП «ЛПЗ», позволяющий снизить расход эл. эн. на 20 кВт·ч электроэнергии на т стали, что эквивалентно 10 млн руб. в год.

6. Разработаны математические модели снижения температуры металла в ковше и усвоения легирующих, способные с удовлетворительной точностью прогнозировать температуру и состав металла в ковше во время выпуска и выдержки. Полученные модели могут быть использованы в АСУТП плавки и внепечной обработки на ГУП «ЛПЗ».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Предпосылки создания металлургического производства нового типа / А. И. Целиков // Вестник АН СССР. 1983. №7. С. 25-34.
2. Актуальные проблемы создания агрегатов ковшовой обработки жидкой стали. Часть I. Обработка при атмосферном давлении / А. В. Протасов // Сталь. 2010. № 10. С. 22-28.
3. Кньюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. 2: Основы и технология ковшовой металлургии. Пер. с нем. Г. Н. Еланского. – М. : Металлургия, 1984. 414 с.
4. CMC Steel Arizona – новый микрозавод для производства конкурентоспособной арматурной стали / П. Лоско // Steel Times International на русском языке. 2011. Май. С. 4-8.
5. Temperature prediction model for controlling casting superheat temperature / Gupta N., Chandra S. // ISIJ International. 2004. Vol. 44. № 9. P. 1517 – 1526.
6. Алленштейн Й. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справочник / Й. Алленштейн и др.; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау; пер. с нем. – М.: Интермет Инжиниринг, 2010. – 392 с.
7. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики) : Справочное издание / А. А. Винтовкин и др. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 496 с.
8. Thermal modeling of the ladle preheating process / Glasser B., Gornierup M., Sichen D. // Steel Research International. 2011. Vol. 82. №12. С. 1425-1434.
9. Мастрюков Б. С. Теория, конструкция и расчеты металлургических печей. Расчеты металлургических печей: уч. для техникумов; в 2 т. –2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1986. – 2 т. – 376 с.
10. Современные установки для сушки и высокотемпературного нагрева ковшей / Чайкин Б. С., Марьянчик Г. Е., Панов Е. М. и др. // Электрометаллургия. 2006. № 4. С. 37-42.
11. Опыт работы установки для сушки и нагрева сталеразливочных ковшей / Спирин В. А., Чернавин С. Б., Александров В. Б. и др. // Сталь. 2000. № 11. С. 50-51.
12. Безчерев А.С., Горлач Н.И., Попов Ю.Н. и др. Разработка и внедрение футерованной крышки для стенов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей и новых режимов их тепловой обработки // Неделя металлов в Москве 2008. Сборник трудов конференции. М. 2009.
13. Разработка и промышленное освоение импульсного режима отопления стенов для сушки и разогрева сталеразливочных ковшей / Сушенко А. В., Носоченко О. В., Хазнаферов М. Л. и др. // Металлург. 2002. № 9. С. 45-47.
14. Горелки газовые ВЮ, ВЮА, ЗЮ: техническая информация. 2011. <http://www.kromschroeder.ru/download.php?f=9ce689102a0562316eaba26c253fcdb7> (дата обращения: 21.05.12)

15. Устройство для подогрева емкости для транспортировки жидкого металла [Текст] : пат. 2433886 Рос. Федерация : МПК⁷ В 22 D 41/015 / Шлютер Й. (Герм.) ; заявитель и патентообладатель СМС ЗИМАГ АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ. – № 2008149523/02 ; заявл. 11.05.2007 ; опубл. 20.11.2011, Бюл. № 32 ; приоритет 16.05.2006, № 102006022689.5 (Герм.).

16. Oxygen-enhanced ladle preheating systems: improved tap-to-tap cycle time and operating cost reductions / Kelly J., Dentella F., Recanati A., Visus J., Miclo E. // Iron & Steel Technology. 2011. May. P. 307-311.

17. Performance and results of Praxair's DOC technology for ladle preheating at steel mill in Japan / Cates L., Nakao T., Shimamoto T. // AISTech 2010 Conference Proceedings. 2010.

18. Энергосберегающие и экологически безопасные установки для электрической сушки и подогрева футеровки ковшей / Бершицкий И.М., Тарарышкин А.В. // Сталь. 2010. № 2. С. 24-25.

19. Ladle preheater [Текст] : пат. 4394566 США : МПК⁷ Н 05В 3/62; В 22 D 41/005 / Magnusson Klas B. O ; заявитель и патентообладатель Bulten-Kanthal Aktiebolag. – № 06316128 ; заявл. 29.10.1981 ; опубл. 19.07.1983 ; приоритет 27.11.1979, № 06097673 (США)

20. Энергосберегающие концепции футеровки ковшей / Рам К., Киршен М., Кронхалер А. // Сталь. 2009. № 9. С. 37-42.

21. Современная высокотемпературная изоляция сталеразливочных ковшей / Кононов В. А., Земсков И. И. // <http://www.teplopromproekt.ru/about/articles/sovremennaya-vysokotemperaturnaya-izolyatsiya-stalera-zlivochnykh-kovshey/> (дата обращения: 28.10.12)

22. Футеровка крышек тепловых агрегатов волокнистыми огнеупорами. ООО «Волокнистые огнеупоры»: рекламная статья. <http://masterm-vo.ru/ru/stati/71-futirovka-kryshek-teplovux-agregatov-novymi-ogneupornymi-materialami.html> (дата обращения: 24.08.12)

23. Теплоизолирующая крышка ковша [Текст] : пат. 2211112 Рос. Федерация : МПК⁷ В 22 D 41/00 / Бершицкий И. М. ; заявитель и патентообладатель Бершицкий И. М. – № 2001128012/02 ; заявл. 17.10.2001 ; опубл. 27.08.2003.

24. Transient flow and heat transfer in a steelmaking ladle during the holding period / Xia J. L., Ahokainen T. // Metallurgical and materials transactions B. 2001. Vol. 32B. August. P. 733 – 741.

25. Modeling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking / Volkova O., Janke D. // ISIJ International. 2003. Vol. 43. № 8. P. 1185 – 1190.

26. Über den Einfluss des Warmezustandes der Pfannenausmauerung und einer warmeisolierenden Abdeckung auf den Temperaturverlust der Schmelze / Rieche K., Kohn W., Wunnenberg K. // Stahl und Eisen. 1985. № 19. P. 41-46.

27. FEM Untersuchungen des thermomechanischen Verhaltens von MgO/C und Al₂O₃-Spinell im Verschleißfutter einer 120-t Pfanne / Yilmaz S., Schweiger H. F., Ozgen S. // Stahl und Eisen Special. 1997. Sept. P. 31-34.
28. Иванов Н. Н. Пути совершенствования тепловой подготовки сталеразливочных ковшей // Сталь. 1997. № 12. С. 20-24
29. Штейнберг Л.С., Гольдберг Л. А., Кузина В. И., Владимиров В. А., Чайкин Б.С. Сталь. 1995. № 11. С. 14-17.
30. Energie transport in Pfannen für die Stahlerzeugung / Pfeifer H. // Stahl und Eisen. 1997. № 12. P. 115-125.
31. Model for temperature profile estimation in the refractory of a metallurgical ladle / Fredman T. P., Saxen H. // Metallurgical and materials transactions B. 1999. Vol. 29B. June. P. 651 – 659.
32. Model based diagnosis of ladle refractory lining / Mihailov E., Petkov V. // Structural integrity and life. 2010. Vol. 10. № 2. P. 111-116.
33. Heat transfer in steelmaking ladle refractories and steel temperature: A literature review / Fredman T. P. // Scandinavian Journal of Metallurgy. 2000. № 6. P. 232-259.
34. Heat losses from liquid steel in the ladle and in the tundish of a continuous casting installation / Alberni R., Leclercq A. // Proc. of Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking, TMS, London, England. 1973. P. 157-164.
35. Ladle temperature control during continuous casting / Omotani M. A., Heaslip L. J., McLean A. // Iron and Steelmaker. 1983. № 10. P. 29-35.
36. Thermal modelling in melt shop applications: theory and practice / Morrow, G., Russell R. // Ceramic Bulletin. 1985. № 7. P. 1007-1012.
37. A Model for Predicting the Thermal History of a Ladle / Hlinka J. W., Bright D. H., Cramb A. W. // Steelmaking Conference Proceedings of ISS-AIME. 1985. Vol. 68. P. 35-47.
38. The effect of ladles refractories and practices on steel temperature control / Tomazin C. E., Upton E.A., Wallis R. A. // Iron and Steelmaker. 1986. June. P. 28-34.
39. Model for predicting steel temperature and thermal state of casting tundishes / Gastón A., Laura R., Medina M. // Ironmaking and Steelmaking. 1991. Vol. 18. P. 370-373.
40. Математическая модель тепловой работы сталеразливочного ковша / Шкляр Ф.Р., Малкин В.М., Коршунов В.А., Советкин В. Л. // Изв. ВУЗов. ЧМ. 1991. № 2. С. 91-93.
41. On-line liquid steel temperature control / Zoryk A., Reid P.M. // Iron and Steelmaker. 1993. Jun. C. 21-27.
42. Prediction of steel temperature in ladle through time/temperature simulation / Olika B., Bjorkman B. // Scandinavian Journal of Metallurgy. 1993. Vol. 22. P. 213-219.

43. Optimum ladle design for heat retention during continuous casting / Barber B., Watson G., Bowden L. // *Ironmaking & Steelmaking*. 1994. № 2. P. 150-153.
44. Бейцун С. В. Математическая модель процесса охлаждения расплава в сталеразливочном ковше // С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. Ф. Сапов. – *Металургійна теплотехніка : збірник наукових праць НМетАУ*. – Дніпропетровськ: ПП Грек О.С., 2006. – С. 8–15.
45. Влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава / Михайловский Н. В., Бейцун С. В. // *Металлургическая теплотехника : сб. научн. трудов НМетА*. 2010. Вып. 2 (17). С. 153-142.
46. Математическая модель процесса охлаждения стали в ковше малой вместимости / Белковский А. Г., Кац Я. Л. // *Металлург*. 2009. № 5. С. 32-39.
47. Thermal modeling in steel ladles / Austin P. R., O'Rourke S. L., He Q. L., Rex A. J. // *75th Steelmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA*. 1992. P. 317-323.
48. Two-dimensional dynamic simulation of the thermal state of ladles/ Fredman T. P., Torrkulla J., Saxen H. // *Metallurgical and materials transactions B*. 1999. Vol. 30B. April. P. 323 – 330.
49. Mathematical modelling of thermal stratification and drainage of steel ladles / Austin P. R., Camplin J. M., Herbertson J., Taggart I. J. // *ISIJ International*. 1992. Vol. 32. №. 2. P. 196–202.
50. Physical and mathematical modelling of thermal stratification phenomena in steel ladles / Pan Y., Bjorkman B. // *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. № 6. P. 614 – 623.
51. Development and experimental verification of a model for simulation of the fluid dynamics in a 105t steel ladle before and during casting / Pan Y., Grip C-E., Björkman, B. // *82nd Steelmaking conference proceedings: Chicago, Illinois, March 21 - 24, 1999*. P. 405-416.
52. Effect of slag cover on heat loss and liquid steel flow in ladles before and during teeming to a continuous casting tundish / Charkraborty S., Sahai Y. // *Metallurgical and Material Transaction B*. 1992. Vol. 23. P. 135-152.
53. Effect of holding time and surface cover in ladles on liquid steel flow in continuous casting tundishes / Charkraborty S., Sahai Y. // *Metallurgical and Material Transaction B*. 1992. Vol. 23. P. 153-167.
54. Fluid flow and heat transfer in the ladle during teeming / Glaser B., Gornrup M., Sichen D. // *Steel Research International*. 2011. № 7. P. 827-835.
55. Энергосберегающие концепции футеровки ковшей / Рам К., Киршен М., Кронхалер А. // *Сталь*. 2009. № 9. С. 37-42.

56. Theoretical and practical study of thermal stratification and drainage in ladles of different geometry / Grip C.E., Jonsson K., Eriksson S., Jonsson L., Jönsson P., Pan Y. // *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 2000. Vol. 29. P. 30-38.
57. Numerical Simulation and Industrial Investigation on the Melt Stratification Phenomena in Ladles Holding Molten Steel / Olika B., Pan Y., Bjorkman B., Grip C. E. // *7th International Conference on Refining processes proceedings*. 1997. P. 361-384
58. Fluid flow and heat transfer in the ladle during teeming / Glaser B., Görnerup M., Sichen D. // *Steel Research International*. 2012. Vol. 82. No. 7. P. 827-835.
59. Numerical prediction and experimental verification of thermal stratification during holding in pilot plant and production ladles / Grip C-E, Jonsson L., Jonsson P. G. // *ISI International*. 1997. Vol. 37. P. 715-721.
60. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь / Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е., Павлов С.Н., О.Б. Исаев О.Б., Травинчев А.А. // *Металлург*. 2011. № 7. С. 50-53.
61. Numerical simulation of heat transfer phenomenon in steelmaking ladle / Tripathi A., Saha J. K., Singh J. B., Ajmani S. K. // *ISI International*. 2012. Vol. 52. №. 9. P. 1591 – 1600.
62. Развитие методов математического моделирования теплофизических процессов в топливных промышленных печах / В. А. Арутюнов, И. А. Левицкий, Т. Б. Ибадуллаев // *Металлург*. 2011. №1. С. 33-37.
63. High-performance prediction of molten steel temperature in tundish through gray-box model / Okura T., Ahmad I., Kano M., Hasebe I. Sh., Kitada H, Murata N. // *ISI International*. 2013. Vol. 53. №. 1. P. 76–80.
64. A new incremental learning modeling method based on multiple models for temperature prediction of molten steel in LF / Tian H., Mao Zh., Wang A. // *ISI International*. 2009. Vol. 49. №. 1. P. 58–63.
65. A statistical model for predicting the liquid steel temperature in ladle and tundish by bootstrap filter / Sonoda Sh., Murata N., Hino K., Kitada H., Kano M. // *ISI International*. 2012. Vol. 52. № 6. P. 1086 – 1091.
66. Temperature prediction model for controlling casting superheat temperature / Gupta N., Chandra S. // *ISI International*. 2004. Vol. 44. № 9. P. 1517 – 1526.
67. Модель для расчета теплотерь в процессе внепечной обработки стали / Лившиц Д. А., Попандопуло И. К., Паршин В. М., Кислица В.В., Исаев О. Б., Травинчев А. А. // *Сталь*. 2010. № 2. С. 29-31.

68. High Performance Prediction of Molten Steel Temperature Through Gray-Box Model / Okura T., Kano M., Hasebe I. Sh., Kitada H, Murata N. // Computing and Systems Technology Division. 2011. P. 1153–1154.
69. Ladle furnace steel temperature prediction model based on partial linear regularization networks with sparse representation / Lv W., Mao Zh., Yuan P. // Steel Research International. 2012. Vol. 83. №. 3. P. 288–296.
70. Development and application of a thermal model for the relined ladle in china steel corporation / Chen J. D., Wang P.H. // International Journal of Energy Research. 1996. № 20. P. 423-435.
71. Dynamic model for ladle preheater performance evaluation. Mohanty B., Satayayut J. / International Journal of Energy Research // 1991. № 16. P. 51-60.
72. Mathematical model for determining preheating schedule of dolomite ladles in melt shops / Saha J. K., Ajmani S. K., Chatterjee A. // Ironmaking & Steelmaking. 1991. Vol. 18. № 6. P. 417-422.
73. Ladle heating procedure and its influence on the MgO-C-Oxidation / Volkova O., Sahebkar B., Hubalkova J., Aneziris C. G., Scheller P. R. // Materials and Manufacturing Processes. 2008. № 23. P. 758-763.
74. Thermal modeling of the ladle preheating process / Glasser B., Gornierup M., Sichen D. // Steel Research International. 2011. Vol. 82. №12. C. 1425-1434.
75. Carslaw H.S., Yeager J.C. Conduction of heat in solids, 2nd ed. Clarendon Press, Oxford. 1959.
76. Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В. и др. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
77. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей: Учеб. пособие для вузов. – М. : МИСиС, 2000. – 272 с.
78. Карбидокремниевые нагревательные элементы Kanthal Global®SD: брошюра компании Kanthal. [http://www2.kanthal.com/C12570A7004E2D46/062CC3B124D69A8EC1256988002A3D76/DDE6A857C0FA1F78C12570C20051578C/\\$file/10-B-2-9%20global%20SD%20RU.pdf?OpenElement](http://www2.kanthal.com/C12570A7004E2D46/062CC3B124D69A8EC1256988002A3D76/DDE6A857C0FA1F78C12570C20051578C/$file/10-B-2-9%20global%20SD%20RU.pdf?OpenElement) (дата обращения: 05.02.11)
79. Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы: учебник для техникумов / Беленький А. М., Бердышев В. Ф., Блинов О. М., Морозов В. А. – М. : Металлургия, 1981. 264 с.
80. Опыт применения смолодоломитовых огнеупорных изделий в условиях сталеплавильного производства / Порохнявый В. Г. // <http://www.techcom-gmbh.de/innovaeditor/assets/admin/11Smoldolom%20ogneupor.pdf> (дата обращения 04.10.13)

81. Моделирование процесса выплавки полупродукта в ДСП / Белковский А.Г., Кац Я.Л. // ОАО "Черметинформация". Бюллетень "Черная металлургия. 2011. № 11. С. 42–50.
82. Хорошавин Л. Б., Перепелицын В. А., Кононов В. А. Магнезиальные огнеупоры : Справ. изд. – М.: Интермент Инжиниринг, 2001. – 576 с.: ил.
83. Обезуглероживание периклазоуглеродистых огнеупоров при тепловой обработке футеровок сталеразливочных ковшей / Матвеев М.В., Темлянцев М.В. //Металлург. 2010. № 8. С.60-62.
84. Матвеев М.В. Повышение стойкости периклазоуглеродистых футеровок сталеразливочных ковшей на основе применения ресурсосберегающих технологий разогрева : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Матвеев Максим Валерьевич – Новокузнецк., 2013. – 22 с.
85. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров / Темлянцев М.В., Матвеев М.В., Темлянцева Е.Н. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2011. № 10. С.32-36.
86. Технология сушки и нагрева футеровки сталеразливочных ковшей с обезвреживанием отходящих газов / Спирин В. А., Чернавин С. Б. и др. // Бюллетень «Черная Металлургия». 2013. № 7. С. 57-61.
87. Проектные показатели дуговой сталеплавильной печи производительностью 220 тыс. т жидкой стали в год для мини-завода / Кац Я. Л., Пасечник Н. В. // Электromеталлургия. 2005. №1. С. 2-6.
88. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии: учеб. пособие / А.И. Цаплин, И.Л. Никулин. – Пермь, 2011. – 299 с.
89. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Марийцев С.Н. Производство стали на агрегате ковш-печь / Под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Дюдкина Д.А. — Донецк, 2003. — 300 с.
90. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1982. – 160 с.
91. Макарова Н.В., Трофимец В.Я. Статистика в Excel: учебное пособие. – М.: Финансы и статистика. 2003. – 386 с.: ил.
92. Бююль А., Цёфель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. – СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2005. – 608 с.
93. Панченко А.И., Сальников А.С., Скрипка Л.М. и др. Математическая модель управления корректировкой химического состава подшипниковой электростали на установке ковш-печь // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. №6. С. 31-36.



ПРИЛОЖЕНИЕ Б – КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДОГРЕВА ФУТЕРОВКИ СТАЛЬКОВШЕЙ

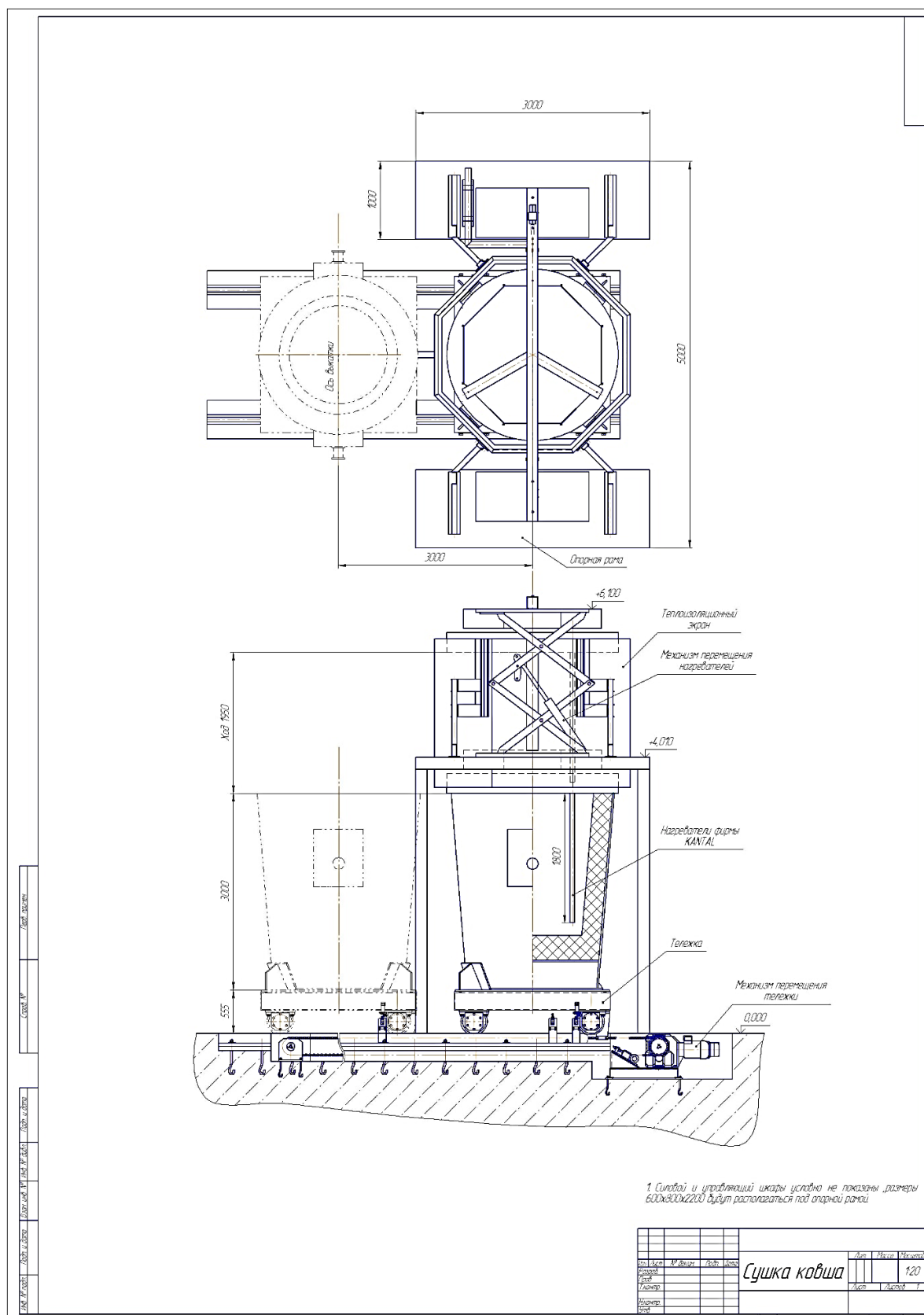


Рисунок Б1 – Конструкция стенда электрического подогрева футеровки стальной ковша

ПРИЛОЖЕНИЕ В – СПРАВКА ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР**ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ТЭК-98»**

109388 г.Москва, ул.Гурьянова, д.43, помещение правления Факс: (495) 353-88-43. Телефон (495) 978-30-04, electropech@gmail.com

14.07.14 № 58
На № _____ от _____

СПРАВКА

Об использовании результатов НИР в проектно-конструкторских, пуско-наладочных работах и технико-экономических расчетах

ЗАО «ТЭК-98» разрабатывает и поставляет металлургическим предприятиям установки электросушки и нагрева футеровки сталеразливочных ковшей с использованием карбидокремниевых нагревателей сопротивления.

В 2012 г. для определения параметров тиристорного источника питания установки УЭНК-20, предназначенной для сушки и нагрева футеровки стальной ЗАО "ТЭК-98" были использованы результаты НИР, выполненной Краснянским М. В. В частности, с использованием разработанных им моделей были рассчитаны температуры футеровки в зависимости от мощности, времени нагрева и др. технологических факторов. Была показана возможность нагрева футеровки ковшей до температуры 1400 °С и рассчитана экономическая эффективность электрического подогрева ковшей по сравнению с традиционным газовым подогревом. По результатам этой работы была опубликована статья «Эффективность электронагрева сталеразливочных ковшей» (Краснянский М. В., Кац Я. Л, Бершицкий И. М. // Металлург. 2012. №5. С. 48-53).

В сентябре-декабре 2013 г. специалисты ЗАО «ТЭК-98» проводили пусконаладочные работы установки электрического подогрева и сушки сталеразливочных ковшей в СПЦ-2 завода «Электросталь». Во время горячего опробования Краснянским М.В. проводились теплотехнические измерения, в частности замерялись температурные поля футеровки ковша после подогрева. Для повышения точности пирометрического метода измерения температуры футеровки

им была экспериментально определена степень черноты используемых на заводе периклазоуглеродистых огнеупоров.

Таким образом, Краснянский М.В. принимал активное участие в разработке энергетического режима, расчетах технико-экономических показателей, проведении пусконаладочных работ и испытаний установки электрической сушки и подогрева ковшей на заводе «Электросталь».

Генеральный директор
ЗАО «ТЭК-98», к.т.н.



Бершицкий И. М.